Российская академия наук
Институт горного дела УрО РАН
Институт земной коры СО РАН
Уральский государственный горный университет
Секция Сибири и Дальнего Востока Научного Совета РАН по проблемам
геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии
Международная ассоциация гидрогеологов
Общероссийская общественная организация Российский союз гидрогеологов

ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА

МАТЕРИАЛЫ ВСЕРОССИЙСКОГО СОВЕЩАНИЯ ПО ПОДЗЕМНЫМ ВОДАМ ВОСТОКА РОССИИ

(XXIV Совещание по подземным водам
Сибири и Дальнего Востока)

Екатеринбург
2024

УДК 556.3+504.43+504.46.06
ББК Д46я431+Д9(2Р5)46я431
П 44

Подземная гидросфера: материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с международным участием), г. Екатеринбург, 21-28 июня 2024 г. / Институт горного дела УрО РАН [отв. ред.: док. геол.-минер. наук С.В. Алексеев, док. геол.-минер. наук Л. С. Рыбникова]. – Екатеринбург: Институт горного дела ИГД УрО РАН, 2024. – 556 с.

В сборнике представлены доклады XXIV совещания по подземным водам востока России. В нем отражены важнейшие результаты работ, выполненных научными, вузовскими и производственными коллективами как в области гидрогеологии, так и в сфере инженерной геологии и геокриологии. Материалы совещания представляют интерес для специалистов-геологов широкого профиля, теоретиков и практиков, а также для аспирантов и студентов.

ОРГКОМИТЕТ СОВЕЩАНИЯ

д.э.н. А.В. Душин (председатель)
д.т.н. И.В. Соколов (председатель)
д.г.-м.н. С.В. Алексеев (сопредседатель, ответственный редактор)
д.г.-м.н. И.В. Абатурова
д.г.-м.н. Л.П. Алексеева
д.г.-м.н. Б.В. Боревский
д.г.-м.н. С.В. Борзенко
д.г.-м.н. А.Г. Вахромеев
к.г.-м.н. Н.А. Виноград
д.г.-м.н. В.Е. Глотов
д.г.-м.н. О.М. Гуман
д.г.-м.н. Н.В. Гусева
к.г.-м.н. Л.В. Замана
д.г.-м.н. А.В. Кирюхин
д.г.-м.н. Г.Н. Копылова
д.т.н. С.В. Корнилков
д.г.-м.н. В.В. Кулаков
д.г.-м.н. О.Е. Лепокурова
к.г.-м.н. Н.Г. Максимович
к.г.-м.н. Д.А. Новиков
к.г.-м.н. А.Ю. Озёрский
д.т.н. А.Г. Плавник
д.г.-м.н. А.М. Плюснин
д.г.-м.н. С.П. Поздняков
д.г.-м.н. Л.С. Рыбникова (заместитель председателя, ответственный редактор)
чл.-корр. РАН В.Г. Румынин
к.г.-м.н. А.В. Скалин
д.т.н. С.Н. Тагильцев (заместитель председателя)
д.г.-м.н. И.А. Тарасенко
д.г.-м.н. В.В. Шепелев
д.г.-м.н. Н.А. Харитонова
д.г.-м.н. А.П. Хаустов
д.г.-м.н. А.Л. Язвин

Проведение совещания и издание сборника осуществлено при спонсорской помощи И. В. Абатуровой, С. В. Алексеева, Л. П. Алексеевой, С. В. Борзенко, А. Г. Вахромеева, О. М. Гуман, А. В. Душина, Л. В. Замана, Г. Н. Копыловой, О. Н. Овечкиной, А. Ю. Озерского, Н. А. Павловой, В. А. Пеллинена, А. Г. Плавника, А. М. Плюснина, Л. С. Рыбниковой, П. А. Рыбникова, В. Г. Румынина, А. А. Светлакова, А. В. Скалина, И. В. Соколова, В. В. Шепелева, М. Ю. Широкова, А. Л. Язвина.

ISBN 978-5-6051272-4-6
© ИГД УрО РАН, 2024

ПРЕДИСЛОВИЕ

Всероссийское совещание по подземным водам востока России - традиционный форум гидрогеологов, научные и производственные интересы которых тесно связаны с фундаментальной проблемой формирования и эволюции подземной гидросферы. Оно проводится через каждые три года в разных городах Сибирского и Дальневосточного ФО, начиная с 1955 г. Инициатором его организации в советское время являлся Институт геологии Восточно-Сибирского филиала АН СССР (ныне Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск). В 2024 г. исполняется 69 лет со дня организации первого научного мероприятия сибирских гидрогеологов, состоявшегося в Иркутске. В последующем совещания еще шесть раз проводились в Иркутске (1982, 1988, 1994, 2000, 2012 и 2021 гг.), три раза в Тюмени (1967, 1997 и 2009 гг.), два раза в Чите (1958 и 1985 гг.), Красноярске (1961 и 2003 гг.) и Новосибирске (1973, 2018 гг.), один раз во Владивостоке (1964 г.), Хабаровске (1970 г.), Улан-Удэ (1976 г.), Петропавловске-Камчатском (1979 г.), Томске (1991 г.) и Якутске (2015 г.).

Традиционно в работе совещания принимают участие гидрогеологи не только из Сибири и Дальнего Востока, но и из европейской части России, а также стран ближнего и дальнего зарубежья. Всё это свидетельствует о том, что подобное совещание было и остается весьма востребованными гидрогеологическим сообществом. Традиционно оно собирает ведущих ученых России от «живых классиков» гидрогеологии до еще «не остепененной» молодежи. Как раз в этом-то и заключается его уникальность — на основе живого профессионального общения происходит передача опыта и знаний от одного поколения исследователей другому.

21-28 июня 2024 г. совещание впервые состоится в г. Екатеринбурге Уральского ФО. Оно будет проходить под флагом Десятилетия науки и технологий (2022-2031 гг.), включающего в себя комплекс инициатив, проектов и мероприятий для усиления роли науки и технологий в решении важнейших задач развития общества и России в целом, а также в рамках международного десятилетия действий «Вода для устойчивого развития» (2018-2028 гг.). Неслучайно и то, что раздел 1.5.11.2. «Гидрогеология и ресурсы подземных вод» входит в Перечень приоритетных направлений фундаментальных и поисковых научных исследований Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 - 2030 гг.), утвержденной Правительством РФ 31.12.2020 г. за № 3684-р.

Совещание будет посвящено также и 75-летию ее бессменного организатора - Института земной коры СО РАН - ведущего научного учреждения Российской Федерации в области фундаментальных исследований геологического профиля и связанных с ними прорывных технологий. Институт имеет заслуженный мировой авторитет в алмазной геологии, изучении суперконтинентов и палеоокеанов, внутриконтинентального рифтогенеза, теоретической и экспериментальной петрологии, тектонофизики, сейсмичности, гидрогеологии и инженерной геологии. Главные приоритеты развития Института земной коры СО РАН - углубление фундаментальности научных исследований, развитие инновационной деятельности, наращивание приборно-аналитической и материально-технической базы, усиление кадрового потенциала.

На предстоящем совещании предполагается обсудить широкий спектр проблем, стоящих перед отечественной и мировой гидрогеологией. В полновесном сборнике содержится 104 доклада, которые были представлены на совещание и отобраны редакционной коллегией для опубликования.

Тематика докладов охватывает широкий круг фундаментальных и прикладных гидрогеологических проблем, касающихся эволюции гидрогеологических систем различного типа в условиях изменений климата, взаимодействия в системе «вода—

порода-газ-органическое вещество», криогидрогеологии, минеральных, термальных и промышленных подземных вод, изотопов в подземной гидросфере, экологических проблем гидрогеологии, разработки месторождений полезных ископаемых и использования шахтных вод.

Обобщенные итоги обсуждения представленных докладов найдут отражение в Решении XXIV совещания по подземным водам востока России, которое будет подготовлено и разослано всем участникам, администрациям субъектов РФ, профильным ведомствам, организациям и предприятиям.

Ответственные редакторы
д.г.-м.н. С.В. Алексеев
д.г.-м.н. Л.С. Рыбникова

I. ЭВОЛЮЦИЯ ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЫ

ДОСТОВЕРНОСТЬ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ: ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И ПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ

Боревский Б.В.
АО «ГИДЭК», Москва, E-mail: borevsky@hydec.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние полноты и состава исходных данных, получаемых при гидрогеологических исследованиях, на достоверность выполняемых прогнозов и принимаемых на их основании инженерных решений. Показано, что достоверность прогнозов и требования к полноте информации, положенных в их основу, зависит от сложности гидрогеологических условий. Полнота и надежность имеющейся в распоряжении гидрогеолога информации зависит как от комплекса выполненных исследований, так и от требований нормативной базы.

В настоящее время образовался существенный разрыв между широкими возможностями выполнения прогнозов с использованием разработанных математических решений и численного моделирования и полнотой и достоверностью имеющейся для их реализации информации. Для преодоления этого разрыва необходимо совершенствование методики и широты выполняемых исследований и требований нормативных документов к их содержанию и результатам.

Ключевые слова: *достоверность, гидравлические прогнозы, разведочное моделирование, проектные решения, информация*

Abstract. The effect of the completeness and composition of the initial data obtained during hydrogeological studies on the reliability of forecasts and engineering decisions taken on their basis is considered. It is shown that the reliability of forecasts and the requirements for the completeness of information underlying them depend on the complexity of hydrogeological conditions. The completeness and reliability of the information available to a hydrogeologist depends both on the complex of studies performed and on the requirements of the regulatory framework.

At present, a significant gap has formed between the wide possibilities for making forecasts using the developed mathematical solutions and numerical modeling and the completeness and reliability of the information available for their implementation. To overcome this gap, it is necessary to improve the methodology and breadth of the research being carried out and the requirements of regulatory documents for their content and results.

Key Words: *reliability, hydraulic forecasts, exploration modeling, design decisions, information*

Продуктом гидрогеологических исследований инженера-гидрогеолога является информация. От надежности и достаточности полученной в процессе гидрогеологических исследований информации зависит обоснованность выполняемых на ее основании прогнозов и принимаемых проектных решений и возникающих ошибок или даже аварийных ситуаций при ее недостаточности или недостоверности. В этом смысле работа гидрогеолога ничем не отличается от работы врача или военноначальника. Решения, принимаемые на основе недостаточной или недостоверной информации, могут иметь самые серьезные экономические, экологические и даже трагические последствия. Следовательно, достаточность и достоверность имеющейся информации и их оценка являются необходимым и решающим условием эффективности любых гидрогеологических прогнозов.

Достоверность гидрогеологических прогнозов при решении различных задач, связанных с расчетами снижения уровней, величины водопритоков в горные выработки и дренажные системы, оценкой изменения качества подземных вод, влияния водоотбора на окружающую среду и т. д., являются решающим результатом эффективности и оптимальности принимаемых на их основании проектных, строительных и управленческих решений.

Несмотря на исключительно важное значение достоверности прогнозирования, в т.ч. при аварийных ситуациях, этой проблеме в настоящее время уделяется совершенно

недостаточное внимание. В этом отношении можно постулировать, что достоверность гидрогеологических прогнозов зависит от выбранной методики прогнозирования и полноты, детальности и обоснованности исходных данных, положенных в основу выполненных прогнозов. При этом совершенно очевидно, что если прогнозы можно выполнить различными методами, легко дополнить или пересчитать в относительно короткое время, то недостаточность и погрешности исходных данных компенсировать значительно сложнее, а в ряде случаев, по существу, невозможно. Следовательно, и достоверность прогнозов окажется весьма невысокой или даже относительно низкой, даже при использовании самого совершенного и современного математического аппарата прогнозирования. Причем сама оценка достоверности прогнозов достаточно надежно может быть выполнена только путем сопоставления данных гидрогеологических прогнозов с фактически наблюдаемыми в течение достаточно длительного времени.

Рассматриваемому направлению большое внимание начало уделяться в конце 60-х - начале 70-х годов XX века. В это время под руководством Н.Н. Биндемана была выполнена по всей территории Советского Союза масштабная работа по сопоставлению результатов разведки и эксплуатации подземных вод. Результаты этих работ показали, что в большинстве случаев расчетные понижения уровней подземных вод оказались существенно больше прогнозируемых. В основном эти расхождения были связаны с неучетом всех источников формирования водоотбора и существенным завышением (примерно на 1,5-2 порядка) расчетных значений коэффициента пьезопроводности и радиуса влияния водоотбора, т.е. размеров воронки депрессии по площади и глубине, значительно превышающих фактически наблюдаемые.

В связи с полученными результатами для преодоления существенных расхождений прогнозов и фактов на первом этапе Н.Н. Биндеманом было введено понятие обобщенных параметров как некоторых (по существу, гидравлических) коэффициентов учитывающих совокупность всех факторов, определяющих величину и закономерности снижения уровней подземных вод. Впоследствии в связи с развитием и внедрением в практику методов математического моделирования от использования обобщенных параметров отказались. Тем не менее, при прогнозах гидравлическим методом с использованием достигнутых закономерностей изменения уровней или их удельных понижений принятые коэффициенты могут рассматриваться как аналоги обобщенных параметров. Н.Н. Биндеман сформулировал такие прогнозы как совместное применение гидравлического и гидродинамического методов.

Результаты проведенных работ были обобщены и проанализированы Л.С. Язвиным в его докторской диссертации «Гидрогеологические основы оценки достоверности прогнозов при подсчете эксплуатационных запасов подземных вод» (1972 г.).

Приведу основные выводы, сделанные Л.С. Язвиным, применительно к оценке запасов подземных вод, поскольку они не только не потеряли своей актуальности, но безусловно требуют возврата к этой весьма актуальной проблеме.

1) Под степенью достоверности оценки запасов полезных ископаемых подразумевается степень соответствия прогнозов, выполненных по результатам разведочных работ, фактическим данным, получаемым при эксплуатации.

2) В качестве критерия достоверности прогнозов предлагается принимать степень обоснованности исходных данных, используемых при оценке запасов подземных вод, т.е. надежность установления основных источников формирования запасов, расчетных гидрогеологических параметров и гидрохимических условий.

3) Надежность установления перечисленных факторов, а, следовательно, и степень соответствия расчетной схемы конкретным природным условиям определяется сложностью гидрогеологических условий.

Следовательно, более сложные условия требуют либо значительного увеличения объема и состава исходных данных для прогнозирования, либо снижения требований

к достоверности прогнозов. На практике используется комбинация этих вариантов, т.к. объем необходимых исходных данных реально не может быть получен при гидрогеологических исследованиях, либо его получение экономически нецелесообразно.

В практике подсчета запасов подземных вод необходимый объем исходных данных, изученность запасов и соответствующая ей достоверность прогнозов качественно определяется их категорийностью (категории А, В, C_1 и C_2).

Для анализа достоверности принимаемых решений автором данной статьи был выполнен анализ 350 протоколов ГКЗ СССР по рассмотрению подсчетов запасов подземных вод, т.е. всех протоколов за период 1966-1970 гг. На основании этого анализа Л.С. Язвиным и Б.В. Боревским были выделены 3 группы сложности гидрогеологических условий и сформулированы предложения по дифференциации категорийности запасов для таких групп. Чем сложнее условия, тем ниже требуемая категорийность запасов или требования к достоверности их подсчета. Эти предложения и разработки были приняты ГКЗ при Совете Министров СССР в 1976 г.

Тем не менее, вопрос об оптимальном соотношении необходимых исходных данных для прогнозирования и достоверности прогнозов не имеет количественных критериев и в настоящее время. Более того, если в 70-е и 80-е годы XX века при обосновании требований к объему и составу исходных данных и к достоверности прогнозирования, этот вопрос решался при проектировании и проведении разведочных работ путем расширения методов исследований, их объема и комплексирования, то в настоящее время объемы и состав исследований значительно сузились. В то же время, за последние десятилетия значительно расширился набор математических методов решения различных гидрогеологических задач и численного моделирования. По существу, разработанное программное обеспечение позволяет выполнить прогнозные расчеты для гидрогеологических условий любой сложности при решении самых разнообразных инженерных задач. Однако, достоверность и совокупность имеющихся исходных данных для таких прогнозных расчетов совершенно неадекватна их возможностям. Между ними образовался существенный разрыв, который все время возрастает в связи с эффективным развитием методов математических расчетов и численного моделирования и соответствующем полным отсутствием хоть какого-нибудь прогресса в обоснованности и полноте исходных данных для прогнозирования особенно в сложных и весьма сложных гидрогеологических условиях.

Преодоление этого разрыва требует безусловного повышения обоснованности гидрогеологических прогнозов исходными данными, расширением и совершенствования методов исследований и технологии их проведения, обеспечивающих полноту и достоверность исходных данных для прогнозирования. Особое внимание следует уделять достоверности результатов, получаемых при проведении гидрогеологических исследований и выборе с этой целью методов и технологии их проведения. Как никогда актуальны при этом слова В.А. Мироненко: «Экспресс-откачки самый дешевый метод получения неверных результатов». Между тем, прогнозы водопритоков в карьеры или подземные горные выработки осуществляются преимущественно на данных экспресс-откачек.

Однако задача повышения полноты и достоверности исходных данных требует различных ограничений, как по экономическим, так и по технологическим причинам. Возникает совершенно обоснованный вопрос: «Какой состав исследований и их объем необходим и оптимален для решения поставленной задачи?», тем более, когда количественные критерии для ответа на этот вопрос отсутствуют. Следовательно, следует оценить, как наиболее эффективно решить задачу оптимизации видов и объемов планируемых работ в различных по сложности гидрогеологических условиях.

Одним из весьма эффективных методов решения этой задачи является разведочное моделирование. В моей практике разведочное моделирование начало применяться в начале 60-х годов XX века.

Приведу два примера, в одном из которых было проведено обоснование целесообразности проведения ранее не практикуемых работ, а во втором – нецелесообразность их проведения.

Пример 1. На крыле синклинали в Северном Казахстане продуктивным горизонтом являлась узкая полоса интенсивно трещиноватых турнейских известняков с водопроводимостью около 2000 $м^2$/сут при ширине полосы 150-200 м. С обеих сторон эта полоса контактировала со слаботрещиноватыми эффузивами и толщей терригенных пород с водопроводимостью около 50 $м^2$/сут. Ранее предполагалось, что эти породы при гидродинамических прогнозах можно рассматривать как непроницаемые. Выполненное на кафедре гидрогеологии МГРИ в 1963 году тестовое моделирование показало, что именно приток к полосе из слаботрещиноватых пород является определяющим в формировании баланса водопритоков к скважинам, расположенным в пределах полосы. На этом основании было обоснованно и реализовано проведение кустовых откачек из слаботрещиноватых пород для определения гидродинамических параметров, т.к. изменение их водопроводимости даже в небольшом диапазоне существенно влияло на величину запасов [2].

Пример 2. Разведка для водоснабжения г. Ухта проводилась в краевой части Печорского артезианского бассейна. Продуктивный водоносный горизонт в интенсивно-трещиноватых доломитах изучался в области их выхода на поверхность под четвертичные заболоченные отложения, дренируемые небольшими ручьями. Пласт круто погружался в направлении центральной части бассейна. При погружении пласта существенно уменьшалась водопроводимость водовмещающих пород и увеличивалась глубина скважин. В проекте работ было предусмотрено бурение профиля скважин для оценки изменения водопроводимости с глубиной погружения пласта. Поскольку при бурении каждой следующей скважины существенно менялась их глубина в 1966 году было совместно с Л.К. Гохбергом и Б.М. Зильберштейном во Втором Гидрогеологическом Управлении выполнено разведочное моделирование с целью оценки целесообразности дальнейшего бурения скважин при погружении пласта. В результате тестового разведочного моделирования было установлено, что при погружении кровли пласта примерно на 150 м задаваемые параметры перестают влиять на прогнозные решения.

По результатам разведочного моделирования может быть обоснован оптимальный комплекс геолого-разведочных работ или гидрогеологических исследований при проведении инженерных изысканий. Анализ полученных материалов позволяет исключить или существенно сократить затраты на изучение факторов, незначительно влияющих на достоверность прогнозных решений и, напротив, повысить изучение наиболее значимых факторов и параметров.

К сожалению, разведочное моделирование для оптимизации объемов геолого-разведочных или изыскательских работ применяется в редких случаях. Между тем, применение разведочного моделирования позволяет рассмотреть самые разнообразные, в т.ч. аварийные ситуации, которые могут влиять на инженерные решения, их экономические показатели и надежность принимаемых проектных решений на объектах строительства и геологические риски на этапе эксплуатации.

Особое внимание следует обратить на изменение качества питьевых подземных вод при эксплуатации, результаты которой противоречат выполненным прогнозам его сохранения. Я уже неоднократно поднимал этот вопрос, т. к. высокая стоимость водоподготовки при использовании, например, обратного осмоса требует дополнительных существенных затрат и, соответственно, повышения тарифов отпуска воды населению.

К сожалению, никаких заметных сдвигов в этом направлении не происходит. Практикуемая методика гидрогеологических работ не позволяет получить необходимые исходные данные для достоверного прогноза изменения или сохранения качества

питьевых вод при эксплуатации. Для решения этой задачи требуется совершенствование как методики изучения, так и методов прогноза.

Уже много лет предлагается выполнить работу по сопоставлению результатов прогноза качества подземных вод по данным разведки с данными эксплуатации. Она до сих пор не выполнена. Между тем, на государственном учете состоят многие крупные месторождения питьевых подземных вод, благоприятный прогноз качества воды по которым по результатам разведки противоречит данным эксплуатации.

Другим направлением повышения достоверности гидрогеологических прогнозов является совершенствование действующей нормативной базы, определяющей объем и состав выполняемых исследований. Это направление является не менее важным, но в отличие от совершенствования методики и технологии гидрогеологических исследований применительно к особенностям и сложности геолого-гидрогеологических условий изучаемого объекта, оно носит не объективный, а субъективный характер.

Не могу не отметить, что за последние десятилетия содержание нормативных документов и требования к результатам гидрогеологических исследований изменились в направлении бюрократизации, т.е. выполнения некоторых часто не имеющих гидрогеологического смысла формальных процедур, взамен требований к содержательному профессиональному поиску наиболее эффективных инженерных решений. Я не говорю уже о каком-то научном обосновании требований нормативной базы, которое в Советском Союзе выполняли отраслевые институты и, в частности, институт ВСЕГИНГЕО в Мингео СССР.

В качестве одного из ярчайших примеров рассмотрим требования к обоснованию границ различных поясов зоны санитарной охраны водозаборов питьевых подземных вод и их проектированию. Перечисление наиболее значимых недостатков действующих санитарных норм и правил заняло бы довольно большой объем и требует отдельного рассмотрения.

Отметим лишь наиболее кричащие из них:

- проектирование зоны санитарной охраны (ЗСО) — это единственный вид проектирования, для которых не проводятся инженерные изыскания;

- защищенность подземных вод не учитывается при обосновании размеров и границ ЗСО;

- в пределах ЗСО не допускается размещение сооружений по утилизации остаточных продуктов водоподготовки путем их закачки в глубокие водоносные горизонты;

- существующие требования приводят к существенному завышению размеров ЗСО, что вызывает их неоправданно большие размеры и трудности при согласованиях с землепользователями.

Предполагается, что необходимые исходные данные должны быть получены при геолого-разведочных работах для оценки запасов подземных вод. Между тем при подсчете запасов требуется обоснование границ ЗСО, но никаких специальных работ для обоснования исходных данных как границ ЗСО, так и для проектирования не приводится.

Особое критическое отношение вызывает состав гидрогеологических исследований при инженерных изысканиях для целей строительства. Критике их состава и содержания посвящены многие работы М.В. Лехова. В этом автор данной статьи является его единомышленником.

Их основные недостатки связаны, с нашей точки зрения с тем, что гидрогеологические исследования входят в состав инженерно-геологических изысканий. Но проблема заключается в том, что объектом инженерно-геологических изысканий является площадка строительства, а гидрогеологических и территория за пределами площадки строительства, т.е. зоны влияния дренажа и формирования водопритоков.

При инженерно-геологических исследованиях совершенно не уделяется внимание изучению режима подземных вод, в то время как при гидрогеологических прогнозах этот вопрос имеет принципиальное значение, особенно при прогнозах подтопления в периоды паводков. Выделение инженерно-гидрогеологических изысканий в отдельный вид инженерных изысканий давно назрела и перезрела.

Соотношение детальности изучения площадки размещения инженерных сооружений и прогнозирования к ним водопритоков и зоны влияния водоотбора и формирования водопритоков также требует специального рассмотрения не только в вопросах строительства. Этот вопрос крайне актуален при прогнозировании водопритоков к открытым и подземным горным выработкам при добыче твердых полезных ископаемых.

Обычно все исследования проводятся в пределах горного отвода, ограниченного площадью разработки. Зона влияния водоотлива за пределами горного отвода практически не изучается. Численные модели, используемые для прогнозирования, разрабатываются для всей зоны влияния. В результате эти модели обеспечены информацией на крайне незначительной площади разработки по сравнению с размерами зоны влияния, не обеспеченной достаточной информацией. Очевидно, что невозможно провести исследования на всей площади формирования водопритоков, но оценить влияние недостаточности имеющейся информации на погрешности прогнозирования и достоверность выполнения прогнозов гидрогеолог обязан.

Все приведенные примеры свидетельствуют о необходимости оценки достоверности гидрогеологических прогнозов и возможных масштабах их погрешностей. Несомненно, достоверность выполненных прогнозных расчетов и их погрешности зависят от объема и достаточности имеющейся в распоряжении гидрогеолога информации. Следовательно, оценка достаточности имеющейся в распоряжении гидрогеолога информации и ее достоверности необходимы для выполнения гидрогеологических прогнозов и последствий ошибок прогнозирования.

Список литературы

1. Биндеман Н.Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М: Госгеолиздат. 1963.

2. Боревский Б.В. и др. Опыт разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод в трещинно-карстовых пластах (на примере Пожняель-Седьюского месторождения). М: Изд. 2 ГУ. 1970.

3. Гавич И.К. и др. Использование аналоговых сеточных машин на предварительных стадиях разведки с целью уточнения методики и объемов дальнейших гидрогеологических исследований. Тр. коорд. совещаний по гидротехнике, вып. XXV. – М: Энергия. 1966.

4. Язвин Л.С. Достоверность гидрогеологических прогнозов при оценке эксплуатационных запасов подземных вод. – М: ВСЕГИНГЕО. 1972.

О ЗАМЕЧАТЕЛЬНОЙ СИБИРСКОЙ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ШКОЛЕ И ЕЁ СОЗДАТЕЛЕ

Гаев А.Я. [1,2], Алферов И.Н. [3]
[1]ФГБУН Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Оренбург, gayev@mail.ru
[2]Институт экологических проблем гидросферы при Оренбургском госуниверситете, Оренбург, maneb-or@mail.ru
[3]ФГБУН Институт экономики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, alferov.in@uiec.ru



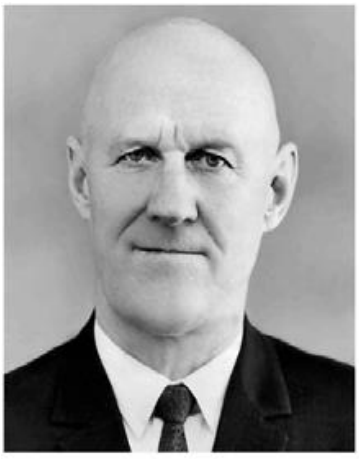
Плеяда выдающихся отечественных гидрогеологов-сибиряков настолько велика, самобытна и неповторима, что охарактеризовать и просто перечислить всех этих замечательных исследователей в одной короткой статье просто невозможно. Поэтому автор заранее извиняется, и остановится только на тех, с кем был дружен, а не просто знаком.

С сибирской школой познакомил меня мой старший коллега член-корреспондент АН СССР Александр Степанович Хоментовский, с которым мне посчастливилось общаться (с 1959 г.) и совместно работать (1970-1986). Он в 1930 г. закончил Томский индустриальный институт вместе с одногруппником Павлом Афанасьевичем Удодовым и поддерживал с ним контакты и до войны, работая в Сибири и после возвращения с фронта. Так что его тоже надо считать представителем сибирской школы, тем более что он стал организатором ДВФ-ДВО АН СССР и проработал на Дальнем Востоке и в Китае более 10 лет. Переехав из-за ухудшения здоровья на Урал, Александр Степанович и подключил меня к контактам с сибиряками.

О контактах с замечательными сибиряками надо писать книги и поэмы, особенно об Октавии Несторовиче Толстихине. Время неумолимо мчится – и вот мы уже отмечаем 98 лет со дня рождения незабвенного Евгения Викторовича Пиннекера (1926-2001). Я познакомился с ним сначала заочно, по его работам по Сибирской платформе. Очному знакомству и общению с ним способствовали Всесоюзные и Всероссийские форумы, особенно по подземным водам Востока нашей страны: во Владивостоке, Петропавловске-Камчатском, Томске, Иркутске, Чите, Тюмени и др. С ним было легко подружиться с первой встречи из-за его исключительной коммуникабельности, дружелюбия и прекрасным человеческим качествам. Он всегда легко шел на обмен книгами, идеями, планами, регулярно переписывался с коллегами и учениками, обменивался отзывами на работы и авторефераты подопечных. Он не только был первоклассным специалистом по проблемам региональной гидрогеологии, но и великолепно знал лично ведущих ученых во многих странах мира. Его личное обаяние и высокий профессионализм сочетались в нем удивительно гармонично. В компаниях коллег хорошо проявились простые человеческие качества Евгения Викторовича. Он не был шумным собеседником, но всегда умел овладеть вниманием окружающих интересным рассказом о своих многочисленных поездках, об интересных наблюдениях природных явлений, тонким изысканным юмором, безобидной шуткой или деликатным

анекдотом. Еще одним удивительным качеством было умение внимательно и заинтересованно слушать собеседника, что, как известно, не всем дано.

Встречаясь с ним десятки раз в различных городах б. СССР, я ни разу не слышал от него чего-либо шокирующего или хотя бы одного бранного слова. Он всегда оставался воплощением самой деликатности. В Санкт-Петербургском горном институте, на многочисленных конференциях, а в последнее десятилетие – на Толстихинских чтениях, мы встречались неоднократно. И в одну из последних встреч, на конференции, посвященной 90-летию В.Д. Ломтадзе, Евгений Викторович на неофициальной части встречи, когда были произнесены многие тосты, подсел к нашему столу и спросил: «Мужики, как зовут выступавшего коллегу из Екатеринбурга? Я у них читал лекции и мне неудобно, что я забыл его имя-отчество». Речь шла о симпатичном и энергичном человеке – Станиславе Густавовиче Дубейковском – моем докторанте. Кто-то из нас, разгоряченный встречей, ответил: «Да зови его просто Стас». Евгений Викторович покачал головой и деликатно ответил: «Мне так неудобно». Но все друзья Станислава Густавовича почти в один голос заявили: «Да чего там неудобного, говори Стас и все тут». Видя некоторое замешательство Евгения Викторовича, я назвал полное имя коллеги, и только после этого он обратился к С.Г. Дубейковскому со своими вопросами, которые возникли в дни его пребывания в Екатеринбурге.



Александр Степанович Хоментовский



Степан Львович Шварцев



Октавий Несторович Толстихин



Владимир Михайлович Матусевич

Всегда восхищала тщательность, с которой готовились под руководством Евгения Викторовича Всесоюзные совещания по подземным водам Востока России (ранее СССР). Особенно запомнились IX Совещание в Петропавловске-Камчатском (1979) с

экзотикой вулканов и термальных источников, X Совещание в Иркутске (1982). Почти в заключительной части этого совещания Евгений Викторович, информируя присутствующих о заключительной части программы, заинтриговал весь зал, объявив, что к вечеру перед нами выступит с творческим концертом поэт, которого мы знаем, но которого он до поры до времени называть не будет. Сюрприз превзошел все ожидания: перед нами читал свои стихи известный исследователь Якутии и ее наледей Октавий Несторович Толстихин. Как исследователя наледей, профессионала-гидрогеолога и специалиста по геоэкологии мы его все хорошо знали и даже дружили, но поэтический дар О.Н. Толстихина для большинства из нас был открытием. Евгений Викторович мастерски обыграл этот сюрприз, продержав присутствующих несколько часов в приятном неведении.

Не каждому дано так обстоятельно и неординарно организовывать форумы, как удавалось это Евгению Викторовичу. Содержательная рабочая часть неизменно подкреплялась интереснейшими экскурсиями, профессиональными кинофильмами, концертами, товарищескими вечерами. Вокруг него всегда были энергичные молодые помощники, а личное его обаяние, способность моментально вникнуть во все детали происходящего, оценить их и направить в нужное русло, делало встречи с ним незабываемыми. Он обладал и талантом экспромта. После конференции в Томске, в 1988 г., областное радио предложило группе ученых выступить и осветить важнейшие проблемы гидрогеохимии и их значение для Томска и области. Евгений Викторович и Степан Львович Шварцев призвали руководителей секций и за 15-20 минут сценарий нашего коллективного выступления был готов, и группой ведущих гидрогеологов мы поехали и выступили по областному радио.

Нельзя не отметить большое научное наследие Евгения Викторовича Пиннекера. Ведя активнейший образ жизни, объездив весь земной шар, систематически работая в поле, которое не ограничивалось границами б. СССР, а распространялось на Монголию, Китай, Германию и пр., он постоянно анализировал накопленный материал. Вершиной его творческой деятельности и лучшим памятником стало 6-томное издание по гидрогеологии. Он сумел организовать огромный коллектив ведущих ученых страны, усилиями которого создан шедевр гидрогеологического творчества, равного которому еще долго не будет в отечественной и мировой науке. Этот труд получил достойную награду.

Много внимания он уделил актуальным проблемам охраны и рационального использования подземных вод. В одной из последних его книг: «Экологические проблемы гидрогеологии» замечательно соединились высочайшая зрелость ученого-энциклопедиста в гидрогеоэкологической области знаний и талант писателя, сумевшего реализовать тезис: «словам тесно, а мыслям просторно». Книга написана точным, скупым языком. В очень небольшом объеме охвачена обширная проблема. Труд этот долго будет служить настольной книгой для многих гидрогеологов России и стран СНГ.

Думается, что богатейшее наследие, оставленное ученым, нуждается в переосмыслении и переиздании. Об этом свидетельствуют и многочисленные конференции, проходящие регулярно в Иркутске, Томске, Тюмени, Перми, Оренбурге, Москве, Екатеринбурге, С-Петербурге и др. городах, на которых в докладах нередко упоминаются и развиваются идеи Евгения Викторовича Пиннекера. Я лично благодарен судьбе за то, что она свела меня с таким замечательным ученым и обаятельным человеком. Память о нем я, как и многие друзья, коллеги, ученики и последователи замечательного ученого и человека навсегда сохраню в своем сердце.

Работа подготовлена в соответствии с планом НИР ИЭ УрО РАН.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ РАПА-СИЛЛОВ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРЕДЕЛЬНО НАСЫЩЕННЫХ ЛИТИЕНОСНЫХ РАССОЛОВ НА ЮГЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Вахромеев А.Г.[1], Кирюхин А.В.[2], Сергеева А.В.[2], Литвинова И.В.[3]
1 - Институт земной коры СО РАН, Иркутск, andrey_igp@mail.ru
2 - Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, AVKiryukhin2@mail.ru
3- АК «АЛРОСА» (ПАО), Новосибирск, LitvinovaIV@alrosa.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы формирования предельно насыщенных рассолов крупнейшей мировой гидроминеральной провинции в чехле Сибирской платформы. Показано, что воздействие магмы, расплавов на вмещающие породы и флюиды сопровождалось циклами вертикального и горизонтального (рапа-силлы) перераспределения геофлюидных фаз по механизму газлифта и гидроразрыва, испарительного концентрирования рассолов с обогащением по брому, литию, и другим щелочноземельным металлам (ЩЗМ). Выполнено тестовое TOUGH2-EWASG моделирование извлечения рассола из рапа-силловой формации.

***Ключевые слова**: рассолы, литий, магма, трубки взрыва, гидротермы, силлы, гидроразрыв, Сибирская платформа*

Abstract. The problems of formation of extremely saturated brines of the world's largest hydro-mineral province - the Siberian Platform - are considered. It is shown that the impact of magma, melts on the host rocks and fluids was accompanied by cycles of vertical and horizontal (rapa-sill) redistribution of geofluid phases by the mechanism of gas-lift and hydraulic fracturing, evaporative concentration of brines with enrichment in bromine, lithium, and other alkaline-earth metals. Test TOUGH2-EWASG modeling of brine extraction from rapa-sill formation was performed.

***Key words:** brines, lithium, magma, eruption pipes, hydrotherms, sills, hydro-fracturing, Siberian platform*

Введение

В числе промышленных типов Li сырья важнейшую роль в мире играют литиеносные рассолы. Промышленные рассолы Сибирской платформы (СП) по содержанию Li уступают только Чилийскому Салару-де-Атакама. В гидрогеологическом разрезе осадочного чехла наблюдается инверсия минерализации и концентраций промышленно-ценных элементов. Предельно насыщенные рассолы, и в них максимальные значения ЩЗМ, в первую очередь лития, характерны именно для рассолов средней, галогенно-карбонатной формации солеродного кембрийского бассейна осадочного чехла [Пиннекер, 1966; Основы, 1982; Алексеев, 2014; Вахромеев, 2015; Alexeev, et al., 2020]. Необходимо найти геологическую трактовку более высоких концентраций Li в рассолах галогенно-карбонатной гидрогеологической формации (400–700 мг/дм3 по металлу), т.е. 3–5 кратного превышения содержания иона Li относительно рассолов терригенной гидрогеологической формации. Отмечено, что наибольшие концентрации ЩЗМ высококонцентрированных рассола в коллекторах юга СП наблюдаются вблизи внедрившихся магматических тел-силлов.

Трапповый магматизм

На Сибирской платформе весьма широко был распространен трапповый магматизм. Магматический расплав, по сути, также является флюидом [Файф и др., 1981], и его движение в земной коре подчиняется распределению напряжений в регионах внедрения. Гидростатическая природа базальтового расплава определяет закономерности его размещения в осадочном чехле, которые в значительной степени подобны распределению остальных флюидов (воды, нефти, газа). Это и преимущественный подъем расплава вверх по восстанию пород с переходом на более высокие стратиграфические уровни по мере удаления от очаговой зоны, и выбор для

ступенчатых переходов наиболее ослабленных и проницаемых участков, и движение по направлениям минимальных геостатических напряжений с обтеканием районов их повышенных значений [Мигурский, 1999, 2006]. Как и все глубинные эманации, трапповые расплавы первоначально поднимаются по субвертикальным каналам в зонах разломов. Уже на средних глубинах земной коры во фронтальной части магматической колонны начинает формироваться клин летучих компонентов, частью за счет их выделения из расплава, частью за счет захвата флюидов из вмещающих пород. Наиболее активно летучие из основных магм выделяются на глубинах 3-7 км. Эта активность зависит от их весового содержания: чем больше летучих в магме, тем глубже начинается ее вскипание [Кадик и др., 1971]. В осадочном чехле клин летучих, а вслед за ним и расплав в случае преобладания горизонтальных сжимающих напряжений меняют вертикальную составляющую движения на латеральную, формируя пластовые интрузии – силлы. В сущности, интрузии траппов — это застывший след движения флюидов в осадочном чехле [Мигурский, 2010].

Трапповый магматизм на территории южной части Сибирской платформы привлекал внимание многих исследователей. Среди завершающих обобщений последней трети XX века для нас наиболее интересны работы [Домышева, 1974; Одинцова, 1980; Замараева, 1961; Страхова, 1978; Феоктистова, 1978] в которых рассмотрены вопросы геодинамики проявления траппового магматизма и последовательность магматических фаз, механизмы внедрения силлов, взрывного вулканизма, постмагматическая гидротермальная деятельность.

Влияние магматизма на формирование и преобразование рассолов

Гидрогеологами детально рассмотрены гипотезы концентрирования рассолов, геологические этапы, а также изменения их макрокомпонентного состава в процессе длительного процесса взаимодействия «вода-порода» (Шварцев, 2005). Эволюция рассолов – результат длительного и непрерывного взаимодействия рассолов и вод с породами со времени их совместного захоронения в бассейнах седиментации вследствие равновесно-неравновесного состояния системы, а также влияния процессов галогенеза, катагенеза и магматизма – наиболее мощных факторов формирования и преобразования рассолов.

Вулканогенно-гидротермальные циклы преобразования первично седиментогенных, метаморфизованных рассолов раскрыты менее детально, их роль оценивается по разному [Пиннекер, 1966; Основы, 1982; Alexeev, 2020; Сурнин, 2020, Литвинова, 2020].

Концептуальная модель формирования рассолоносных коллекторов

Магматический этап. Эволюция СП в докембрии и фанерозое включала несколько циклов тектоно-магматической активности (ТМА), сопровождавшихся щелочным кимберлитовым и трапповым магматизмом корневого типа – внедрением мантийных расплавов в верхи платформенного чехла (рис. 1) (Геология, 1961; Страхов, 1978, Одинцов, 1980; Атлас, 2000; Абрамович, 2014). При внедрении расплава магм (1200°С) в осадочный чехол вероятно формировался перегретый парогазовый фронт, двигавшийся впереди магматического тела (Мигурский, 2010).

Воздействие магматического расплава на вмещающие породы и флюиды и последующие гидротермальные циклы в этапы эффузивного и интрузивного магматизма вызвали процессы магмо- и гидроразрыва, испарительного концентрирования рассолов с обогащением по брому, ЩЗМ, диссоциацию доломитов и известняков, и как следствие – образование залежей диоксида углерода и огромного количества сероводорода, карбонатов и магнезиальных алюмосиликатов» (Вожов, 2006). Это обогащение происходило в областях вулканической деятельности на гигантской территории платформы в периоды траппового и кимберлитового магматизма, а также в постмагматические этапы гидротермальной деятельности вулканических аппаратов.

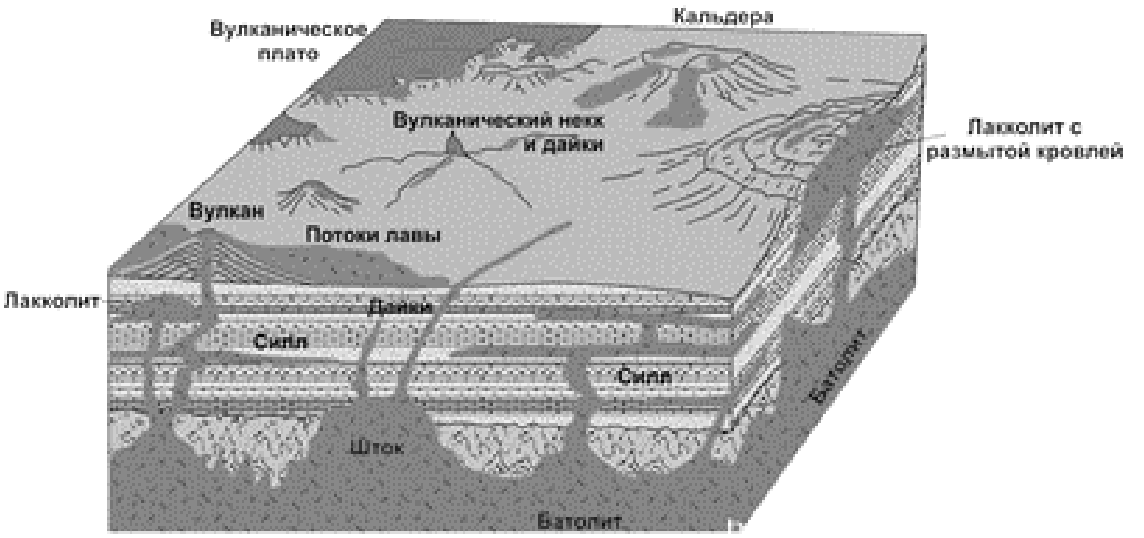


Рис. 1. Модель эволюции чехла СП в докембрии и фанерозое в процессе циклов ТМА, сопровождавшихся кимберлитовым и трапповым магматизмом корневого типа – внедрением мантийных расплавов в платформенный чехол [Страхов, 1978; Одинцов, 1972; Фон-дер Флаас, 2000; Абрамович, 2014; Вахромеев и др., 2023].

Пост-магматический этап. Пост-трапповый высокотемпературный (400–800 °С) гидротермальный этап ТМА - связан с гидротермальными образованиями в виде месторождений и проявлений.

Изучение распределений щелочных элементов в долеритовых силлах на юге СП показало, что при одинаковых содержаниях рубидия и натрия концентрация лития в траппах, прорванных трубками взрыва на порядок выше его содержаний в траппах, не прорванных (трубками взрыва) [Феоктистов, Нетесова, 1980] (Табл. 1). Обогащение рассолов литием происходит за счет ионообменного взаимодействия с минералами пород, при этом кальций, как преобладающий элемент, переходит в сами минералы, а в рассол из пород переходят катионы, в том числе литий, рубидий, цезий и другие.

Таблица 1. Распределение содержаний щелочных элементов в траппах юга Сибирской платформы (Na, K – вес. %, Rb, Li, Cs – г/т), [Феоктистов, Нетесова, 1980]

Трапповые тела		К-во анализов	Na	K	Rb	Li	Cs	K/Rb
Траппы из трубок взрыва	Нерюндинская скв. 86	15	0.09–2.00 0.88	0.04–0.64 0.33	1–12 6.7	46–390 164.9	0.4–3.0 1.7	300–800 493
	Нерюндинская скв. 94	20	0.55–2.07 1.19	0.10–2.64 0.88	3–28 13.0	41–381 136.6	0.4–3.0 2.3	133–1320 677
Дайки Коршуновской и Краснояровской трубок взрыва		9	0.21–2.02 0.96	0.58–4.40 2.34	6–35 22.9	75–375 195.4	0.4–2.0 0.9	474–1760 1021
Глубокие горизонты Капаевской трубки взрыва (скв. 24)		10	0.14–1.66 0.61	0.96–4.90 3.24	12–42 29.8	37–800 451.7	0.9–1.1 1.0	356–1407 1086

Примечание: В числителе – предельные значения, в знаменателе – средние содержания элементов.

Параллельно с процессом формирования и миграции рассолов с высокими концентрациями ЩЗМ, происходило перераспределение УВ не только к периферии пластовых интрузий, но и за их пределы. Об этом свидетельствует положение целого ряда месторождений (Марковское, Ковыктинское) вблизи границы Усольского силла.

Об увеличении концентрации нафтидов у границы рассматриваемого силла говорит ее прослеживаемость вдоль осевой зоны крупной битумной аномалии на расстояние около 200 км от Кийской площади в сторону Верхнечонского месторождения. Широкое развитие эпигенетических процессов (окремнение, кальцитизация, сульфатизация) в пределах битумной аномалии, свидетельствующих о существовании периода гидротермальной активности, указывает на высокую вероятность связи этой аномалии с трапповым магматизмом.

Все месторождения, расположенные внутри поля интрузии (Дулисьминское, Братское, Оморинское) тяготеют к участкам отчетливого уменьшения ее мощности и, следовательно, интенсивности динамического воздействия на осадочный чехол (Мигурский, 2010).

Возможности и ограничения TOUGH2-EWASG моделирование предельно насыщенных рассолов

При анализе уравнения состояния хлоридов натрия, кальция и магния в предельно насыщенном рассоле необходимо учитывать следующее. Наиболее растворимым в температурном интервале [0, 100 oC] является хлорид кальция, он доминирует в составе рассолов. Анализ растворимости в бинарных системах H_2O – хлорид, показывает (рис. 2 а), что по верхней кривой будет идти растворение солей из смеси трех хлоридов, в первую очередь из смеси солей будет вымываться хлорид кальция. Если хлорида кальция в смеси нет, то из смеси твердых солей в температурном интервале ~60–100 oC будет вымываться хлорид магния, при более низкой температуре вымываться из смеси будет преимущественно хлорид натрия. В диапазоне ~60–100^oC будет кристаллизоваться преимущественно хлорид натрия, при более низких температурах будет кристаллизоваться хлорид магния, минералы галит и бишофит соответственно (рис. 2). Если по хлориду натрия раствор ненасыщенный, то во всем температурном интервале будет кристаллизоваться бишофит. Кристаллизация хлорида кальция в виде шестиводного гидрата $CaCl_2*6H_2O$ может произойти лишь при температурах около 10^oC или ниже. Это легкоплавкий минерал, он плавится в собственной кристаллизационной воде при температуре около 30^oC. Плавится он по перитектоидному равновесию с выделением рассола и переходом в менее обводненную форму. Шестиводный хлорид магния бишофит плавится при температуре чуть выше 100^oC, по перитектике, постепенно переходя в менее гидратированные формы. Плотность и вязкость раствора $CaCl_2$ (40%) близки к соответствующим свойствам насыщенных растворов NaCl, что позволяет в качестве начального модельного приближения уравнения состояния флюида рассматривать модуль состояния программного комплекса TOUGH2-EWASG [Battistelli et al, 1997].

TOUGH2-EWASG моделирование циклического режима извлечения рассола из рапа-силловой формации

Собрана R-Z модель (N=100), изображенная на рис. 2 б, с использованием модуля состояния EWASG. Исходные ФЕС продуктивного резервуара соответствуют Знаменской площади (глубина 2 км, мощность 2.5 м, пористость 0.25, проницаемость 1 Д, начальное давление 450 бар, температура 32^oC, массовая доля CH_4=3E^{-5}, массовая доля растворенной соли 0.3. При моделировании заданы следующие условия: время эксплуатации 1 год, режим эксплуатации – циклический (закачка в течение 1 сут. пресной воды с расходом 9.3 кг/с и температурой 100^oC / откачка рассола с расходом 9.3 кг/с в течение 1 сут и т.д. в течение 1 года), максимальный расход откачки/закачки определялся из условия не допущения кристаллизации. В результате моделирования показана возможность устойчивой эксплуатации в циклическом режиме и суммарного извлечения 8437 тонн хлоридных солей за 1 год эксплуатации. Объем извлечения редких металлов оценен пересчетом.

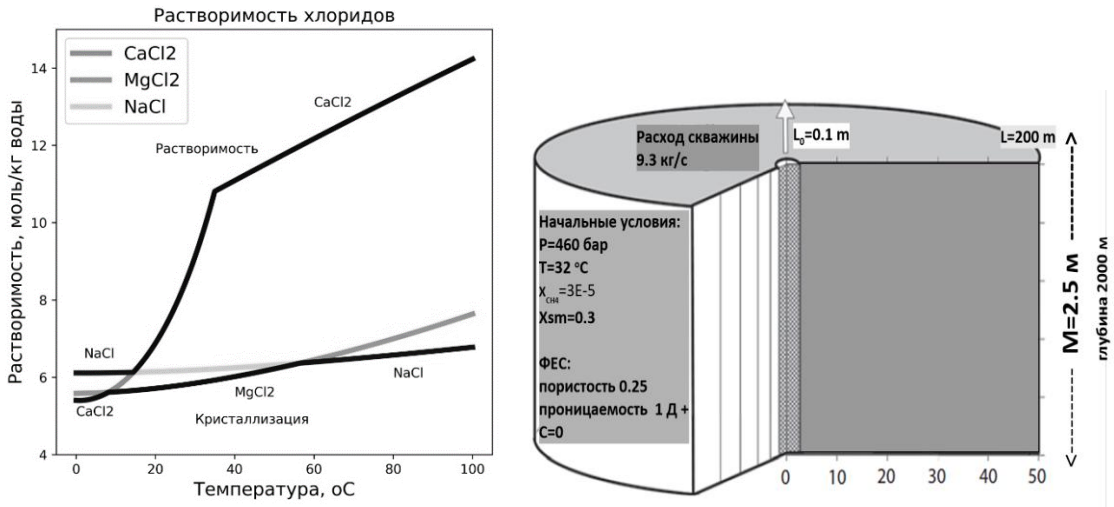


Рис. 2. Моделирование: а) Растворимость и кристаллизация хлоридов натрия, кальция, магния в зависимости от температуры, бинарные системы; б) Исходные данные для моделирования эксплуатации рапа-силла

Заключение

1. Формирование залежей предельно насыщенных рассолов с повышенными концентрациями ЩЗМ на юге СП является результатом длительного химического взаимодействия рассолов с силикатными породами, щелочными интрузиями фундамента. А также многостадийной магматической и постмагматической деятельности в галогенно-карбонатной формации солеродного кембрийского чехла бассейна, включающей выкипание жидкой фазы при термическом воздействии (приводящей к концентрированию рассолов), импульсное обогащение мантийным литием, смешение с гидротермальными флюидами глубоких магматических очагов

2. Формирование субпластовых залежей предельно насыщенных рассолов, обогащенных литием и др. ЩЗМ в карбонатных и терригенно-карбонатных комплексах нижнего палеозоя юга Сибирской платформы может являться результатом постмагматического транспорта «исходных» рассолов. Сформированные на гигантской территории осадочного чехла новые монолитные флюидоупоры (на примере Усольского силла, привели к резкому росту пластовых давлений циркулировавших рассолоносных систем под силлом, к локализации рассолопотока и потока гидротерм в области разрушенных эксплозией субвертикальных рудных колонн, и субгоризонтальных трещинных систем природного магморазрывагидроразрыва. В последующих мезо-кайнозойских этапах ТМА, процессы перетока и концентрирования рассолов приводили к аккумуляции рапы в субгоризонтальных системах трещин гидроразрыва на уровнях флюидного давления, превышающего вертикальный стресс (рапа-силлы). Агентом гидроразрыва могла являться углеводородная фаза (метан или нефть), при условии их парагенетической связи с исходными залежами редкометальных рассолов

3. Одним из возможных инструментов исследования условий формирования и эксплуатации рапа-силлов является TOUGH2-EWASG моделирование, но для его обоснованного применения нужна дополнительная модификация модуля состояния флюида. В качестве начальной тестовой задачи выполнено моделирование технологии извлечения рапы с циклической закачкой горячей воды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда «Исследования магмо-газо-водопроводящих систем активных вулканов» № 23-27-00127 (https://rscf.ru/project/23-27-00127/).

Список литературы

1. Абрамович Г.Я. Плюмовые магматогенно-рудные системы юга Восточной Сибири / Г.Я. Абрамович, М.И. Кузьмин, В.В. Ярмолюк // Геология и полезные ископаемые юга Восточной Сибири. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. Вып. 3. С. 18–24.

2. Алексеев С.В. Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация / С.В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, Н.П. Коцупало, А.Д. Рябцев. Иркутск: Изд-во ООО «Географ». 2014. 162 с.

3. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы (по данным глубокого бурения, испытания скважин и полевой геофизики) / А.Г. Вахромеев. Иркутск: Изд-во ИрНИТУ, 2015. 248 с.

4. Вахромеев А.Г. Зелинская Е.В., Литвинова И.В., Погребная Д.А. Модель вторичного концентрирования литиеносных рассолов в кипящих флюидных системах магматогенно-осадочных бассейнов гидроминеральной провинции Сибирской платформы // Мат-лы Всерос. Науч. Конф. с межд. уч. «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2023). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. с. 15–20.

5 Вожов В.И. Подземные воды и гидроминеральное сырье Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2006. – 209 с

6. Геология месторождений редких элементов. Вып. 12-13. Щелочные интрузии, их размещение и связанная с ними минерализация / Ю.М. Шейнманн, Ф.Р. Апельцин, Е.А. Нечаева// Госгеолтехиздат, М., 1961. 178 с.

7. Зелинская Е.В. Теоретические основы изучения и рационального использования подземных рассолов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2002. 98 с.

8. Кирюхин В.А. Региональная гидрогеология. С-Петербург, СПГГИ, 2005, с. 344.

9. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с

10. Литвинова И.В. Гидрогеологические критерии нефтегазоносности Курейской синеклизы: дис. … канд. геол. мин. наук: 25.00.07. – ТИУ, Тюмень, 2020.

11. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии//М.: Химия. 1989. С. 448

12. Зайцев И.Д., Асеев Г.Г. Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных растворов неорганических веществ // М.: Химия. 1988. с. 416.

13. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна /Е.В. Пиннекер. М.: Наука, 1966. 322 с.

14. Мигурский А.В. Масштабные латеральные перемещения пород и флюидов на Сибирской платформе / А.В. Мигурский // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2010. № 1. с. 53–57.

15. Одинцов М.М. Ангаро-Вилюйский рудный пояс Сибирской платформы / М.М. Одинцов, В.Г. Домышев, Л.Г. Страхов и др. Новосибирск: Наука, 1980. 110 с.

16. Основы гидрогеологии. Гидрогеохимия. – Новосибирск: Наука, 1982. 286 с.

17. Сурнин А.И. Гидротермальный этап в формировании гидродинамической системы осадочного чехла Сибирской платформы / А.И. Сурнин, И.В. Литвинова, Н.А. Иванова // Мат-лы Всерос. Науч. Конф. с межд. Уч. «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2020). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 151–154.

18. Страхов Л.Г. Рудоносные вулканические аппараты юга Сибирской платформы / Л.Г. Страхов. Новосибирск: Наука, 1978. 120 с.

19. Феоктистов Г.Д. Распределение щелочных элементов в траппах Сибирской платформы / Г.Д. Феоктистов, Г. Е. Нетесова // Геохимия. 1980. № 7. С. 1031–1039.

20. Фон-дер Флаас Г.С., Никулин В.И. Атлас структур рудных полей железорудных месторождений. - Иркутск: Изд-во Иркут. Ун-та, 2000.- 192 с.

21. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: [монография]: в 5 т. / [В. А. Алексеев и др.]; отв. ред. С. Л. Шварцев; Объед. ин-т геологии, геофизики и минералогии им. А. А. Трофимука СО РАН [и др.]. - Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2005-. - 30 см.; ISBN 5-7692-0792-2. ... Т. 1: Система вода-порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование. Т. 1. - 2005. - 243 с.

22. Alexeev S.V. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects / S.V. Alexeev, L.P. Alexeeva, A.G. Vakhromeev // Applied Geochemistry. 2020. 117(6).

23. Battistelli, A., Calore, C., Pruess, K., 1997. The simulator TOUGH2/EWASG for modeling geothermal reservoirs with brines and non-condensible gas. Geothermics Vol. 26 (No. 4), 437–464.

ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕСУРСНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ООН К ПОДЗЕМНЫМ ВОДАМ

Виноград Н.А.
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, n.vinograd@spbu.ru

Аннотация. В 2019 году была создана рабочая группа по разработке принципов применения рамочной классификации ресурсов ООН (РК ООН) к подземным водам. Первая редакция Дополнительных спецификаций по подземным водам РК ООН вышла в 2021 году. Документ затем был исправлен и дополнен по поступившим замечаниям. В ноябре 2023 года была выпущена и представлена на широкое обсуждение вторая редакция документа. К настоящему времени поступило около 40 отзывов, замечаний и предложений от гидрогеологов, специалистов по управлению ресурсами и охране подземных вод, экспертов. В статье рассматриваются наиболее важные проблемы применения РК ООН к подземным водам, затронутые в отзывах и замечаниях, и пути их решения.

Ключевые слова: *подземные воды, РК ООН, дополнительная спецификация.*

Abstract. A working group for the development of principles for the application of the United Nations Framework Classification for resources (UNFC) on groundwater was established in 2019. The first edition of the Supplemental Groundwater Specifications published in 2021, was then corrected and supplemented according to the comments received. In November 2023, the second edition of the document was released and presented for wide discussion. To date, more than 40 reviews, comments and suggestions have been received from hydrogeologists, specialists in resource management and groundwater protection, and experts. The article discusses the most important problems of applying the UNFC to groundwater, raised in the reviews and comments, and ways to solve them.

Keywords: *groundwater, UNFC, supplemental specification.*

В 2019 году была создана рабочая группа по разработке принципов применения рамочной классификации ООН (РК ООН) к подземным водам. От Российской Федерации в нее вошли Н.А. Виноград и А.В. Тудвачев. Цель создания группы – рассмотреть возможность применения РК ООН для подземных вод и разработать соответствующий документ.

Цель Дополнительных спецификаций по подземным водам состоит в том, чтобы предоставить гидрогеологам дополнительные технические рекомендации о том, как применять РК ООН к проектам, связанным с ресурсами подземных вод. В конце 2020 г. завершилась работа по созданию первой редакции документа. В январе 2021 г. Дополнительные спецификации по подземным водам к РК ООН были переданы на экспертизу в Техническую консультативную группу Экспертной группы по ресурсному менеджменту (TAG EGRM) и получили положительное заключение, были рекомендованы незначительные редакционные поправки, которые внесены в документ [2]. Окончательный вариант был переведен на официальные языки ООН и представлен на сессию EGRM 2021 г. В настоящее время с этим документом на русском языке можно ознакомиться на официальном сайте ООН [3].

Первая редакция документа обсуждалась экспертным сообществом, в том числе на сессиях EGRM. Ряд существенных замечаний высказали и российские эксперты. В первоначальных планах рабочей группы было создание и представление примеров передовой практики применения РКООН к ресурсам подземных вод (case studies) с использованием Дополнительных спецификаций [1]. Однако, когда началась работа над второй редакцией документа, оказалось, что предстоит довольно существенно изменить и дополнить его. Таким образом, группа сосредоточилась на работе над второй редакцией Дополнительных спецификаций с учетом всех поступивших замечаний и предложений.

Вторая редакция Дополнительных спецификаций по подземным водам вышла в свет в ноябре 2023 г. в виде предварительного документа для публичных комментариев и была опубликована на сайте ООН на английском языке [4]. В связи с тем, что

комментарии принимались только до 15 января 2024 г., перевода на официальные языки ООН сделано не было.

Документ состоит из нескольких разделов. Во введении дается определение подземных вод, обосновывается необходимость применения РК ООН к подземным водам и Дополнительной спецификации. Отдельно подчеркивается, что из 169 целей, перечисленных в документе «Цели в области устойчивого развития (ЦУР). Повестка дня на период до 2030 года», разработанном Генеральной ассамблеей ООН, 53 цели непосредственно связаны с подземными водами, но упоминаются подземные воды только один раз. Иными словами, роль подземных вод в достижении целей устойчивого развития недооценена.

Нововведением в Дополнительных спецификациях по подземным водам является включение новой подкатегории проектов и связанных с ними объемов, называемых «социально необходимыми». РК ООН традиционно ориентирована на классификацию минеральных и энергетических проектов с точки зрения коммерческого использования. Подземные воды существенно отличаются от твердых полезных ископаемых, нефтяных и энергетических ресурсов тем, что представляют собой «ресурсы общего пользования», доступ к которым могут получить все. Доступ к подземным водам может рассматриваться и через призму прав человека, затрагивать исторические традиции, права коренных народов, права собственности и водное право. Кроме того, при оценке проектов по подземным водам следует учитывать важную роль подземных вод в глобальном круговороте воды и экологическом состоянии природной среды.

Раздел «Сфера применения» определяет функциональные требования для проектов по подземным водам в соответствии с РК ООН, включая категоризацию, классификацию и агрегирование проектов. Очень важно, что дифференцируются понятия «источника» и «продукта» подземных вод.

Далее изложена общая схема классификации проектов по осям E, F и G (соответственно, экологическая, социальная и экономическая жизнеспособность; техническая осуществимость и зрелость; степень уверенности в возможности получения подземных вод) (рис. 1).

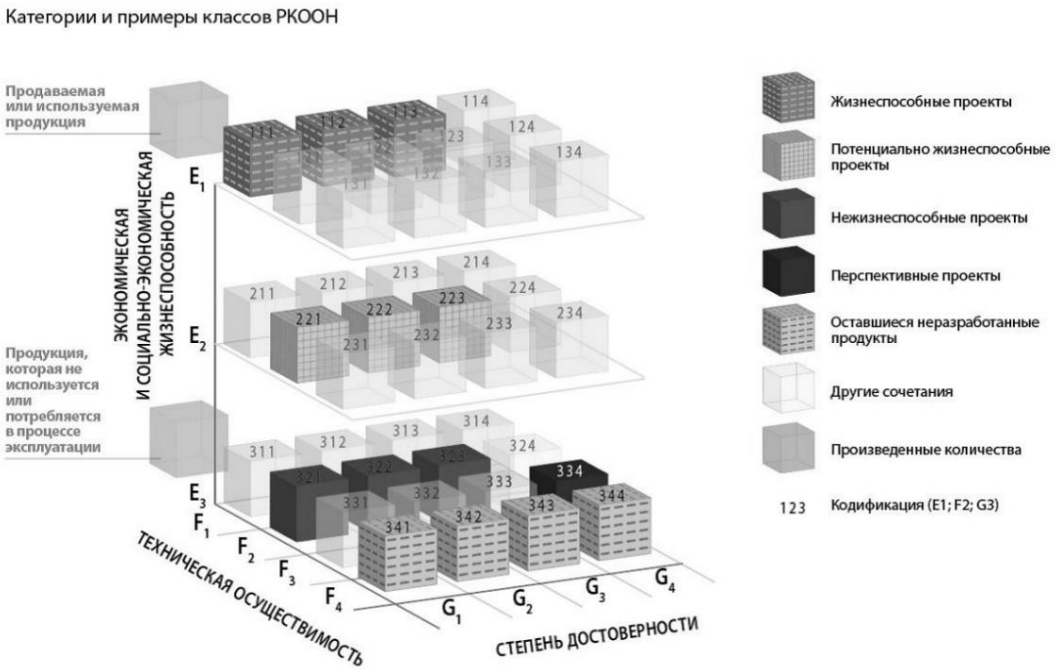


Рис. 1. Трехмерное представление осей, категорий и классов РКООН [3]

Выделены рекомендованные классы проектов по подземным водам – жизнеспособные E.A.1/E.B.1/E.A.1.1/E.A.1.2-F1-G1+G2; потенциально жизнеспособные E.A.2/E.B.2-F2-G1+G2; перспективные E.A.3/E.B.3/F3-G4; нежизнеспособные E.B.3.1-F1-G1+G2; подземные воды, которые не будут использоваться E.B.3.1-F1-G1+G2.

Вопрос агрегирования величин, по мнению автора, является наиболее сложным в применении РК ООН к подземным водам. Это обусловлено как двойственностью возобновляемых/невозобновляемых ресурсов подземных вод, так и взаимосвязью подземных и поверхностных вод. Кроме того, системы учета количеств подземных вод и других полезных ископаемых принципиально различны. При агрегировании рекомендуется учитывать оценки по оси оценки по оси G, а также соглашения по трансграничным водам.

Первоначально предполагалось доработать документ с учетом комментариев и представить окончательный вариант на сессию EGRM в апреле 2024 г. Однако впоследствии количество и содержание полученных комментариев показало, что доработка Дополнительных спецификаций к концу марта 2024 г. выглядит не реалистичной, и необходимо разработать промежуточный документ, разъясняющий характер применения РК ООН к подземным водам и отвечающий на основные вопросы, поставленные в комментариях, - «дорожную карту». На встрече председателя рабочей группы Петера ван дер Кера с секретариатом Европейской экономической комиссии ООН, где обсуждались полученные комментарии, было подчеркнуто, что возникшие проблемы необходимо решать таким образом, чтобы созданный документ имел максимально широкую базу поддержки гидрогеологическим сообществом, другими подразделениями и программами ООН, и только тогда можно продолжить процесс дальнейшей доработки и создание case studies. В ядро рабочей группы по созданию «дорожной карты» вошли П. ван дер Кер (Дания, председатель), Н.А. Виноград (Россия) М. Ворса-Козак (Польша), Х. Кетзее (ЮАР), Л. Мартарелли (Италия), Д. Паломби (Канада), М. Петитта (Италия), Д. Ченсизбаев (Казахстан). Планируется также привлечь к диалогу авторов наиболее значимых комментариев. «Дорожная карта» должна быть создана в короткие сроки (до конца марта 2024 г.) и представлена на бюро 25 марта, а в случае одобрения – на сессию EGRM в апреле 2024 г. На втором этапе планируется на основании данного документа переработать Дополнительные спецификации по подземным водам РК ООН и представить к сессии EGRM 2025 г. Для более эффективного выполнения этой задачи необходима организация нескольких конференций и круглых столов по тематике применения РК ООН к подземным водам, создание сети в рамках Международной ассоциации гидрогеологов.

К 15 января 2024 г. было получено около 40 комментариев ко второй редакции Дополнительных спецификаций по подземным водам к РК ООН. Отзывы поступили как от имени отдельных специалистов, так и от организаций и экспертных сообществ, в том числе других подразделений ООН.

Большинство отзывов носит конструктивный характер, содержит предложения по совершенствованию текста документа и методов оценки проектов по подземным водам. Однако есть и откровенно негативные комментарии, где авторы призывают прекратить работу над документом и распустить рабочую группу.

В целом можно отметить, что в комментариях повторяется несколько основных замечаний и предложений, требующих корректировки текста Дополнительных спецификаций:

1. Необходимость создания Дополнительных спецификаций по подземным водам к РКООН.

В ряде комментариев высказано мнение о нецелесообразности применения РК ООН к подземным водам, однако рамочная классификация ресурсов ООН в настоящее время применяется к большинству видов природных ресурсов. Это позволяет осуществлять согласование ресурсных проектов, унифицированную оценку их

эффективности на международном уровне, а также унифицировать отчетность о количестве ресурсов [4]. Именно необходимость адаптации РК ООН к подземным водам привела к созданию в 2019 г. нашей рабочей группы.

2. Целевая группа.

В Дополнительных спецификациях по подземным водам подчеркнуто, что их целевая аудитория – менеджеры по ресурсам и специалисты по подземным водам, которые обладают соответствующим уровнем знаний и опытом в реализации проектов по подземным водам и оценке их количества и качества. В «дорожной карте» планируется дополнительно разъяснить, на какие целевые группы рассчитана РК ООН применительно к подземным водам.

3. Определение подземных вод.

Во многих комментариях отмечается, что предложенное определение является упрощенным, неясным и неточным, отсутствуют необходимые ссылки. С таким мнением можно отчасти согласиться. В других комментариях, напротив, отмечалось, что определение является довольно сложным и его следует упростить. Авторы не стремились дать научное определение подземных вод, учитывая, что документ рассчитан не только на гидрогеологов, но и на гораздо более широкий круг экспертов.

4. Трансграничные водоносные горизонты.

Отмечается, что необходимо выделить и охарактеризовать практику использования трансграничных ресурсов подземных вод, предусмотреть порядок обмена данными между странами, эксплуатирующими трансграничный водоносный горизонт; привести документ в соответствие с текущей практикой использования трансграничных водосборов на законодательном и управленческом уровне.

5. Определение глубоких и неглубоких подземных вод.

В комментариях отмечается неточность и некоторая ошибочность определения глубоких и неглубоких подземных вод, с чем можно согласиться. Потребуется переработка этих определений.

6. Подземные воды как товар, их социальная значимость, права человека на воду.

Этот вопрос является одним из самых дискуссионных. Авторы комментариев в основном не согласны с концепцией РК ООН и отмечают, что подземные воды не является товаром. Однако следует заметить, что РК ООН касается проектов, а не непосредственно ресурсов, а проект имеет определенную стоимость. Подземные воды действительно являются общественным достоянием, но даже если условный водозабор является некоммерческим социально значимым проектом, его строительство и эксплуатация потребуют затрат со стороны государства, либо муниципалитета, соответственно, продукция (в данном случае питьевая вода) будет иметь цену, зависящую от качества подземных вод и целей их использования. По мнению автора, в Дополнительных спецификациях этот вопрос достаточно проработан, подробно обсуждается разница понятий «источник» и «продукт» подземных вод. В комментариях также отмечается, что неясно изложен вопрос, что такое «добавленная стоимость» применительно к проектам по подземным водам

7. Оценки по осям E, F, G.

В «Дополнительных спецификациях по ресурсам подземных вод» к РК ООН, подготовленных Рабочей группой по подземным водам при активном участии российских экспертов, в большой степени использованы принципы классификации подземных вод, принятые в России. В связи с этим по большинству позиций принцип перехода от отечественных классификаций к РК ООН понятен. Вместе с тем, в РК ООН имеются позиции, не учитываемые отечественными классификациями, например, социальная значимость проекта. Однако предложенные в Дополнительных спецификациях принципы оценки по категории E позволяют применить РК ООН к подземным водам.

По мнению авторов ряда комментариев, в том числе полученных из ГКЗ РФ, наиболее существенным положительным изменением стало подразделение категории E на подкатегории E.A и E.B, что позволило различать группы возобновляемых и невозобновляемых ресурсов подземных вод, а также выделять добычу попутных и дренажных вод. С целесообразностью выделения этих подкатегорий, безусловно, можно согласиться.

Наибольшие сложности вызывает предложенный метод оценки по оси G – степень достоверности в осуществимости проектов в области подземных вод. В Дополнительных спецификациях по подземным водам определения и оценки категорий по оси G используются для отражения степени уверенности в осуществимости проекта, измеряемой по трем нижеследующим параметрам: общему объему, выходу продукции или темпам добычи и химическому качеству. Вместе с тем, в понятие достоверности входят и степень изученности месторождения, и коммерческий потенциал, и вероятность ухудшения химического состава воды в результате стихийных бедствий, изменения климата и т.д., что является совершенно разными факторами. При этом рекомендовано проекты с высокой степенью достоверности относить к категории G1+G2, перспективные проекты независимо от осуществимости – к категории G4, а применение оценок G1 и G1+G2+G3 не рекомендовано. Получается, что ось G для классификации практически не используется. Такой подход представляется нелогичным, с чем соглашаются эксперты из Казахстана и Украины, использующие те же принципы классификации. По мнению российских экспертов, логичнее было бы четко разделять геолого-гидрогеологические, добычные и технические параметры осуществимости проекта, оставляя в категории G геолого-гидрогеологические параметры. Все технические условия было бы целесообразно перенести в категорию F.

Отечественные эксперты отмечают, что потребуется отдельный связующий документ, разъясняющий применение РК ООН к подземным водам в России. Предлагаемые подходы к его созданию уже предложены российскими членами рабочей группы. В комментариях экспертов из Казахстана также отмечается необходимость создания связующего документа.

Вопрос применения РК ООН к подземным водам остается дискуссионным по настоящее время. «Дорожная карта», содержащая необходимые разъяснения и ответы на комментарии, должна снять вопросы о целесообразности использования РК ООН для проектов в области подземных вод. Члены рабочей группы надеются, что окончательный вариант Дополнительных спецификаций по подземным водам к РК ООН будет принят международным экспертным сообществом и будет способствовать решению задачи унификации социально-экономической, экологической и технической оценок проектов по подземным водам.

Список литературы

1. Виноград, Н. А. Особенности применения рамочной классификации ресурсов ООН к подземным водам / Н. А. Виноград // Подземная гидросфера: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием, Иркутск, 20–26 июня 2021 года. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. – С. 21-25. – DOI 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-21-25. – EDN UCQZSH.

2. Виноград, Н.А. Результаты деятельности рабочей группы по подземным водам Группы экспертов по управлению ресурсами Европейской экономической комиссии ООН. в: Недропользование. XXI век. 2020; No 1(83). стр. 20-23.

3. Проект Рамочной классификации ресурсов Организации Объединенных Наций. Дополнительные спецификации по ресурсам подземных вод. ECE/ENERGY/GE.3/2021/12 https://unece.org/sites/default/files/2021-03/ECE_ENERGY_GE.3_2021_12R.pdf Дата обращения - 01.03.2024.

4. Draft United Nations Framework Classification for Resources. Supplemental Groundwater Specifications. Draft for Public Comment. UNECE, Nov 2023. - https://unece.org/sites/default/files/2023-11/UNFC-SupplementalSpecs-GroundwaterResources-public-comments.pdf Дата обращения - 01.03.2024.

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СНИМКОВ В КАРТИРОВАНИИ НАЛЕДЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Гагарин Л.А., Николаева Е.С., Баишев Н.Е.
ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, gagarinleo@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены новые подходы к картированию наледей с применением разностного снежного индекса NDSI на основе снимков Sentinel-2 и неполно поляризационных радиолокационных снимков Sentinel-1. С помощью поляриметрического разложения радиосигнала и использования неконтролируемой классификации выделены контуры наледей в мае 2018¬2022 гг., рассчитана их площадь. По предварительным данным лишь 10% всех наледей имели расхождение значений их площадей менее 10%. Они расположены в долинах рек, в которых границы наледной поляны совпадают с поймой, а ширина их составляет не менее 100 м. Отраженный радиосигнал на таких объектах характеризуется объемным рассеянием с умеренной или высокой энтропией.

Ключевые слова: *Радиолокационный снимок, поляриметрическое разложение радиосигнала, наледь, нормализованный разностный снежный индекс, Чульманское плато.*

Annotation. The article discusses new approaches to icing mapping using NDSI based on Sentinel-2 images and SAR images of Sentinel-1 mission. Using the polarimetric decomposition of the SAR signal and the use of uncontrolled classification, the contours of the icing in May 2018-2022 were identified and their areal extent was calculated. According to preliminary data, only 10% of all icings had a discrepancy in the values of their areal extent of less than 10%. They are located in river valleys, in which the boundaries of the icing field coincide with the floodplain, and their width is at least 100 m. The SAR signal on such objects is characterized by volumetric scattering with moderate or high entropy.

Key words: *SAR, polarimetric decomposition, icing, NDSI, The Chulmanskoye Plateau*

В последнее десятилетие в мировой литературе отмечается тенденция в изучении наледей на региональном уровне [Makarieva и др. 2019; Morse и Wolfe 2014; Brombierstäudl, Schmidt, и Nüsser 2021; Gagarin и др. 2022]. Эти работы направлены на выявление закономерностей развития и распространения наледей на различных континентах и природно-территориальных комплексах. В рамках текущего исследования опробована методика идентификации и картирования наледей по данным радиолокационных снимков Sentinel-1.

В работе применялись два способа определения местоположения наледей: первый – расчет разностного снежного индекса – NDSI [Makarieva и др. 2019; Brombierstäudl, Schmidt, и Nüsser 2021], второй – с помощью поляриметрического разложения радиосигнала на основе радарных космоснимков.

Для расчета NDSI были использованы снимки Sentinel-2 уровня обработки Level-2A, имеющего атмосферную корректировку. Всего было использовано 5 снимков с датой съемки май 2018–2022. Одним из требований к выбору снимка являлось частичное или полное отсутствие снежного покрова, чтобы выделяемые нами наледные объекты контрастировали на фоне окружающего ландшафта. Для расчета индекса использовались каналы B3 и B11, зеленый и ближний инфракрасный соответственно. NDSI рассчитывался по формуле:

$$\mathrm{NDSI} = \frac{(\mathrm{Green} - \mathrm{SWIR})}{(\mathrm{Green} + \mathrm{SWIR})} = \frac{(\mathrm{B3} - \mathrm{B11})}{(\mathrm{B3} + \mathrm{B11})}$$

Пороговое его значение, позволяющее оконтуривать наледи, составило более 0.4. Далее проводилась фильтрация полученного растра путем применения маски, которая представляет собой буферную зону шириной до 200 м, заданную на основе речной сети, т.к. картируемые нами наледи расположены в долинах рек. Речная сеть рассчитывалась в программе QGIS v.3.16 по данным рельефа SRTM с разрешением 30 м. Итоговый растр с наледями векторизовался, а полученные части полигонов, принадлежащих одной наледи, объединялись и высчитывалась итоговая ее площадь.

В качестве исходных данных вторым способом использованы радарные

изображения спутников Sentinel-1. Для поляриметрического разложения радиосигнала применены неполно поляризационные снимки уровня обработки Level-1 Single Look Complex (SLC). Они имеют перекрестную (VH) и согласованную (VV) поляризации, снятые в режиме съемки Interferometric wide swath mode (IW). Этот выбор объясняется наличием информации о фазе радиосигнала, необходимой для анализа (разложения приходящего радиосигнала на составляющие). В исследовании использовано 16 снимков с датой съемки май 2018–2022 гг. В этот период года наледи имеют максимальные размеры, и они отображаются контрастно с окружающими ландшафтами из-за растаявшего снежного покрова.

Первичная обработка радарных снимков проведена по следующему алгоритму: уточнение параметров орбиты – радиометрическая калибровка – склеивание отдельных полос съемки – обрезка полученного снимка по полигону (при необходимости) – преобразование пикселя изображения из наклонного в наземный диапазон (Multilooking) – создание поляриметрической матрицы ковариации и когерентности для неполно поляризационного снимка (C2) – фильтрация спекл-шума - поправка на рельеф - разложение радиосигнала по параметрам H/α – неконтролируемая классификация Уишарта по параметрам H/α для неполно поляризационного снимка. Полученная классификация отраженного радиосигнала экспортировалась в tiff-файл для последующего его анализа в QGIS v.3.16.

В основе классификационной схемы (рис. 1) лежат такие параметры, как H и α. Первый характеризует энтропию возвращенного к радару радиосигнала, второй – угол его наклона, описывающий механизм рассеяния. На рисунке 1 показаны девять классифицируемых зон. Наледи в момент их таяния (май) представляют собой увлажненные поверхности с неровным микрорельефом из-за включения неоднородностей и неравномерности стаивания. Поэтому на радарных снимках от подобных объектов происходит зеркальное отражение и объемное рассеивание радиосигнала соответственно, реже двойное переотражение радиосигнала. На классификационной схеме (рис. 1) это 6, 9, 5, 8, и 4 зоны соответственно.

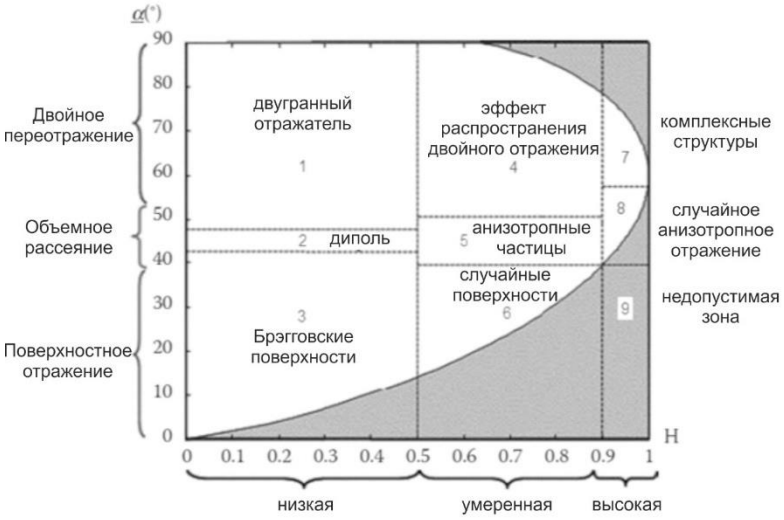


Рис. 1 Классификационная схема поляриметрического разложения радарного сигнала снимка Sentinel-1

В программе QGIS v. 3.16 ранее экспортируемый классифицированный tiff-файл обрабатывается следующим образом. Не применяемые в исследовании зоны классификации 1–4,7 удаляются, а к 4,5, 8, 6 и 9 применяется маска, представляющая собой буферную зону шириной до 200 м, заданную на основе речной сети. Таким

образом, мы отфильтровываем отличные от наледей объекты, имеющие аналогичную схему отражения радиосигнала. В конечном итоге пиксели каждой наледи объединяются в группы и для них рассчитывается площадь полигона.

После расчета площадей наледей обоими способами проведено их сравнение между собой. Вычислено расхождение между полученными величинами.

При дешифрировании наледей с помощью РЛ снимков возможны несколько механизмов отражения радиосигнала во время их весеннего таяния. Первый (рис. 2 а) обнаруживается в начале весеннего потепления (в нашем случае конец апреля – начало мая), когда средняя суточная температура воздуха еще имеет отрицательное значение, но в дневное время солнечная инсоляция приводит к таянию снежного покрова. В этот период времени наледь представляет собой ледяное тело с неровным микро- и мезорельефом, с отдельными участками излившихся на ее поверхность наледеобразующих вод. От подобных объектов происходит преимущественно объемное рассеяние радиосигнала, что соответствует 8, реже 5 зонам классификации его поляриметрического разложения с высокой и умеренной энтропией соответственно (рис. 1). Сложнее интерпретируются участки с наледью, где ее мощность невелика, и из-под нее оголяется древесная и кустарниковая растительность. Увлажненная поверхность и многочисленные ветви растений создают эффект двойного переотражения радиосигнала, обозначенный в зоне 4 классификации при поляриметрическом его разложении (рис. 1). Также осложняют интерпретацию радиолокационных снимков склоны, покрытые растительностью и увлажненные. На них создаются такие же эффекты отражения сигнала.

Второй тип отраженного радиосигнала (рис. 2 б-г) наблюдается во время активного весеннего таяния снега и начала половодья на реках (середина–конец мая). Наледь, как правило, находится в активной фазе деградации. Ее поверхность либо увлажнена (слои воды в трещинах или ее пленки на наледной поверхности), либо вовсе покрыта слоем воды (локальные озерки, участки руслового стока). При поляриметрическом разложении радиосигнала от таких объектов происходит зеркальное его отражение с умеренной или высокой энтропией, что соответствует зонам 6 и 9 классификации (рис. 1).

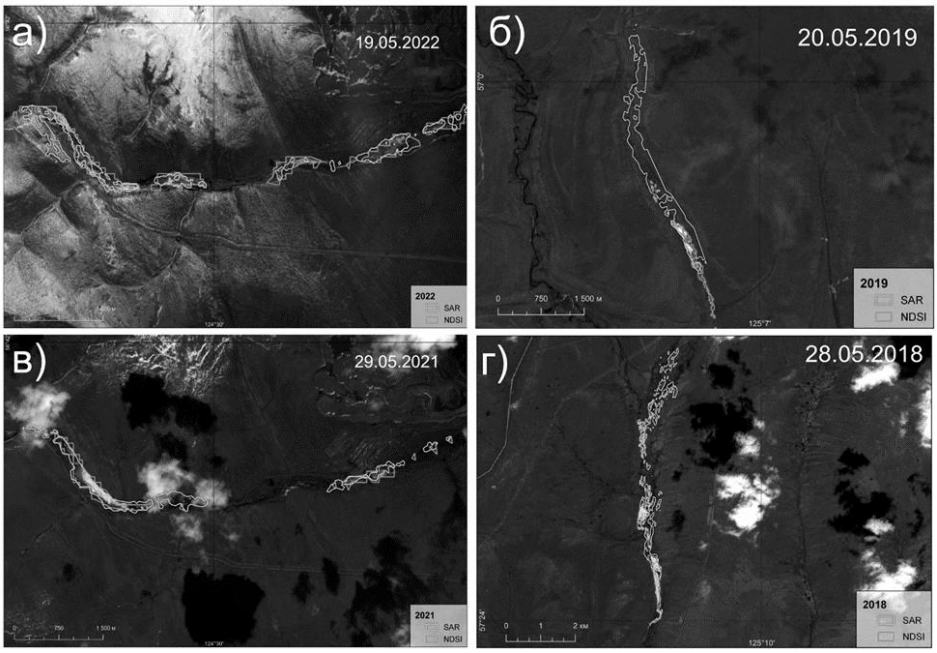


Рис. 2 Мультиспектральные изображения Sentinel-2 (синтез 3,4 и 8 каналов) долин рр. Верхняя Нерюнгра (а, в), Ынгыр (б), Улахан-Муркугу (г) и границы наледей по данным радиолокационных снимков (SAR) и индекса NDSI.

Наледи в пределах Чульманского плато расположены преимущественно в долинах рек. В связи с этим при дешифрировании наледей с помощью радиолокационных изображений в пределах речных пойм имеются объекты, схожие по характеристикам отраженного от них радиосигнала. Например, влажные участки с растительностью, расположенные на поверхностях с малым уклоном (рис. 2 б). При поляриметрическом разложении радиосигнала они имеют черты объемного его рассеяния или двойного переотражения, что затрудняет идентифицировать границы наледи в их пределах.

Также важно отметить, что контуры наледей, отрисованные по радарным снимкам, фиксировались площадью не меньше 10^4 м^2. Причина этого лежит в основе применяемой методики поляриметрического разложения неполно поляризованного радарного изображения (перекрестной и согласованной поляризаций). Согласно расчетному алгоритму, данный способ разложения радиосигнала позволяет качественно установить его механизм без детализации его природы [Cloude, 2007]. В связи с этим наледи среднего размера (10^3–10^4 м^2) и меньше на таких снимках затушевываются на фоне окружающего ландшафта, происходит генерализация контуров.

Наилучшим временем определения плановых границ наледей подземных вод в пределах Чульманского плато является период начала снеготаяния (конец апреля–начало мая). В этот момент наледные объекты становятся наиболее контрастны по отношению к окружающему их ландшафту на радарных изображениях. Обратный радиосигнал, приходящий к спутнику от их контуров, характеризуется обратным его рассеянием с умеренной и высокой энтропией (5 и 8 сектор на рис. 1).

На рисунке 3 представлен графики, отражающий разницу в площади наледей, определенной по радарным снимкам и индексу NDSI 2019 г. Согласно полученным результатам, коэффициент детерминации (R2) низкий, 0.37. Во-первых, алгоритм разложения неполно поляризационного РЛ снимка приводит к генерализации схожих свойств отраженных радиосигналов различных объектов. Это ведет к завышению значений площадей наледей. Во-вторых, использовались мультиспектральные и радарные изображения, полученные с небольшой разницей времени съемки. Тем не менее, существуют наледи, площади которых весьма близки. Подобных объектов обнаружено менее 10%. Они приурочены к участкам наледеобразования, где границы поймы реки совпадают с границами наледной поляны. При этом их ширина составляет не менее сотни метров, что позволяет отчетливо выделить их на радарных изображениях (рис. 2 а, г).

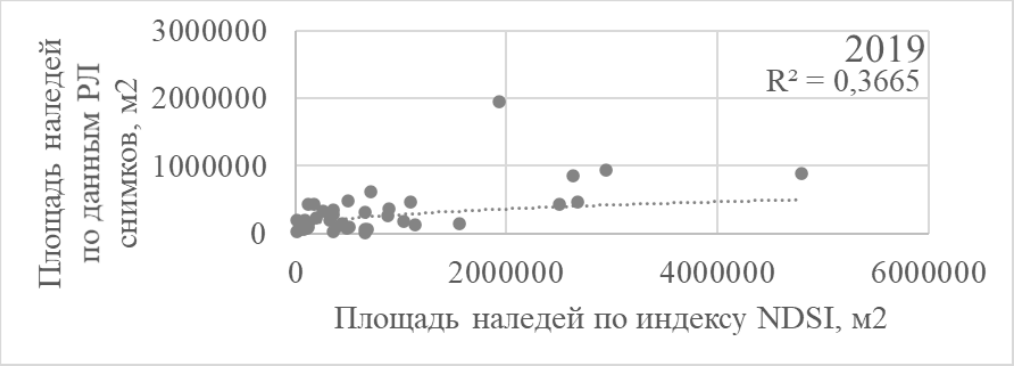


Рис. 3 График корреляции данных площадей наледей Чульманского плато, определенные методами дешифрирования РЛ снимков и индекса NDSI за 2019 г.

Таким образом, проведенные исследования по применению радарных изображений для картирования наледей подземных вод Чульманского плато являются первой попыткой и требуют дальнейшего усовершенствования. Несмотря на существенные ограничения в определении плановых границ наледей с помощью

поляриметрического разложения неполно поляризационных радарных снимков, получен положительный опыт. Он связан с приемлемой точностью (до 10%) определения площади наледи относительно индекса NDSI. Наилучшим временем радарной съемки для применения этого метода картирования является начало снеготаяния (первая половина мая). Наледи отчетливо идентифицируется на радарных изображениях, а механизм радиосигнала представляет собой объемное его рассеяние при умеренной или высокой энтропии. Местоположение таких участков наледеобразования характеризуется совпадением контуров наледных полян и речной поймы, имеющих ширину не менее сотни метров. Примером может служить наледь в долине р. Верхняя Нерюнгра.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №22-27-20118

Список литературы

1. Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M. Distribution and relevance of aufeis (icing) in the Upper Indus Basin. Science of the Total Environment. 2021; № March (780): 146604. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146604

2. Cloude S. The Dual polarisation entropy/alpha decomposition: a palsar case study Frascati, Italy, 22-26 January 2007: 2007. С. 1–6.

3. Gagarin L., Wu Q., Wei C., Jiang G. Icings of the Kunlun Mountains on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, Western China: origins, hydrology and distribution. Water. 2022; № 15 (14): 2396. DOI: 10.3390/w14152396

4. Makarieva O., Shikhov A., Nesterova N., Ostashov A. Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia). Earth System Science Data. 2019; № 1 (11): 409–420. DOI: 10.5194/essd-11-409-2019

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ НА АРКТИЧЕСКОМ СКЛОНЕ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Глотов В.Е.

ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН, Магадан

geoecol@neisri.ru

Аннотация. Показано, что на арктическом склоне Главного водораздела Земли гидрогеологическая неоднородность первого уровня связана с геодинамическим взаимодействием террейнов в поздней юре и раннем мелу и со становлением в мелу Охотско-Чукотского вулкано-плутонического пояса. Этим процессам соответствуют гидрогеологические сложные складчатые области (Яно-Колымская, Олойско-Анюйская, Чукотская) и области Омолонская и Охотско-Чукотская. Они сложены структурами второго уровня неоднородностей, развитых на террейнах: гидрогеологическими массивами, адмассивами, артезианскими бассейнами. Образование сплошной криолитозоны привело к формированию наложенных на все структуры потоков подземных вод, генетически единых с речными. Неоднородности третьего уровня отражают фильтрационную и гидрогеохимическую изменчивость в гидрогеологических структурах. Неоднородности необходимо учитывать при инженерно-геологических и гидрологических изысканиях, гидрогеологическом районировании и мониторинге.

***Ключевые слова**: Гидрогеологические неоднородности, гидрогеологические сложные складчатые области, фильтрационные и гидрогеохимические неоднородности, террейны.*

Abstract. The article shows that on the Arctic slope of the Main Watershed of the Earth, the hydrogeological heterogeneity of the first level is associated with the collage of terranes in the Late Jurassic and Early Cretaceous and with the formation of the Okhotsk-Chukchi Volcanic-Plutonic belt in the Cretaceous. Hydro-geological complex folded regions (Yano-Kolyma, Oloysko-Anyuyskaya, Chukotka) and the regions of Omolon and Okhotsk-Chukotka correspond to these processes. They are composed of structures of the second level of heterogeneities: hydrogeological massifs, admassives, artesian basins corresponding to terranes. The development

of a continuous cryolithozone led to the formation of groundwater flows superimposed on all structures, genetically unified with river flows. The heterogeneity of the third level is associated with filtration and hydrogeochemical variability in structures. Heterogeneities must be taken into account in engineering-geological and hydrological surveys, hydrogeological monitoring.

***Keywords**: Hydrogeological inhomogeneities, hydrogeological complex folded areas, filtration and hydrogeochemical inhomogeneities, terranes.*

Неоднородность или изменчивость любого показателя и показателей, по мнению его первоисследователей Г.К. Бондарика, В.А. Мироненко и В.М. Шестакова, И.К. Гавич [1], всегда имеют геолого-генетическую природу. Материалы многолетних исследований на Северо-Востоке России свидетельствуют, что криолитозона также может вызывать неоднородности различного уровня.

Северо-Восток России в географическом отношении является полуостровом, разделенным фрагментом Главного водораздела Земли на две области – арктическую и тихоокеанскую. В верхнеюрско-неокомовое время при взаимодействии трех литосферных плит: Северо-Американской, Евразийской и Тихоокеанской на площади современного арктического склона возникли орогенные пояса – Яно-Колымский, Олойско-Анюйский и Чукотский. Между первыми двумя расположен Омолонский кратон. На западные и южные окраины поясов и на кратон в среднем и верхнем мелу наложен Охотско-Чукотский вулкано-плутонический пояс (ОЧВПП) [2].

В гидрогеологическом отношении в орогенных поясах в позднем кайнозое сформировались одноименные гидрогеологические сложные складчатые области (ГССО), а на кратоне и в вулканическом поясе – гидрогеологические (ГО). Яно-Колымская, Олойско-Анюйская, Чукотская ГССО, Омолонская и Охотско-Чукотская ГО составляют первый уровень гидрогеологической неоднородности (рис. 1).

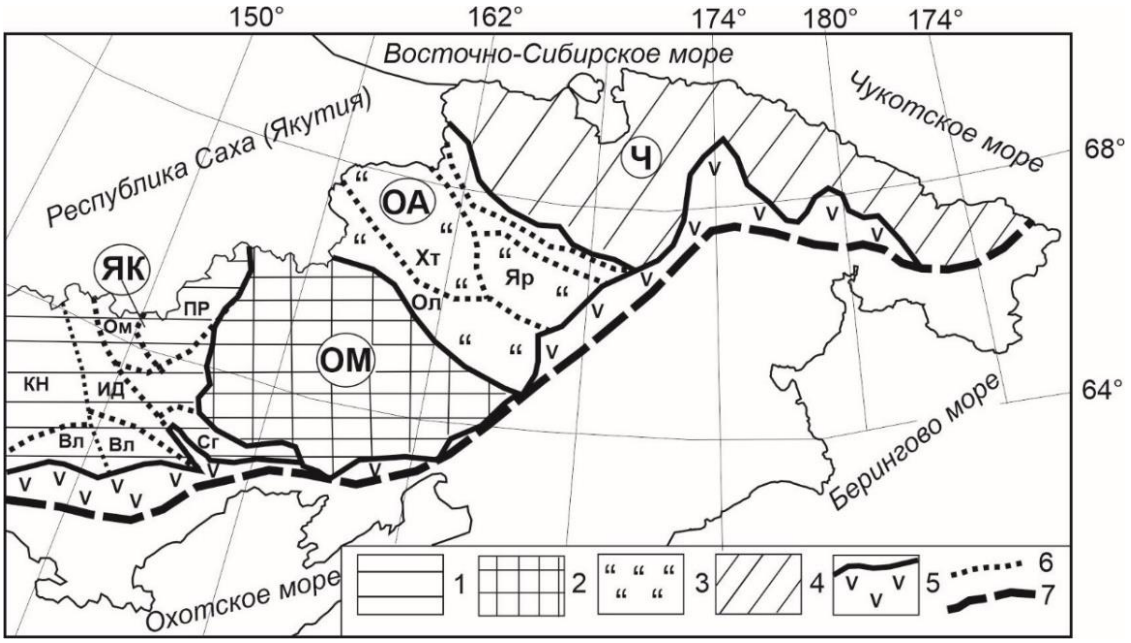


Рис. 1. Схема расположения гидрогеологических областей (ГО) и сложных складчатых областей (ГССО) на основе схемы кратонов и орогенных поясов Востока России [2].

1-5 - площади ГО и ГССО: 1. Яно-Колымская ГССО (ЯК); 2. Омолонская ГО (ОМ); 3. Олойско-Анюйская ГССО (ОА; 4. Чукотская ГССО (Ч); 5. Охотско-Чукотская ГО (Ч) 6 – разломы (границы террейнов); 7 - Главный водораздел Земли.

Гидрогеологические районы на основе террейнов ЯК ГССО: КН – Куларо-Нерский, ИД – Иньяли-Дебинский, Вл – Вилигинский), Сг-Сугойский, Ом-Омулевский; Пр-Приколымский.

Следующий уровень связан с особенностями строения и геодинамической историей террейнов, слагающих указанные области. Террейны характеризуются внутренней однородностью своего строения, тектоники и геологической истории и отличаются по этим показателям от соседних блоков. С учетом глубокой эрозионной расчлененности можно считать, что водоносность пород, слагающих террейны, вулканические и плутонические объекты, определяется трещинно-жильной водопроницаемостью в зонах разломов. В террейнах зон коллизионного взаимодействия широко представлены надвиги, что предполагает развитие в них пластово-трещинной водопроницаемости. Лишь во впадинах и в речных долинах залегают породы с порово- и трещинно-пластовой водопроницаемостью.

Без сомнения, повсеместно породы любого генезиса подвергаются региональным процессам гипергенной трещиноватости, которая достигает наибольших глубин в речных долинах (до 150 м) в терригенных образованиях и до (60-70 м) в магматических породах, создавая водоносную зону региональной трещиноватости.

В соответствии с принципами Е.В. Пиннекера [3], рационально выделять гидрогеологические массивы (ГМ) магматических и метаморфических терригенных пород, ГМ карбонатно-терригенных и терригенно-карбонатных пород. В террейнах с развитием надвигов формируются адмассивы (АдМ). В постколлизионных впадинах складывались условия для образования межгорных артезианских бассейнов (МАБ) с порово- или трещинно-пластовым типом водопроницаемости.

Отличия, связанные с геолого-генетической неоднородностью второго уровня, позволяют выделять гидрогеологические районы на основе террейнов. Например, в Янско-Колымском ГССО сформировались районы АдМ, ГМ магматических пород и МАБ на основе террейнов - Иньяли-Дебинского, Куларо-Нерского, Вилигинского, Сугойского; ГМ терригенно-карбонатных и магматических пород на террейнах - Омулевском и Приколымском. Аналогичные районы имеются и в других областях.

На втором уровне неоднородностей заметно проявились процессы становления и развития криолитозоны. Гидрогеологическая роль её в сходных по условиям регионах наиболее полно отражена в работе [4]. В конкретном случае на водоразделах мощность криолитозоны (КЗ) больше глубины проникновения трещин выветривания. Поэтому водоносная зона региональной трещиноватости на арктическом склоне отсутствует. В речных долинах мощность КЗ сокращается или отсутствует. При её промерзании-оттаивании происходило улучшение фильтрационных свойств зоны трещиноватости, возникла так называемая криогенная трещиноватость. Её вскрывают под криолитозоной сокращенной мощности в речных долинах, но наиболее развита под руслами рек в сквозных таликах, обычно перекрыта слабоводопроницаемыми элювиальными, водно-ледниковыми, иногда озерными отложениями. Но в локальных участках перекрывающий слой отсутствует или сложен водопроницаемыми крупнообломочными отложениями. Через эти участки происходит водообмен зоны трещиноватости с водами аллювиальных отложений и с рекой. То есть возникает водообменная лентообразная система, генетически связанная с речной. Эту систему мы считаем своеобразной структурой квазиартезианского типа, наложенной на все другие во всех гидрогеологических районах. Характерно, что в составе этой системы в теплое время года велика роль сезонно-водоносного слоя (СВС), связанного с сезонно-талым на горных склонах. Он существует с конца мая-начала июня до ноября. К ноябрю воды СВС уже не питают подрусловые талики. Многие водотоки с площадью водосбора до 5-10 тыс. км^2 в Яно-Колымской ГССО, Омолонской и Охотско-Чукотской ГО в зимнюю межень пересыхают или перемерзают. В Олойско-Анюйской и Чукотской ГССО это происходит при площади водосбора менее 25 тыс. км^2.

Следовательно, СВС является важным элементом наложенной структуры, названной нами квазиартезианской, которая определяет существование современной зоны активного водообмена. Можно считать, что в районах сплошной криолитозоны

в ГМ, АдМ, АБ активный водообмен не существует. В толще многолетнемерзлых пород на площади рудных месторождений встречаются локальные трещинные скопления криопэгов. Подмерзлотные трещинно-жильные и пластово-трещинные, порово- и трещинно-пластовые воды питаются за счет инфильтрациии воды из каровых или межледниковых озер. Своеобразное питание подмерзлотных вод происходит за счет таяния жильного льда при сокращении мощности криолитозоны. Таким питанием, например, можно объяснить наличие пресных подмерзлотных вод ниже подошвы криолитозоны в районе Валькумейского оловорудного месторождения. Указанные гидродинамические и гидрогеохимические особенности в районах сплошной криолитозоны, дали основание О.Н. Толстихину [4] и В.В. Шепелеву [5] выделить зону осложненного водообмена, обусловленной становлением и развитием толщи многолетнемерзлых пород.

Так как водосборные бассейны рек располагаются на площади террейнов, сток их в период летней и зимней межени является обобщенным показателем емкостных и фильтрационных свойств пород, слагающих данный террейн или террейны в зоне активного водообмена. В таблице 1 приведены данные по наиболее презентабельным водотокам, которые подчеркивают развитие неоднородностей второго уровня в гидрогеологических областях на арктическом склоне (табл. 1). Наибольшими ресурсами подземных вод обладают ГССО, в которых доминируют гидрогеологические массивы, сложенные магматическими (Охотско-Чукотский) и/или терригенно-карбонатными породами (Омолонский). Наименее водообильны террейны активных окраин Олойско-Анюйской ГССО, в основном, сложенные туфогенными, терригенно-туфогенными, метаморфогенными образованиями.

Неоднородности третьего уровня, с учетом геокриологических условий, определяют фильтрационную изменчивость в зонах разломов, таликах речных долин, подмерзлотной трещиноватости. Особенности связи фильтрационных показателей с подвижностью тектонических разломов в осадочных бассейнах изучалась [1; 7]. В горных районах породы в тектонических зонах сильно трещиноваты, часто хлоритизированы и каолинизированы, трещины заполнены кварцем или кальцитом.

Таблица 1. Данные о стоке рек, обеспеченном питанием подземными водами зоны активного водообмена (по материалам монографии [6])

Гидрогеологические сложные складчатые области (ГССО) и области (ГО)	Река, пост	Площадь водосбора, км^2	Модуль стока, л/с· км^2·	
			Мин. сток летней межени	Сток за октябрь
Яно-Колымская	Колыма, п. Усть-Среднекан	99400	4,2	2,4
	Кулу, п. Кулу	10300	6,3	3,9
Олойско-Анюйская	Бол. Анюй, п. Константиновский	49600	2,2	1,14
	Мал. Анюй, п. Островное	30000	2,63	0,72
Чукотская	Амгуэма, у моста	26700	5,68	2,25
	Паляваам, устье р. Глубокой	6810	4,8	1,63
Омолонская ГО	Олой, п. Уточан	15700	5,03	2,35
	Коркодон, ГМС Кольцевая	7670	3,68	2,27
Охотско-Чукотская ГО	Омолон, п. Лабазный	3710	8	5,98
	Руч. Туфовый, ГМС Кольцевая	151	5,4	0,5

Особенности фильтрационной неоднородности мы исследовали в гидрогеологическом массиве на Валькумейском месторождении в толще гранодиоритов побережье Чаунской губы. Установлено, что водопроницаемые трещины ориентированы по простиранию разломов. При вскрытии последних опережающими скважинами начальный дебит самоизлива менялся от «капежа» до 0,1 л/с. Уровни воды соответствовали отметкам дневной поверхности, находясь в прибрежной зоне, на отметках от 1 до 10-15 м выше уровня моря. Вскрытые скважинами внутрижильные скопления воды полностью дренируются за время от нескольких часов до 2-3-х недель. При этом осушение одних разломов не отражается в водоизливе из других. При отработке рудных жил встречались интервалы тектонической брекчии сцементированной милонитом, а также полости раскрытые 2-5 см. Следовательно, водопроницаемость зоны разломов глубже зоны гипергенеза весьма неоднородна. Это подтверждается и резкой гидрогеохимической изменчивостью. На этом месторождении внутрижильные воды имеют минерализацию от пресных хлоридных натриевых вблизи подошвы криолитозоны, указывающие на возможное оттаивание пресного льда, до отрицательно температурных рассолов кислого сульфатного железисто-магниевого состава, свидетельствующих о развитии процесса криогенного метаморфизма.

Своеобразными показателями гидрогеологической неоднородности третьего уровня служат наледи. На арктическом склоне они наиболее полно изучены О.Н. Толстихиным [8], В.Р. Алексеевым [9]. Ими показано, что наиболее крупные русловые наледи образуются или при уменьшении площади сечения талика, или в зоне контакта водоносных пород с высокими фильтрационными свойствами с относительно менее водопроницаемыми.

В целом есть основания считать, что на территориях сплошного распространения многолетнемерзлых пород гидрогеологические неоднородности выше первого регионального уровня имеют двойную геолого-генетическую и геокриологическую природу.

Гидрогеологические неоднородности четвертого и более высоких уровней связаны с современными изменениями природной среды и техногенным воздействием человека и требуют отдельных исследований.

Объяснение гидрогеологических неоднородностей с позиций террейновой тектоники позволяет обоснованно выделять границы гидрогеологических районов, которые соответствуют разломам ограничивающих террейны. Соответственно, провинциям будут отвечать орогенные пояса, кратоны и площади наложенных на эти пояса вулканогенных покровов. Террейновый подход позволяет обоснованно подходить к изучению закономерностей поверхностного и подземного водного стока, формирования наледей и ресурсов пресных подземных вод в арктических районах.

Охарактеризованные гидрогеологические неоднородности необходимо учитывать при выполнении инженерно-геологических и гидрологических исследований, региональных гидрогеологических работах и при составлении программы развития региона.

Список литературы

1. Гавич И.К. Теоретические основы изучения движения подземных вод в земной коре // Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / отв. ред. И.С. Зекцер. − Новосибирск: СО «Наука», 1983. − С. 7-105.

2. Ханчук А.И., Голозубов В.В., Бялобжеский С.Г., Попеко Л.И., Горячев Н.А., Родионова С.М. Кратоны и орогенные пояса Востока. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2-х кн. /ред. А.И. Ханчук. − Владивосток: Дальнаука, 2006. − Кн. 1. − С. 92-230.

3. Пиннекер Е.В. Подземные водоносные системы // Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология. − Новосибирск: Наука, 1980. − С. 99-120.

4. Толстихин О.Н., Кононова Р.С. Гидродинамическая и гидрохимическая зональности // Гидрогеология СССР. Т. 20. Якутская АССР. − М.: Недра,1970. − С. 213-229.

5. Шепелев В.В., Толстихин О.Н., Пигузова В.М. и др. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири. − Новосибирск: СО «Наука», 1984.− 198 с.

6. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1, вып.17. − Л.: Гидрометеоиздат, 1985. − 428 с.

7. Кравивнер Р.Б., Плугина Т.А., Язвин А.Л. Роль разломов в формировании фильтрационных неоднородностей верхнего гидрогеологического этажа // Разведка и охрана недр. −2003. −№ 10. − С. 24-28.

8. Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. −Новосибирск: СО «Наука», 1974.− 163 с.

9. Алексеев В.Р. Наледи. − Новосибирск: СО «Наука», 1987. − 60 с.

МИГРАЦИЯ ФЛЮИДОВ В ОЧАГОВЫХ ОБЛАСТЯХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Добрынина А.А.[1, 2], Саньков В.А.[1]

[1] Институт земной коры СО РАН, Иркутск, sankov@crust.irk.ru

[2] Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, dobrynina@crust.irk.ru

Аннотация. В работе сделана попытка оценить поведение флюидов в очаговых областях сильных землетрясений юга Восточной Сибири по данным о скоростях и амплитудах сейсмических волн. В результате выявлены две тенденции поведения флюидов: увеличение и уменьшение поглощения сейсмических волн. Уменьшение поглощения связано с вытеснением флюида из области деформаций, и, наоборот, повышения поглощения связано с миграцией флюида из окружающего горного массива в очаговую область. Первая тенденция наблюдается для последовательностей, располагающихся в пределах Байкальской рифтовой системы с преобладающим растяжением земной коры по комплексу геолого-геофизических данных. Вторая тенденция отмечена для последовательностей, локализованных в областях с преобладание условий сдвига и сжатия.

Ключевые слова: *сильные землетрясения, афтершоки, миграция флюидов, поглощение сейсмических волн*

Abstract. The paper makes an attempt to assess the behavior of fluids in the focal areas of strong earthquakes in the south of Eastern Siberia based on data on the velocities and amplitudes of seismic waves. As a result, two trends in the behavior of fluids were observed: an increase and a decrease of seismic wave attenuation. A decrease of attenuation is associated with the displacement of fluid from the deformation area, and, conversely, an increase of attenuation is associated with the migration of fluid from the surrounding rock mass to the focal area. The first trend is observed for seismic sequences located within the Baikal rift system with predominant extension of the crust. The second trend was noted for seismic sequences localized in areas with predominant conditions of shear and compression.

Key words: *strong earthquakes, aftershocks, fluid migration, seismic wave attenuation*

В работе представлены результаты исследования поглощения сейсмических волн в очаговых областях сильных землетрясений юга Восточной Сибири на примере Бусингольского (27.12.1991 г., M=6.5, [1]), Южно-Байкальского (25.02.1999 г., M=5.9, [2]), Кичерских (21.03.1999г., M=6.0 и M=5.9, [2]), Чаруодинских (10.11.2005, M=5.8 и 11.12.2005, M=5.6, [3]) и Тувинских землетрясений (27.12.2011 г., M=6.1 и 26.02.2012 г., M=6.4, [4]). Землетрясения сопровождались афтершоковыми последовательностями, для Южно-Байкальского и Кичерских землетрясений также зафиксирована форшоковая активность [1-4]. Поперечные волны очень чувствительны к содержанию флюида в среде, поэтому временные вариации отношений скоростей (V_P/V_S) и амплитуд (A_S/A_P) прямых объемных продольных (P) и поперечных (S) волн, зарегистрированных на ближайших к очаговым областям сейсмических станциях (расстояния до 400 км), могут

интерпретироваться с точки зрения вариаций содержания флюида в этих объемах коры. Для анализа использовались как землетрясения, входящие в состав афтершоковых последовательностей, так и события, локализованные в прилегающих к ним районах.

Анализ временных вариаций параметров затухания (отношений V_P/V_S и A_S/A_P) показывает их различное поведение для разных афтершоковых последовательностей. Для событий, локализованных в очаговой области Бусингольского землетрясения и прилегающих к ней районах за период с 1993 по 2014 гг. на ближайших к эпицентру сейсмических станциях (ARAD, KZL, ORL, MOY, HTG, KRN, TLY, IRK) отмечается тенденция к увеличению параметра V_P/V_S со временем, в то время как для станций ARS и ZAK наблюдается понижение указанного параметра со временем. Интересное поведение V_P/V_S фиксируется на станции TDJ: в период с 2003 по 2008 гг. там отмечается рост параметра V_P/V_S, а за период 2013-2014 гг. – понижение. Аналогичное поведение параметров затухания отмечается для Чаруодинских землетрясений: отношение V_P/V_S повышается, а отношение A_S/A_P – понижается со временем в течение периода с ноября 2005 по июнь 2006 гг.

Для района Южного Байкала рассматривались землетрясения Южно-Байкальской форшоково-афтершоковой последовательности [2] и события, произошедшие в районе Южного Байкала позже, но до момента Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. Анализ вариаций отношений V_P/V_S показывает, что в самом начале активизации (стадия форшоков) для большинства сейсмических станций наблюдались достаточно высокие зачения V_P/V_S – до 1.78, с 25 февраля (основная стадия) эти значения на большинстве станций резко упали. Далее в ходе сейсмической активизации отмечаются хаотические вариации отношения скоростей, и, наконец, в последующие годы параметр V_P/V_S стабильно понижается. Например, для станции Хурамша значение параметра V_P/V_S понизилось на 3% за рассматриваемый период времени (1999-2008 гг.).

Кичерские землетрясения представляют собой пример уникальной долгоживущей афтершоковой последовательности: начавшись в 1999 году, сейсмическая активность продолжается до настоящего времени. Сильнейшие землетрясения последовательности произошли в марте, мае и декабре 1999 г., после этого в очаговой области наблюдалась умеренная сейсмическая активность – самое сильное событие имело энергетический класс К=11.0. В декабре 2006 г. произошло сильное землетрясение с К=13.6, сопровождавшееся многочисленными афтершоками, в июле 2015 г. также зарегистрировано событие с К=13.0. В настощей работе мы ограничились рассмотрением временного периода с 1999 г. по 2006 г., т.е. временем первой активизации. На начало активизации отношение V_P/V_S имело достаточно высокие значения – до 1.78, в ходе сейсмического процесса это отношение понижалось – до величин 1.76÷1.73 для разных станций. Параметр A_S/A_P, наоборот, показывает постепенное повышение со временем.

Тувинская афтершоковая последовательность локализована в районе хребта Академика Обручева в пределах Саяно-Тувинского поднятия и представляет собой мощную последовательность землетрясений (более 2500 толчков по состоянию на конец 2014 г.) с двумя главными толчками, разделенными двухмесячным периодом. Анализ отношений скоростей (V_P/V_S) и амплитуд (A_S/A_P) прямых объемных волн для станции HVS показал существование временного интервала длиной в несколько месяцев (от 13.06.2012 до 08.11.2012) с пониженными значениями параметра A_S/A_P. На графиках вариаций V_P/V_S этой области соответствуют области относительного повышения. Анализ графиков посуточного распределения количества землетрясений и суммарной сейсмической энергии (по данным регионального каталога, составленного Красноярским научно-исследовательским институтом геологии и минерального сырья) показал, что практически сразу после этого периода (с задержкой в два месяца) выделяется период с января по октябрь 2013 г., для которого характерна редкая слабая сейсмичность. Общее количество толчков не превышало 130, а энергетический класс самого сильного события равен 11.8.

Значительное уменьшение скоростей и амплитуд поперечных волн относительно продольных отмечается при прохождении S-волн через слой сильного поглощения, содержащий заметную долю жидкой фазы [5]. Подобный эффект может быть вызван миграцией флюида в очаговую область из окружающего пространства. Согласно выявленным тенденциям, такой процесс наблюдается в эпицентральной зоне Бусингольского и Чаруодинских землетрясений. Для Южно-Байкальской и Кичерской последовательностей установлен другой сценарий изменения поглощающих свойств сейсмогенной среды, который предполагает высокую ее флюидонасыщенность до основной стадии с последующим падением параметра V_P/V_S. По-видимому, флюид мигрировал из очаговой области во внешнее пространство.

Совершенно иное временное распределение значений V_P/V_S и A_S/A_P наблюдалось в очаговой зоне Тувинских землетрясений 2011–2014 гг. К сожалению, отсутствуют наблюдения до первого события последовательности (27.12.2011 г.). В начальной фазе последовательности указанные параметры имели средние значения близкие к 1.73. На спаде афтершоковой активности произошло снижение амплитуд поперечных волн относительно продольных, сопровождавшееся снижением скоростей поперечных волн, что может быть интерпретировано, как следствие притока флюидов в разрушенную очаговую область. Одновременно относительно повысилось количество слабых толчков. Это явление наблюдалось в течение довольно длительного промежутка времени, за этим с интервалом приблизительно 2 месяца последовало резкое уменьшение количества землетрясений. Однако, после десятимесячного относительного сейсмического затишья, афтершоковая активность возобновилась на более высоком уровне. Предположительно, постсейсмические релаксационные деформации вызвали новое перераспределение флюидный масс в очаговой области. В целом, намечается тенденция развития долгоживущей афтершоковой последовательности с характеристиками, подобными Бусингольской последовательности землетрясений. Это тем более вероятно, поскольку обе последовательности находятся в сходных геодинамических условиях, характеризующихся проявлением сдвиговых деформаций [6].

Как следует из приеденных данных, в исследуемом регионе присутствуют две противоположные тенденции в вариациях параметров поглощения сейсмических волн в очаговых областях крупных сейсмических последовательностей. Одна из них выражается в увеличении поглощения (параметр V_P/V_S увеличивается, A_S/A_P уменьшается) со временем и наблюдается для Бусингольский, Чаруодинских и Тувинских землетрясений. Вторая, наоборот, указывает на уменьшение поглощения в ходе сейсмического процесса (отношение V_P/V_S уменьшается, A_S/A_P увеличивается) и отмечается для Южно-Байкальских и Кичерских землетрясений.

Из самых общих соображений о направленности процесса развития хрупких деформаций в очаговых областях сейсмических последовательностей следует вывод об увеличении раздробленности, неоднородности среды в результате реализации таких последовательностей независимо от геодинамической ситуации. Однако, полученные противоположные тенденции изменения параметров поглощения сейсмических волн свидетельствуют о более сложном характере процесса, происходящего в очаговой области, или о других факторах, обуславливающих изменения поглощения. Опираясь на выводы авторов работы [5], можно интерпретировать изменения поля поглощения как результат изменения содержания флюидов в очаговой области. Таким образом, уменьшение во времени поглощения связано с вытеснением флюида из области деформаций, и, наоборот, повышение поглощения связано с миграцией флюида из окружающего горного массива в очаговую область. Согласно полученным результатам, первая тенденция наблюдается для последовательностей, располагающихся в пределах Байкальской рифтовой системы с преобладающим растяжением земной коры по комплексу геолого-геофизических данных. Т.е., флюиды концентрируются в области готовящегося очага при растяжении, а затем перераспределяются в более широкой

области разрушения. Вторая тенденция отмечена для последовательностей, локализованных в областях с преобладание условий сдвига и сжатия. Здесь флюид, выдавленный в процессе усиливающегося во времени сжатия перед началом сейсмической активизации, мигрирует в область сформировавшихся хрупких деформаций, существенно изменяя поглощающие свойства массива.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира», а также данных, полученных Красноярским научно-исследовательским институтом геологии и минерального сырья.

Список литературы

1. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В. Сейсмические активизации в Белино-Бусингольской зоне // Физическая мезомеханика. 2012. № 13. Спец. выпуск. С. 72-77.

2. Добрынина А.А., Саньков В.А. Скорости и направления распространения разрывов в очагах землетрясений Байкальской рифтовой системы // Геофизические исследования. 2010. Т. 11. № 2. с.52-61.

3. Radziminovich N.A., Ochkovskaya M.G. 2013. Identification of earthquake aftershock and swarm sequences in the Baikal rift zone. Geodynamics & Tectonophysics 4 (2), 169–186.

4. Еманов А. Ф. и др. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г. с M=6.6 и 26.02.2012 г. с M=6.7. // Землетрясения России в 2011 г. – Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 88-93.

5. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня // Физика Земли. 2003. № 7. С. 35–47.

6. Саньков В.А., Парфеевец А.В. Позднекайнозойское напряженное состояние в зонах активных разломов Западной Монголии и Тувы // ДАН. - 2005. - Т. 403, № 6. - С. 796-800.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОСОБЕННОСТИ МЕЛКОМАСШТАБНОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Егоров Т.С.[1], Козлов Ю.А.[2]
ФГБУ «Гидроспецгеология», Москва
[1] tsegorov@mail.ru, [2] kozloviurii@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены современное состояние и основные результаты мелкомасштабных гидрогеологических работ на территории Арктической зоны Российской Федерации, приведены дальнейшие планы по ее изучению. Представлены стадийность и методика выполнения работ на исследуемых территориях. Приведены состав и содержание картографических материалов. Отмечены особенности мелкомасштабного гидрогеологического картографирования территории Арктики и даны предложения по основным направлениям совершенствования работ на среднесрочную перспективу.

Ключевые слова: *мелкомасштабное гидрогеологическое картографирование, Арктическая зона, методика региональных гидрогеологических работ*

Abstract. Modern state and main results of small-scale hydrogeological research on the territory of Arctic zone of the Russian Federation are reviewed. Stages and methodology of research on the study area are presented. Composition and content of cartographic materials are given. Features of small-scale hydrogeological mapping on the Arctic territory are noted and suggestions on main directions of research improvement in medium term are provided.

Key words: *small-scale hydrogeological mapping, Arctic zone, methods of regional hydrogeology*

Мелкомасштабное гидрогеологическое картографирование является эффективным средством регионального изучения подземной гидросферы. В настоящее

время региональные гидрогеологические работы осуществляются в рамках государственной программы «Воспроизводство и использование природных ресурсов». Одним из целевых показателей программы является повышение геологической изученности территории Российской Федерации и ее континентального шельфа на основе проведения региональных геолого-разведочных работ, изучение геологического строения Арктики, Антарктики и дна Мирового океана [6].

Планирование опорных зон развития Арктики и восстановление Северного морского пути определяют проведение региональных гидрогеологических работ в пределах номенклатурных листов территории Арктической зоны Российской Федерации, обеспечивая ежегодный прирост мелкомасштабной гидрогеологической изученности в 124 тыс. км^2 (рис. 1).

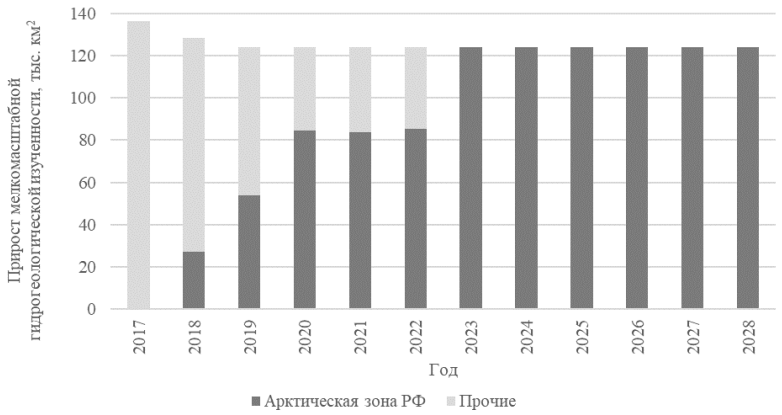


Рис. 1. Прирост мелкомасштабной гидрогеологической изученности территории Российской Федерации

Мелкомасштабное гидрогеологическое картографирование Арктической зоны выполняется сотрудниками ФГБУ «Гидроспецгеология». По состоянию на 01.01.2024 г. подготовлены к изданию 3 номенклатурных листа, находятся в работе – 5, планируется выполнение в среднесрочной перспективе – 4 (рис. 2).

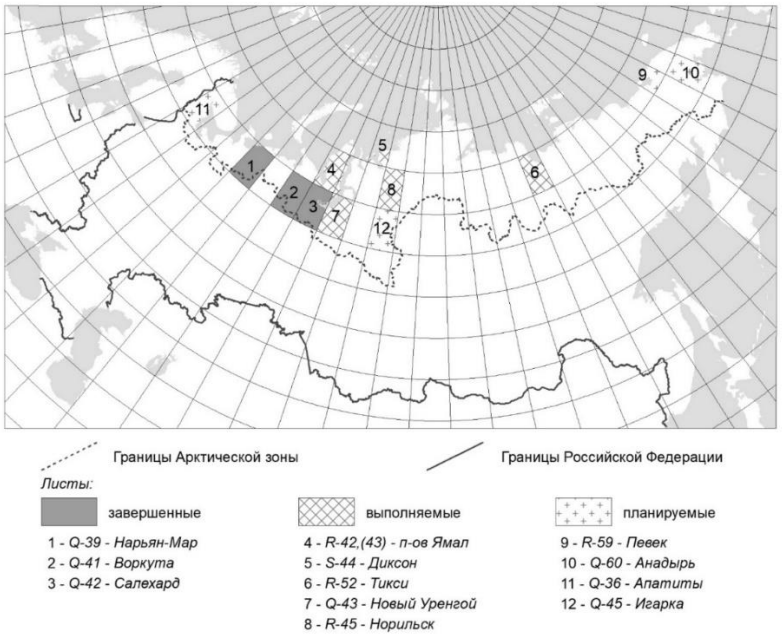


Рис. 2. Мелкомасштабное гидрогеологическое картографирование Арктической зоны (по состоянию на 01.01.2024 г.)

Стадийность выполнения региональных гидрогеологических работ традиционна, несмотря на особенности северных территорий, и включает в себя: обоснование и проектирование; подготовительные, камеральные, реже полевые и аналитические работы; апробацию и подготовку к изданию. Работы по одному листу выполняются в течение 3-4 лет.

Карты составляются в соответствии с методическим руководством [4]. Результатом региональных гидрогеологических работ является комплект гидрогеологической карты, включающий: гидрогеологическую карту (при значительной мощности четвертичных отложений составляются самостоятельные карты для четвертичных и дочетвертичных гидрогеологических подразделений); гидрогеохимическую карту основных водоносных подразделений; карту защищенности основных водоносных подразделений; карту прогнозных ресурсов подземных вод по категории P_3; объяснительную записку к комплекту карт; структурированный фонд геолого-гидрогеологической информации [2].

Завершенные и выполняемые работы на исследуемых территориях позволили сформулировать основные особенности гидрогеологического картографирования и съемки:

1. Сложные гидрогеологические условия. Практически вся территория Арктической зоны расположена в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Мерзлые породы здесь являются региональными водоупорами, из-за чего гидравлическая связь между поверхностными и подземными водами крайне слаба. Процессы промерзания и протаивания играют решающую роль в изменении фазового состояния, формировании, движении и разгрузке подземных вод [10]. Поэтому гидрогеологические условия значительно варьируются на конкретных территориях развития многолетнемерзлых пород. Эти особенности менее существенны в зонах островного и прерывистого распространения и значительны в пределах преимущественно сплошного и сплошного распространения ММП [8], где выделяются надмерзлотные, подмерзлотные, реже внутримерзлотные и межмерзлотные подземные воды. Кроме того, гидротермальные процессы здесь обуславливают развитие сквозных таликов.

2. Относительно быстрая изменчивость гидрогеологических условий, сокращение срока кондиционности карт. Деградация криолитозоны приводит к сокращению мощности ММП как в разрезе, так и в плане; увеличению площади таликов и их переходу из несквозных в категорию сквозных; изменению периодов протаивания-промерзания [5]. Увеличивается период инфильтрационного питания, что приводит к повышению уровней грунтовых вод и увеличению подземного стока.

3. Слабая изученность. В условиях ограниченных данных о гидрогеологическом строении северных территорий приходится работать во многом логикой. Для общего понимания структуры потока подземных вод используются непрямые методы, такие как геохимические, геофизические и дистанционные. Единичные гидрогеологические параметры приходится интерполировать на значительные площади, учитывая региональные особенности геологического разреза.

4. Специфика полевых работ. Арктическая зона характеризуется относительно низкой плотностью населения со слаборазвитой инфраструктурой. Целесообразность проведения полевых работ в первую очередь должна определяться доступностью северных территорий. В зоне распространения ММП приходится изучать и картировать не только подземные воды в жидкой фазе, но и воды, находящиеся в горных породах или на поверхности земли в твердой фазе, в виде наледей и подземных льдов; приходится в гораздо большей степени, чем это делают обычно, учитывать температурные условия горных пород и подземных вод [3]. Полевые работы желательно проводить в периоды, когда наиболее четко проявляются гидрогеологические особенности, связанные

с наибольшим промерзанием (зимой или ранней весной) или наибольшим протаиванием (поздней осенью). Так как вопрос об изменении режима подземных вод в годовом цикле весьма существен как практически, так и теоретически, то для того, чтобы составить правильное представление о гидрогеологических особенностях картируемой площади, желательно организовать повторный осмотр хотя бы некоторых, наиболее крупных или типичных водоисточников.

5. Исключение морских акваторий из площади картографирования. В условиях широкого распространения высокоминерализованных подземных вод или вод, являющихся незащищенными от потенциального поверхностного загрязнения, субмаринные воды теоретически могут быть более перспективным источником централизованного водоснабжения прибрежных населенных пунктов.

6. Ориентированность нормативно-методических документов на территории вне развития ММП.

Оценка степени защищенности напорных подземных вод от поверхностного загрязнения в соответствии с [1] учитывает мощность перекрывающих отложений и соотношение напоров и уровней. Очевидно, что в зоне развития ММП, именно мерзлые породы будут являться основным фактором, влияющим на защищенность водоносного подразделения.

Оценка прогнозных ресурсов подземных вод в соответствии с [7] осуществляется на весьма длительный, практически неограниченный период эксплуатации. В этом случае многолетняя сработка емкостных запасов не учитывается, а в качестве источников формирования прогнозных ресурсов принимаются только питание (естественные ресурсы) водоносного подразделения и привлекаемые ресурсы. В то же время для подмерзлотных вод питание либо отсутствует, либо имеет локальный характер.

В действующих нормативных документах не приводится определение основного водоносного подразделения, из-за чего Исполнителями рассматриваются подземные воды с минерализацией не более 3, реже 10 г/дм^3. Учитывая современные возможности водоподготовки [9], представляется допустимым изучение для практических целей солоноватых и даже соленых вод. Опыт эксплуатации (с водоподготовкой) высокоминерализованных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения уже имеется. Например, в пос. Варандей (Ненецкий автономный округ), где минерализация подземных вод составляет 15-22 г/дм^3.

Дальнейшие работы для повышения эффективности мелкомасштабного гидрогеологического картографирования территории Арктической зоны рекомендуется направить на:

- постепенное увеличение ежегодного прироста гидрогеологической изученности;
- подготовку, апробацию и ввод в действие научно-методических документов, повышающих эффективность региональных работ в зоне распространения ММП;
- создание опорной сети мониторинга подземных вод и геокриологических условий.

Список литературы

1. Гольдберг В.М. Оценка условий защищенности подземных вод и построение карт защищенности // Гидрогеологические основы охраны подземных вод. М., 1984. С. 171-177.

2. Егоров Т.С. Опыт создания и применения структурированного фонда гидрогеологической информации при мелкомасштабном картографировании // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2022. – № 1. – С. 58-68.

3. Методическое руководство по гидрогеологической съемке масштабов 1:1 000 000 – 1:500 000 и 1:200 000 – 1:100 000. Под общей редакцией А.А. Маккавеева и А.С. Рябченкова. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 320 с.

4. Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов государственных гидрогеологических карт Российской Федерации масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000. М.: Минприроды, Роснедра, ФГУП «ВСЕГИНГЕО», 2015. 112 с.

5. Оберман Н.Г., Лыгин А.М. Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород на примере Европейского Северо-Востока страны // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 7. – С. 15-20.

6. Постановление Правительства РФ от 18 декабря 2021 г. № 2358 «О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Воспроизводство и использование природных ресурсов» и признании утратившими силу некоторых актов и отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. 27.12.2021. №52 (Часть II). Ст. 9187.

7. Рекомендации по оценке прогнозных ресурсов категорий P_2 и P_3 питьевых, технических и минеральных подземных вод, выявленных в ходе регионального гидрогеологического изучения территории Российской Федерации и требования к порядку их учета и апробации. – М.: Минприроды, Роснедра, ФГУП «ВСЕГИНГЕО», 2014. 33 с.

8. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М.: Изд-во МГУ, 1983. 231 с.

9. Синицына О.О., Турбинский В.В., Ряшенцева Т.М., Лаврик Е.П. Гигиенические аспекты использования опресненной морской воды в питьевых и хозяйственно-бытовых целях. Обзор литературы // Здоровье населения и среда обитания - ЗНиСО. – 2021. – Т. 29, № 8. – С. 26-32.

10. Quinton W.L., Marsh P. A conceptual framework for runoff generation in a permafrost environment // Hydrological Processes. – 1999. – Vol. 13. – №16. – PP. 2563– 2581.

ИСТОЧНИКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ООПТ И ПРОЕКТИРУЕМЫХ ГЕОПАРКОВ БУРЯТИИ

Кислов Е.В.

Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, evg-kislov@ya.ru

Аннотация. В настоящей статье приведена информация об источниках подземных вод, находящихся на территории заповедников, национальных парков, заказников, природного парка на территории Бурятии. Приведена характеристика источников и сведения об их использовании. Дана сводка 23 источников, имеющих официальный статус памятника природы регионального значения, в том числе находящихся на территории Участка Всемирного природного наследия «Озеро Байкал» в пределах Бурятии. Хорошая изученность и привлекательность источников подземных вод позволяет обосновать создание ООПТ и геопарков либо предотвратить их реорганизацию. С другой стороны, нахождение источников подземных вод на территории ООПТ и геопарков будет способствовать их изучению, сохранению и рациональному использованию.

***Ключевые слова**: источники подземных вод, Бурятия, ООПТ, памятники природы, геопарки*

Abstract. This article provides information about groundwater sources located on the territory of nature reserves, national parks, nature reserves, and a natural park on the territory of Buryatia. The characteristics of the sources and information about their use are given. A summary of 23 sources with the official status of a natural monument of regional significance, including those located on the territory of the World Natural Heritage Site "Lake Baikal" within Buryatia, is given. Good knowledge and attractiveness of groundwater sources makes it possible to justify the creation of protected areas and geoparks or prevent their reorganization. On the other hand, finding groundwater sources on the territory of protected areas and geoparks will contribute to their study, conservation and rational use.

***Keywords:** groundwater sources, Buryatia, protected areas, natural monuments, geoparks*

Территория Республики Бурятия отличается не только уникальным объектом глобального значения – озером Байкал, но и удивительным разнообразием ландшафтов от песчаных пустынь через степи и тайгу до горных гольцов, сложностью и своеобразием геологического строения. Тем не менее, площадь особо охраняемых природных территорий (ООПТ) составляет менее 7 % территории Бурятии при рекомендованных ЮНЕСКО 15 %. Природно-заповедный фонд Бурятии включает 2 биосферных и 1 природный заповедник, 2 национальных парка, 3 заказника федерального значения; 13

заказников регионального значения, природный парк, рекреационную местность, 57 памятников природы регионального значения; 5 рекреационных местностей местного значения. ООПТ ориентированы в основном на сохранение биоразнообразия.

Источники подземных вод, которые мы рассматриваем как водные памятники природы либо составную часть комплексных памятников природы [2] изучаются, сохраняются и используются не в полной мере. Ситуацию могло бы исправить организация геопарков, которая в Бурятии стала обсуждаться лишь в последнее время [3, 4]. Наиболее полная сводка минеральных источников, не потерявшая своего значения до нашего времени, подготовлена И.М. Борисенко и Л.В. Замана в 1978 г. [1]. Ряд источников был оформлен в качестве памятников природы в 1980-х годах. В случае нахождения на территории ООПТ более высокого порядка этот статус утрачен.

Цель исследования – показать разнообразие источников подземных вод на территории ООПТ и проектируемых геопарков в пределах Бурятии, необходимость их дальнейшего изучения для совершенствования природно-заповедного каркаса территории.

На территории **Баргузинского биосферного заповедника** находится *Давшинский источник* в бывшем п. Давша, ныне кордоне с научным отделом заповедника. Излив термальных вод происходит на поверхности 8-метровой террасы, сложенной песчано-галечными отложениями, перекрывающими граниты. Вода Давшинского источника сульфатная натриевая с минерализацией 0,4-0,5 г/л. В ее составе обнаружены фтор 8-10 мг/л, кремниевая кислота 65-100 мг/л, pH более 8,4. Температура воды 42-43°С. Общий дебит источника 1,2-1,5 л/с. На источнике построено небольшое помещение с двумя ванными.

Езовские источники на берегу р. Езовка – гидрокарбонатно-сульфатная натриевая вода с минерализацией 0,23 г/л, дебитом более 20 л/с, температурой 23°С и концентрацией радона 37,5 эман. Большое число источников подземных вод находится на территории Тункинского национального парка.

Источник Нилова Пустынь на курорте Нилова Пустынь. Горячие воды Ниловой пустыни местные жители использовали для лечения еще в XVIII в. В 1830-х гг. об их существовании стало известно генерал-губернатору Восточной Сибири В.Я. Руперту. По его распоряжению в 1840 г. аптекарь Калау определил химический состав минеральной воды и построил здание, где жила и лечилась жена В.Я. Руперта, страдавшая “сведением руки”. В 1845 г. архиепископ Иркутский Нил основал здесь пустынь преподобного Нила Столбенского чудотворца, откуда источник и получил название “Нилова пустынь”. Воды источника тремя рассредоточенными грифонами поднимаются на поверхность по разлому в гранитах, слагающих склон на правом берегу реки. Химический состав воды сульфатный натриевый, минерализация около 1 г/л, температура воды от 41° до 45°С. В газовом составе преобладает азот, характерны высокие содержания кремнезема 80-100 мг/л и небольшая радиоактивность - по данным разных исследователей от 14 до 90 эман/л. Дебит – 3 л/с. В 1964-1966 гг. И.М. Борисенко провел детальную разведку источника, каптировал термы на глубине скважинами, что позволило в 20 раз увеличить дебит. В настоящее время основной выход термальных вод перекрыт бетонной заглушкой, вода подается из скважин насосами в два ванных корпуса. На курорте есть курортная бальнеологическая лечебница с 8 пансионатами и гостевым домом.

Источник Хонгор-Ула расположен в 9 км южнее с. Жемчуг, в предгорьях Хамар-Дабана. Насчитывается свыше 10 выходов минеральных вод. Источник приурочен к правому берегу р. Харагун, находится в живописной горнолесной местности. Вода температурой 5,3° сульфатно-гидрокарбонатная магниево-кальциевая с минерализацией до 0,2 г/л и содержанием железа 10 мг/л, дебит 3 л/с. Дом отдыха в настоящее время не работает.

Тункинская скважина («Вышка») на правый берегу р. Иркут. При поисковых работах на нефть и газ в 1954 г. была пробурена Опорная скважина 1 на правом берегу р. Иркут, в 1,5 км к северо-западу от с. Жемчуг. В рыхлых кайнозойских отложениях на глубинах 728-766 и 834-846 м вскрыты термальные (38-39°С) воды. По химическому составу вода гидрокарбонатная натриевая с минерализацией 1,2 г/л. В растворенном газе преобладает метан, в воде содержится кремниевая кислота (50-60 мг/л), обнаружены следы фтора и редких щелочей. На скважине были построены примитивные ванны, а затем профилакторий Слюдянского отделения Восточно-Сибирской железной дороги. По ее заказу в 1987 г. Селенгинская экспедиция пробурила новую скважину в 150-200 м от прежней. Скважиной вскрыта горячая вода температурой 51,5°С, насыщенная углекислотой. Состав воды хлоридно-гидрокарбонатный магниево-кальциевый. В воде обнаружено железо (10 мг/л), радон (12 эман), минерализация достигает 4,9 г/л. Организован муниципальный профилакторий Тункинского района. Популярное место, привлекающее большое число туристов, особенно из Иркутской области. В последнее время построены гостиницы, турбазы, гостевые дома.

Источники курорта Аршан в районе одноименного поселка известны с 1860-х гг., использовались отдыхающими с конца XIX в. Первый курортный сезон открылся в 1920 г. Разведка углекислых вод проведена в 1956-1973 гг. конторой “Геоминвод”. На курорте с 1931 г. пробурено более 30 скважин, дающих углекислую гидрокарбонатную магниево-кальциевую слабожелезистую воду температурой 11-44°С и минерализацией 2-4,2 г/л. Курорт всероссийского значения, санатории «Саяны» и «Аршан».

Папий Аршан у подножия Тункинских Гольцов, в 12 км западнее курорта Аршан – напорный восходящий источник зоны сифонной циркуляции, приуроченный к зоне надвига кристаллических сланцев на известняки. Источник слабоминерализованной карстовой воды находится в живописной залесенной местности у склона хребта. Место выхода представляет собой воронкообразный бассейн диаметром 3 м и глубиной 2-2,5 м с прозрачной голубовато-зеленой водой. Донные осадки окрашены в сизо-голубоватый цвет, вызванный присутствием в них минерала вивианита. На дне воронки виден открытый понор. Дебит источника 24-34 м/с, температура 5,5°С. От родника идут деревянные желоба, подающие воду в чан для нагревания. Из него вода подается в ванны. На поляне стоят пять изб и вагончиков. Посещается местными жителями.

Субурга (Старый Аршан, Малый Аршан) у подножия Тункинских Гольцов, в 5 км западнее курорта Аршан – напорные восходящие источники зоны сифонной циркуляции, приуроченные к зоне надвига кристаллических сланцев на известняки. Слабоминерализованная карстовая вода выходит в виде трех воклюзов в живописной местности на залесенном склоне хребта. Построена деревянная молебная юрта. Посещается местными жителями.

Ряд источников находится на территории **Забайкальского национального парка,** граничащего с Баргузинским заповедником с юга.

Змеиный источник на полуострове Святой Нос в бухте Змеиная у входа в Чивыркуйский залив. Разгрузка горячих вод приурочена к зоне разлома в гранито-гнейсах. Дебит источника незначительный и составляет 0,3 л/с, который складывается из расходов нескольких отдельных грифонов. Основной выход каптирован примитивным деревянным срубом – сток из него слабый. Состав воды гидрокарбонатно-сульфатный натриевый, общая минерализация 0,5 г/л. Вода обладает сильным запахом сероводорода - 26,2 мг/л, содержит фтор 8,5 мг/л и кремниевую кислоту 130 мг/л. Температура ее 48°С. Рядом с основным каптированным выходом у уреза воды в озере имеются еще четыре грифона, температура воды в которых от 28° до 34°С. Посещается туристами, практикуется проживание в плавучей гостинице.

Источник Кулиных болот у западного берега оз. Малый Арангатуй на Чивыркуйском перешейке, соединяющего полуостров Святой Нос с материком. Из-за подъема уровня воды Байкала, вызванного строительством Иркутской ГЭС, источник

в отдельные годы затапливается. Отчетливых выходов термальных вод нет, на водной поверхности, свободной от водорослей и растительных остатков, наблюдаются газовые пузыри, всплывающие со дна. Температура воды на поверхности варьирует в разных местах от 20-26 до 54°С или от 36° до 70°С на глубине. Данные по химическому составу также не идентичны. Возможно, это вызвано климатическими условиями региона или колебаниями уровня воды в озере. А.В. Николаев в 1925 г. дал описание и схему расположения озер с теплой (до 22°С) газирующей водой. По одним данным, вода хлоридно-гидрокарбонатная натриевая с минерализацией 0,33 мг/л и содержанием сероводорода 2 мг/л, а, по другим – гидрокарбонатно-сульфатная натриевая с содержанием сероводорода 3,3, фтора – 7, кремниевой кислоты – 120 мг/л, pH более 8,4, минерализацией 0,45 г/л, температурой 36° С. В последнее время на источнике сооружен бассейн, обшитый досками, оборудованы настил от края болота и спуск в бассейн.

Нечаевский источник в устье р. Маркушин, притока р. Большой Чивыркуй, в 12 км от берега Байкала имеет две воронки, отстоящие на 5 м одна от другой с дебитом соответственно 5,5 и 1,5 л/с. Термальные воды проходят через песчано-валунные отложения, охлаждаясь и разбавляясь грунтовыми водами, поэтому их температура колеблется от 24 до 38,5°С. Вода по составу сульфатная натриевая.

Севернее Баргузинского заповедника находится **Фролихинский федеральный заказник** с известными источниками.

Горячий источник Хакусы расположен примерно в 1 км от берега одноименной бухты. Суммарный источника достигает 40 л/с. Несколько отдельных выходов располагаются в пределах подковообразной площадки диаметром около 50 м. Температура воды основного выхода 47°С, в колодце – 44°С. По составу вода сульфатная кальциево-натриевая с минерализацией 0,3 г/л. Содержание фтора 3-5 мг/л, кремниевой кислоты 60-65 мг/л при pH более 8,4, сероводорода 2-3 мг/л. Источник окружен живописным еловым лесом. Популярный курорт, существовавший до 1938 г. и после 1954 г. Имеется гостиничный комплекс, организован трансферт по Байкалу.

Фролихинский источник - выходы в 2 км выше устья р. Фролиха протягиваются на 700-800 м вдоль подножия левого склона долины, сложенного гранитами. Источник известен с XIX в., интенсивно посещается. Суммарный дебит источника – 7-8 л/с. Температура воды в наиболее крупном выходе с дебитом 4,5 л/с равна 35-36°С. Вода гидрокарбонатно-сульфатная кальциево-натриевая с минерализацией 0,24 г/л.

С Тункинским национальным парком граничит **природный парк Шумак**, главная достопримечательность которого - *Шумакские источники*. Они выходят на поверхность в долине правого притока р. Китой р. Шумак при впадении р. Правый Шумак на северном склоне Тункинских Альп. Открыты в 1930 г. геологом А.В. Львовым. Для источников свойственны резкие колебания температуры, содержания углекислоты и радона. Воды выходят тремя группами в виде многочисленных грифончиков на поверхности первой террасы. Первая группа, насчитывающая 42 источника протяженностью 70 м, имеет температуру от 10 до 35°С, содержания углекислоты от 264 до 989 мг/л, а радона – до 20 эман. Суммарный дебит 5,3 л/с. Вторая группа протяженностью 175 м имеет 50 выходов. Вода при этой же температуре содержит до 35 эман радона и до 300 мг/л свободной углекислоты. Термальные воды третьей группы на правом берегу р. Шумак протягиваются на 120 м. Они представлены 16 грифонами с температурой от 28 до 34°С, содержания углекислоты до 380 мг/л, а радона – от 288 до 550 эман. По химическому составу воды гидрокарбонатные кальциево-магниевые с минерализацией до 1 г/л. Популярный курорт, особенно у жителей Иркутской области. Имеется база отдыха. Организованы доставка вертолетом из Иркутска, конный двухдневный маршрут из п. Нилова пустынь, пешком сложнее.

Мохейский источник – одна из главных достопримечательностей **Мохейского заказника**. Источник находится в 37 км юго-восточнее с. Сосновоозерск, в среднем течении р. Мохей, левого притока р. Уда. Он восходящий, имеет две головки с суммарным

дебитом 0,7 л/с. Воды источника холодные (3,5°С), гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-натриевые с минерализацией 0,24 г/л и содержанием радона 260-330 эман. Основной выход источника с дебитом 0,4 л/с каптирован деревянным срубом. Вода используется для ванн и питья.

В настоящее время официальный статус памятников природы имеет ряд источников, в том числе находящиеся на территории **Участка Всемирного природного наследия «Озеро Байкал»** *Горячинский источник* в Прибайкальском районе и *Гусихинский источник* в Баргузинском районе утверждены решением Совета Министров Бурятской АССР № 18 от 18 января 1984 г., *Дзелиндинские, Корикейский* и *Котельниковский источники* в Северо-Байкальском районе утверждены решением Совета Министров Бурятской АССР № 304 от 14 октября 1980 г. Горячинск, Мыс Котельниковский и Дзелинда – курорты федерального значения.

Решением Совета Министров Бурятской АССР № 304 от 14 октября 1980 г. в качестве памятников природы были утверждены *Ангаракан-Сартинский, Верхнеангарский, Ирканинский источники* в Северо-Байкальском районе, *Гаргинский, Кучигерские источники* в Курумканском районе, *Могойский источник* в Баунтовском эвенкийском районе, *Муйский, Толмачевский источники* в Муйском районе. Особой популярностью пользуются источники Курумканского района, несмотря на их труднодоступность и недостаточную оборудованность.

Решением Совета Министров Бурятской АССР № 378 от 2 декабря 1981 г. в качестве памятников природы были утверждены *Маракгинский источник* в Еравнинском районе, *Отобулакский источник* в Иволгинском районе, *Питателевский источник* в Прибайкальском районе, *Хасуртаевский источник* в Хоринском районе. На Питателевском источнике в п. Ильинка в 54 км от Улан-Удэ оборудованы бассейны.

Решением Совета Министров Бурятской АССР № 18 от 18 января 1984 г. в качестве памятников природы были утверждены *Аллинские, Умхэйский источники* в Курумканском районе, *Загустайский источник* в Селенгинском районе, *Источник Витлаус* в Баунтовком эвенкийском районе, *Источник Золотой ключ* в Прибайкальском районе, *Тэгдинский источник* в Хоринском районе.

Среди достопримечательностей проектируемого геопарка «Горы Северного Байкала» необходимо упомянуть *Холоднинский источник* [3].

Что же касается проектируемого геопарка «Долина Селенги», то, помимо вышеупомянутого Отобулакского источника, здесь находятся очень популярные у местных жителей и улан-удэнцев, хотя и недостаточно изученные и оборудованные *Халютинский источник, Аршан Итигилова* и источник *Ошор-Булаг* [4].

Выводы. Территория Бурятии отличается большим количеством и исключительным разнообразием источников подземных вод. Многие из них находятся на территории различных ООПТ, некоторые из которых и были созданы благодаря этим источникам. На территории Участка Всемирного природного наследия «Озеро Байкал» также находятся многочисленные источники, а курорты Горячинск, Мыс Котельниковский и Дзелинда имеют федеральное значение. 23 источника имеют официальный статус памятника природы регионального значения. Ряд источников использован при обосновании создания геопарков. Хорошая изученность и привлекательность источников подземных вод позволяет обосновать создание ООПТ и геопарков либо предотвратить их реорганизацию. С другой стороны, нахождение источников подземных вод на территории ООПТ и геопарков будет способствовать их изучению, сохранению и рациональному использованию.

Работа выполнена в рамках темы НИР АААА-А21-121011390003-9.

Список литературы
1. Борисенко, И.М. Минеральные воды Бурятской АССР / И.М. Борисенко, Л.В. Замана. – Улан-Удэ: Бурятское книжное издательство, 1978. – 162 с.
2. Кислов, Е.В. Памятники природы (на примере Западного Забайкалья) / Е.В. Кислов. – Методическое пособие. – Улан-Удэ: Издательство БНЦ СО РАН, 1999. – 180 с.
3. Кислов, Е.В. Перспективы создания геопарка «Горы Северного Байкала» / Е.В. Кислов // Геологические памятники природы: характеристика, состояние, использование. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Горно-Алтайск, 2021. – С. 88-92.
4. Кислов, Е.В Памятники природы проектируемого геопарка «Долина Селенги» / Е.В. Кислов, А.Е. Кислов, Л.Д. Базарова // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов. – 2023 – № 4. – С. 24-51. – DOI 10.24412/2949-4052-2023-4-24-51.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРИРОВАННОГО МАССИВА ЭТАЛОННЫХ УСЛОВНЫХ ЗНАКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ КАРТ

Козлов Ю.А.[1], Егоров Т.С.[2]
ФГБУ «Гидроспецгеология», г. Москва
[1] kozloviurii@mail.ru, [2] tsegorov@mail.ru

Аннотация. Проанализированы основные этапы развития гидрогеологического картографирования. Представлены эталонная база знаков гидрогеологической карты и практическое пособие по ее применению. Описаны основные принципы реализации, структура и состав массива эталонных условных знаков. Показана необходимость ее обновления по мере повышения гидрогеологической изученности. Предложены области гидрогеологического картографирования, в которых может быть использован структурированный массив эталонных условных знаков.
Ключевые слова: *подземные воды, электронная база знаков, гидрогеологическое картографирование, практическое пособие*

Abstract. Main stages of hydrogeological mapping development are analyzed. Legend of conventional symbols and practical manual for it are presented. Main realization principles, structure and content of conventional symbols data set are described. The need to update it with the obtaining of hydrogeological knowledge is shown. Areas of hydrogeological mapping in which legend of conventional symbols can be used are offered.
Key words: *groundwater, legend of conventional symbols, hydrogeological mapping, practical manual*

В первой половине XX века гидрогеологические карты становятся основой для принятия управляющих решений в сфере рационального использования и добычи подземных вод. При этом карты отличались разнообразием как по содержанию, так и по форме представления. В 1960-е годы началась работа по их стандартизации и унификации [6]. В этот период карты составлялись, в основном, в однолистном варианте. По мере накопления опыта региональных гидрогеологических работ количество картографических материалов увеличивалось. Карты, представленные ранее на уровне схем и элементов зарамочного оформления, перешли в разряд самостоятельных, что потребовало разработки собственного набора условных знаков и нормативно-методических документов по их применению [1, 4, 5].

Развитие компьютерных технологий в конце XX века привело к использованию геоинформационных систем в гидрогеологии. Первая попытка ввода электронной базы знаков в гидрогеологическое картографирование была предпринята коллективом авторов ФГУП «ВСЕГИНГЕО» в 2014 г. [2]. Однако знаки не были представлены в электронном

виде, из-за чего отображение их на картах сильно отличалось от исполнителя к исполнителю даже внутри одного коллектива.

В 2023 г. сотрудниками ФГБУ «Гидроспецгеология» разработаны электронная база знаков гидрогеологических карт (ЭБЗ) в цифровом виде и практическое пособие [3] по ее использованию. При создании ЭБЗ были учтены нормативно-методические документы в области гидрогеологического и геологического картографирования, содержащие описание и правила использования условных знаков к гидрогеологическим картам масштабов 1:2 500 000 ÷ 1:200 000, а также опыт исполнителей, принимавших участие в составлении комплектов мелкомасштабных и среднемасштабных гидрогеологических карт. Целостность ЭБЗ обеспечивается заранее обозначенными принципами ее реализации, основными из которых являются:

1. Принцип единства стиля. Графические элементы одного класса оформляются по общему подобию. Цвета, ассоциированные с определенной группой знаков, распространяются на все обозначения этой группы. Например, зеленый цвет преимущественно используется для криогенных объектов.

2. Принцип наследования. Основное ядро массива условных знаков состоит из общепринятых условных обозначений, применяемых на гидрогеологических картах.

3. Принцип преемственности. Использование условных знаков из смежных направлений – топография, гидрография, геология. В тех случаях, когда для картографирования объекта уже имеются обозначения в других разделах картографии, предпочтение отдается уже существующему варианту, если только не возникает конфликтов с уже имеющимися знаками.

4. Принцип конкретизации. Уточнение условных знаков с учетом их гидрогеологической нагрузки. Если объект несёт на себе дополнительную гидрогеологическую нагрузку, то его условное обозначение и надписи к нему могут быть модифицированы в соответствии с его значением на карте.

ЭБЗ ориентирована на составление цифрового комплекта гидрогеологической карты масштабов 1:200 000 и 1:1 000 000, включающего: гидрогеологическую карту (ГГК); гидрогеохимическую карту основных водоносных подразделений (ГХК); карту защищенности основных водоносных подразделений (КЗОВП); карту прогнозных ресурсов подземных вод (КПРПВ), схему естественных ресурсов подземных вод (СЕРПВ), карту фактического материала (КФМ).

Основной базовой единицей ЭБЗ является уникальный условный знак, которым отображается картографический объект. Уникальные условные знаки объединены в слои, являющиеся составной частью раздела (подраздела). Содержание каждой карты комплекта формируется перечнем разделов (табл. 1).

В период разработки ЭБЗ происходила ее апробация на номенклатурных листах Арктической зоны Российской Федерации. Работа с ЭБЗ позволила получить опыт ее практического применения, дополнить и откорректировать условные знаки, составить макеты оформления условных обозначений для карт комплекта.

ЭБЗ является достаточно универсальной, но не может считаться завершенным продуктом. Повышение гидрогеологической изученности, появление нового опыта работы на территориях, отличающихся спецификой гидрогеологических условий, будет вызывать необходимость внедрения новых эталонных условных знаков или изменения старых. Поэтому ЭБЗ требуется постоянное обновление по результатам апробации на реальных объектах.

Таблица 1. Сводная таблица по картам комплекта

Разделы			Карты и схемы комплекта						
№№	Название	Кол-во условных знаков	ГГК	ГХК	КЗОВП	КПРПВ	СЕРПВ	КФМ	
								поле	ретро
1	Гидрогеологические подразделения	1706	I						
2	Преобладающий тип химического состава подземных вод	64		I					
3	Защищенность подземных вод	4			I				
4	Ресурсы подземных вод	22				I	I		
5	Гидрогеологическое районирование	3	II	II	II	II			
6	Маршрутные исследования	5						I	
7	Месторождения (участки месторождений) подземных вод	4				III			I
8	Водозаборы	2				IV		(II)	II
9	Водопункты	23	III	III				(II)	III
10	Типовые гидрогеологические колонки	1			III				
11	Пункты исследования поверхностных вод	6		IV			II	III	IV
12	Химический тип подземных вод в водопунктах	140	IV	V					
13	Техногенные объекты, являющиеся потенциальным источником загрязнения подземных вод	33			IV				
14	Гидродинамические показатели	16	V				III		
15	Минерализация подземных вод	3		VI		V			
16	Геокриологические условия	9	VI	VII	V	VI			
17	Проявления геологических процессов	15	VII		VI				
18	Компоненты, превышающие ПДК, в подземных водах	8		VIII					
19	Зоны с особыми условиями использования территорий	2				VII			
20	Площади для постановки гидрогеологических работ	3				VIII			
21	На разрезе и сводной гидрогеологической колонке	135	VIII						
22	На типовой гидрогеологической колонке	4			VII				
23	Прочие	9	IX	IX	VIII	IX	IV	IV	V

Структурированный массив эталонных условных знаков предназначен для средне- и мелкомасштабного гидрогеологического картографирования, при этом он может быть использован для широкого спектра гидрогеологических задач, включающих: обзорное и крупномасштабное картографирование, поисково-оценочные и разведочные работы на подземные воды и другие.

Список литературы

1. Альтовский М.Е. Методические указания по составлению гидрогеологических карт масштабов 1:1 000 000 – 1:500 000 и 1:200 000 – 1:100 000. М.: ВСЕГИНГЕО, 1960.

2. Егоров Т.С. Опыт создания и применения структурированного фонда гидрогеологической информации при мелкомасштабном картографировании // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2022. – № 1. – С. 58-68.

3. Егоров Т.С., Козлов Ю.А. Практическое пособие по ведению и использованию структурированного массива эталонных условных знаков гидрогеологических карт масштаба 1:200 000. Версия 1.2. – М.: ФГБУ «Гидроспецгеология», 2023. 128 с.

4. Зайцев И.К. Типовые условные обозначения для карт разного геологического содержания. Карта подземных вод. Л.: ВСЕГЕИ, 1978. 12 с.

5. Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов государственных гидрогеологических карт Российской Федерации масштабов 1:1 000 000 и 1:200 000. М.: Минприроды, Роснедра, ФГУП «ВСЕГИНГЕО», 2015. 112 с.

6. Struckmeier W.F., Margat J. Hydrogeological maps: a guide and a standard legend // International Association of Hydrogeologists. - Hannover: Heise, 1995 (International contributions to hydrogeology; Vol. 17).

ВОПРОСЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Кокорева С.В., Паркина В.А.
ФГБУ «Гидроспецгеология», Москва,
kokoreva@geomonitoring.ru, parkina@geomonitoring.ru

Аннотация. Охарактеризовано целевое назначение гидрогеологического районирования, выделены основные этапы, современное состояние и основные результаты работ по созданию современной цифровой карты гидрогеологического районирования территории России, подробно освещены результаты работ последних лет по Уральскому, Сибирскому и Дальневосточному регионам, намечены направления работ, направленные на повышение актуальности результирующих картографических материалов по гидрогеологическому районированию.
Ключевые слова: *подземные воды, гидрогеологическое районирование, картографическая основа.*

Abstract. The purpose and actual principles of hydrogeological zoning are characterized, the main stages, the current state and the main results of work on the creation of a modern digital map of hydrogeological zoning of the territory of Russia are highlighted, the results of recent years in the Ural, Siberian and Far Eastern regions are highlighted, the directions of work aimed at increasing the relevance of the resulting cartographic materials on hydrogeological zoning are outlined.
Key words: *ground water, hydrogeological zoning, cartographic basis.*

Работы по гидрогеологическому районированию выполняются в целях обеспечения единого информационного пространства для выделения объектов подземных вод, изучения, оценки, анализа, обобщения, картографирования и прогноза пространственно-временных изменений состояния подземных вод по количественным и качественным показателям в природных и нарушенных хозяйственной деятельностью условиях, учета состояния ресурсной базы подземных вод и ее использования.

В основу гидрогеологического районирования положен структурно-гидрогеологический принцип, учитывающий следующие главные признаки, определяющие индивидуальность формирования подземных вод в различных гидрогеологических структурах:

- структурно-тектоническое положение гидрогеологических структур;
- тип гидрогеологических структур;
- особенности строения разреза гидрогеологических структур;
- характер водоносности пород гидрогеологических структур;
- направленность подземного стока от области питания к конечному базису разгрузки.

Основной единицей районирования является гидрогеологическая структура, под которой понимается соответствующая ей геологическая структура (ее часть или совокупность геологических структур), обладающая общностью (однородностью) условий формирования и распространения подземных вод, что определяет характер фильтрации, направленность подземного стока и гидрогеологическую индивидуальность этой структуры, представляющую собой целостную балансовую (с гидрогеологических позиций) единицу.

Гидрогеологическое районирование проводится по системе соподчиненных таксономических единиц регионального районирования, в котором выделяются: провинция, подпровинция, район. Этим таксономическим единицам соответствуют гидрогеологические структуры I, II и III порядков.

Информационной основой для проведения работ по гидрогеологическому районированию прежде всего являются материалы, полученные по результатам работ по региональным геологическим работам мелкого и среднего масштабов, особенно по гидрогеологической изученности. Нетрудно заметить, что площадь ЕТР является наиболее изученной в гидрогеологическом отношении (рис. 1).

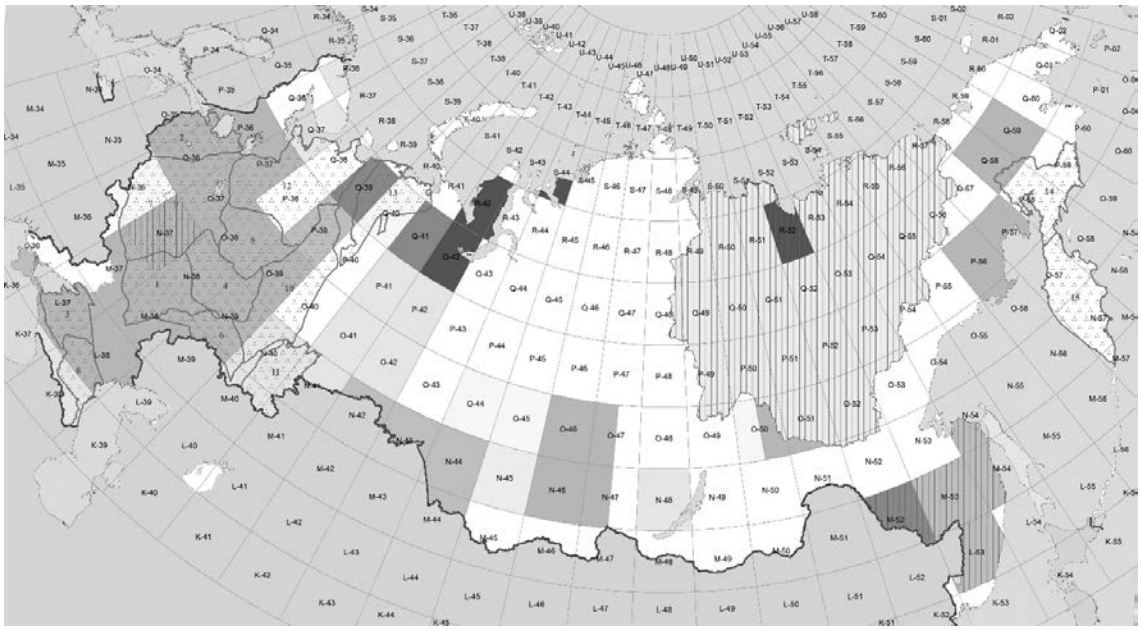


Рис. 1. Схема мелкомасштабной изученности территории России

В 2012 году завершено создание региональной унифицированной основы для информационного обеспечения проведения работ по ведению мониторинга подземных вод в составе государственного мониторинга состояния недр (далее - ГМСН) [1]. Основа существует в целях эффективного обеспечения деятельности ГМСН, государственного водного реестра по подземным водным объектам, учета ресурсной базы различных типов подземных вод, а также лицензирования участков недр, предоставляемых в пользование, а с 2016 года вышеуказанная основа также является и основой проведения работ по гидрогеологической съёмке.

В конце 2015 года ФГУП «ВСЕГИНГЕО» совместно с ФГУГП «Гидроспецгеология» подготавливают методику общего гидрогеологического районирования, содержащую основные положения и вопросы общего гидрогеологического районирования; таксономический ряд объектов районирования до III порядка включительно, картографируемых на карте районирования масштаба 1:2 500 000, и их определения; требования к характеристике выделяемых районов, их границам и т.д. [2] Также были проведены работы по актуализации карты общего гидрогеологического районирования масштаба 1:2 500 000.

В связи с увеличением прироста гидрогеологической изученности, в частности на территориях опережающего развития (Арктическая зона России, Дальний Восток) по направлению сводного и обзорного картографирования масштаба 1 : 2 500 000, в рамках выполнения работ по государственным заданиям за период с 2019 по 2022 гг. ФГБУ «Гидроспецгеология» подготовлена актуализированная гидрогеологическая карта России масштаба 1:2 500 000 (рис. 2). В основу карты положены результаты выполненных в 2007-2019 гг. региональных работ по изучению геологического строения и условий формирования и локализации подземных вод на территории России. Геологической основой являлась актуализированная Государственная геологическая карта России и прилегающих акваторий масштаба 1:2 500 000 (2018 г.) [3].

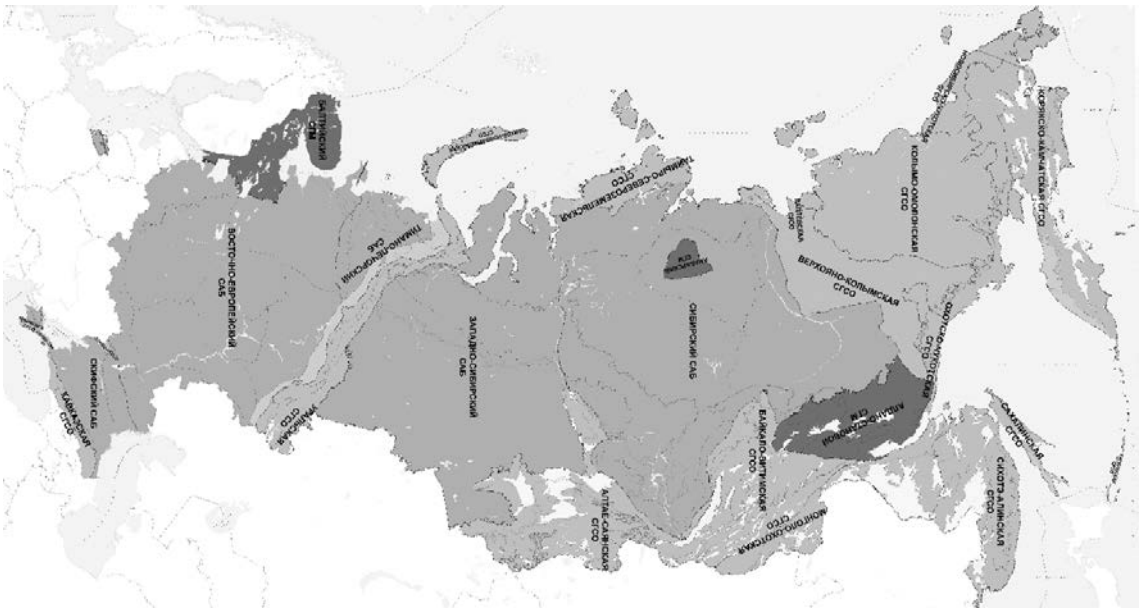


Рис. 2. Актуализированная гидрогеологическая карта России масштаба 1:2 500 000. Разгруженный экземпляр карты (без некоторых элементов топографической и математической основы, а также с надписанными гидрогеологическими структурами 1 порядка)

Очевидно, Актуализированная Карта гидрогеологического районирования территории РФ масштаба 1:2 500 000 (далее – Карта), после своего утверждения станет обязательной картографической основой при выполнении региональных работ государственных масштабов, ведении мониторинга состояния недр, а также оценке ресурсного потенциала гидрогеологических структур. В ходе работ над картой также актуализированы унифицированные схемы гидрогеологической стратификации для артезианских бассейнов II порядка в пределах Европейской территории России, Тазовско-Пурского и Иртыш-Обского артезианских бассейнов в пределах Западно-Сибирского сложного артезианского бассейна и Ангаро-Ленского артезианского бассейна в пределах Сибирского сложного артезианского бассейна. Составлены впервые унифицированные схемы гидрогеологической стратификации для Хатангского, Оленекского, Тунгусского и Якутского артезианских бассейнов II порядка в пределах Сибирского сложного артезианского бассейна, а также для всех артезианских бассейнов III порядка, расположенных в пределах платформ, сложных гидрогеологических складчатых областей и сложных гидрогеологических массивов. Выделены новые типы объектов гидрогеологической стратификации чехла артезианских бассейнов и нестратифицируемых разрезов гидрогеологических массивов складчатых областей, щитов и регионов многолетней мерзлоты. Актуализированы перечень и классификатор гидрогеологических структур и гидрогеологических подразделений, распространенных на территории Российской Федерации.

Актуализация карты гидрогеологического районирования территории России масштаба 1:2 500 000 и унифицированных схем гидрогеологической стратификации выполнялись поэтапно, в том числе на 1 этапе (2019 г.) на территории ЕТР, 2 этап (2020 г.) – Дальневосточный регион, 3 этап (2021 г.) – Сибирский регион, 4 этап (2022 г.) – Уральский регион.

В ходе работ по актуализации гидрогеологической карты внесены дополнения в типизацию объектов гидрогеологической стратификации, таксономический ряд объектов гидрогеологической стратификации чехла артезианских бассейнов дополнился водоносным криогенно-таликовым комплексом и водоносным криогенно-таликовым горизонтом, объекты нестратифицируемых разрезов гидрогеологических массивов

складчатых областей и щитов и регионов многолетней мерзлоты дополнились водоносной криогенно-таликовой зоной и криогенной зоной.

Изменен принцип классификации объектов гидрогеологической стратификации, все гидрогеологические подразделения, выделенные в пределах Дальневосточного, Сибирского и Уральского регионов получили свой уникальный код.

В заключение важно отметить, что работы по гидрогеологическому районированию не следует проводить с длительными перерывами между собой, так как они тесно связаны с ежегодными приростами гидрогеологической и геологической изученности. Также, в октябре 2023 года научно-редакционным советом Федерального агентства по недропользованию (Роснедра) рассмотрена и одобрена созданная сотрудниками Института Карпинского новая цифровая тектоническая карта территории Российской Федерации и прилегающих акваторий масштаба 1:2 500 000. Требуют доработки вопросы присвоения кодов новым объектам гидрогеологического районирования и учет возраста фундамента артезианских структур на картографических материалах.

Исходя из вышесказанного, результаты работ по созданию и актуализации карты гидрогеологического районирования территории России представляют собой ценный теоретический и практический интерес, а также являются картографической основой в части принятия решений по управлению водными ресурсами совместного ведения Российской Федерации и её субъектов.

Список литературы

1. Карта гидрогеологического районирования территории Российской Федерации масштаба 1: 2 500 000. ФГУГП «Гидроспецгеология», 2011 г. — М.: Роснедра, 2012

2. Челидзе, Ю.Б. Общее гидрогеологическое районирование как основа системного геологического изучения недр, использования и оценки состояния ресурсного потенциала подземных вод России / Ю.Б. Челидзе, В.А. Барон, С.Л. Пугач, С.В. Кокорева // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 5. — С. 41–49.

3. Попов Е.В. Региональные гидрогеологические и инженерно-геологические работы. Состояние, основные результаты, проблемы и перспективы / Попов Е.В., Лыгин А.М., Лукьянчиков В.М., Крестин Б.М., Новик Ю.В., Балашов В.А., Кокорева С.В., Грохольская К.Д., Паркина В.А., Сироткин Д.В. // Разведка и охрана недр. — 2023. — № 11. — С. 45–52.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ СЕЙСМОГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ЗАДАЧАХ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Копылова Г.Н., Болдина С.В.
Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», Камчатский филиал, Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru

Аннотация. Представлены результаты верификации изученности сейсмогидрогеодинамических эффектов в изменениях давления подземной воды в связи с сильными землетрясениями (СГГЭ) по данным наблюдений в пьезометрических скважинах Восточной Камчатки. Авторами созданы (1) унифицированная методика диагностики СГГЭ на предсейсмической, ко- и постсейсмических стадиях землетрясений; (2) типизация и модели основных типов СГГЭ для отдельных наблюдательных скважин. Верификация результатов исследования СГГЭ проводится по данным скважинных наблюдений 2023 г. и анализа прогнозов землетрясений, сделанных авторами в режиме реального времени за 21-летний период сотрудничества с Камчатским филиалом Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений.

Ключевые слова: *скважина, подземные воды, сейсмогидрогеодинамические эффекты, предвестники землетрясений.*

Abstract. The verification of the knowledge of seismic hydrogeodynamic effects (SHGE) in groundwater pressure changes in connection with strong earthquakes are presented according to observation data in piezometric wells in Eastern Kamchatka. The authors created (1) a unified methodology for diagnosing SHGE in pressure changes at the pre-, co- and post-seismic stages of earthquakes; (2) typification and models the main types of SHGE for the individual observation wells. Verification of the research results is carried out using data on the SHGE recorded during earthquakes in 2023, and analysis of earthquake forecasts made by the authors in real time over a 21-year period of cooperation with the Kamchatka branch of the Russian Expert Council for Earthquake Forecasting.

Key words*: well, undergroundwater, seismic hydrogeodynamic effects, earthquake precursors.*

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) проводит многолетние наблюдения в пьезометрических скважинах за вариациями давления подземных вод с целью изучения сейсмогидрогеодинамических эффектов (СГГЭ) на стадиях подготовки, реализации землетрясений и восстановления свойств водовмещающих пород после сейсмического воздействия. Описание строения скважин, регистрирующей аппаратуры, методики наблюдений и обработки данных, а также выявленных сейсмогидрогеодинамических эффектов при местных и удаленных землетрясениях, приводятся в [1-10].

Данные о СГГЭ используются для их типизации с учетом морфологических особенностей, продолжительности проявления и связи с параметрами землетрясений. Главными генетическими типами СГГЭ являются: *гидрогеодинамические предвестники*, проявляющиеся на стадии подготовки землетрясений (ГП); *косейсмические эффекты* изменения статического напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах землетрясений (КСЭ_1) и при воздействии сейсмических волн (КСЭ_2); *постсейсмические эффекты* (ПСЭ) при изменении состояния системы «скважина - водовмещающая порода» в результате сейсмического воздействия. Последовательность проявления генетических типов СГГЭ: ГП $\rightarrow$ КСЭ $\rightarrow$ ПСЭ, отражает стадийность сейсмического воздействия на состояние системы скважина – водовмещающая порода и проявляется в изменениях давления подземной воды наиболее отчетливо при сильных ($M_w \geq 6.6$) местных землетрясениях, сопровождающихся сотрясениями интенсивностью не менее 4-6 баллов по шкале *MSK*-64 в районах скважин. Особенности СГГЭ в отдельных скважинах определяются комплексом локальных гидрогеологических условий: строением вскрытой толщи водовмещающих пород, их фильтрационными и упругими свойствами, наличием либо

отсутствием газа в составе порово-трещинной воды и др.

Наиболее длительные ряды наблюдений получены в скважинах Е-1 (с 1987 г., 36 лет) и ЮЗ-5 (с сентября 1997 г., 25.3 года). Описание СГГЭ, зарегистрированных в скв. Е-1, включая два вида гидрогеодинамических предвестников ГП_1 и ГП_2, дано в работах [4-6, 9]. Результаты исследования ГП_1 и ретроспективные оценки его эффективности прогнозирования землетрясений показали возможность применения этого предвестника для прогнозирования местных сильных землетрясений с M≥5.0 с заблаговременностью сутки – первые десятки суток.

Сейсмогидрогеодинамические эффекты, диагностированные по данным наблюдений в скв. ЮЗ-5, рассмотрены в работе [10], в которой дано описание предполагаемых ГП перед двумя землетрясениями с M_w=7.8 и 7.2 в форме отклонений тренда в изменениях давления воды от поведения сезонной функции напора в районе скважины. Амплитуды таких относительных повышений давления подземной воды в течение первых месяцев перед землетрясениями составляли 10 и 30 гПа.

С 2002 г. данные текущих наблюдений в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 используются для составления еженедельных заключений о наличии/отсутствии ГП. При обнаружении ГП, в заключении дается оценки времени, места и силы ожидаемого землетрясения на основе ретроспективного анализа связи между проявлениями ГП и землетрясениями [9]. Такие заключения передаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС). По оценкам КФ РЭС, за время с 2022 по 2022 гг., на основе выявленных в режиме реального времени ГП_1, были осуществлены прогнозы шести землетрясений с M=5.3–7.2, в т. ч. четырех наиболее сильных землетрясений с магнитудами M_w=6.4–7.2, произошедших на расстояниях 80–350 км от скв. Е-1.

Одной из задач скважинных наблюдений, проводимых с целью сейсмического прогнозирования, является проверка и подтверждение связей между проявлениями различных типов СГГЭ в наблюдательных скважинах с параметрами землетрясений, т. е. их верификация. Особенно необходима верификация данных о гидрогеологических предвестниках, которые используются для сейсмического прогнозирования. Такая верификация осуществляется при возникновении сильных местных землетрясений и сопоставления зарегистрированных эффектов в изменениях давления воды с имеющимися типизациями СГГЭ [8-10].

03 апреля 2023 г. на Камчатке произошло землетрясение с M_w=6.6 (таблица) на эпицентральных расстояниях от скважин d_e=67–77 км (гипоцентральные расстояния d_h=116–122 км) (ниже **ЗТ**). Интенсивность сотрясений в районах наблюдений составила 6 баллов. На рис. 1 представлены данные наблюдений за вариациями давления воды в скважинах ЮЗ-5 (А) и Е-1 (Б). В подписи к рис. 1 приводится характеристика зарегистрированных сейсмогидрогеодинамических эффектов при этом ЗТ по данным оперативной обработки [3] с последующим уточнением их параметров.

Таблица. Параметры землетрясения 03.04.2023 г. по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН и по определениям мировых сетей сейсмических станций (http://www.globalcmt.org/; https://earthquake.usgs.gov/)

Дата дд.мм.гг	Время чч:мм	Координаты гипоцентра,			Магнитуда M_w			Механизм очага Global CMT			
		с. ш., град.	в. д., град	H, км	КФ ФИЦ ЕГС РАН	Global CMT	NEIC (USGS)	Азимут простирания φ_s, град.	Угол падения δ, град.	Угол подвижки λ_s,град.	Скалярный сейсмический момент M_0, Н·м·10^{20}
03.04.2023	03:07	52.58	158.76	95	6.6	6.6	6.5	215/104	86/10	80/159	0.1

В скв. ЮЗ-5 последовательно проявились: предполагаемый предвестник (рис. 1, Ав, верхний график), косейсмический скачок понижения давления КСЭ_1 (Аб) и постсейсмический эффект, соответствующий типу IV вибрационного воздействия сейсмических волн [7] (Ав, нижний график).

В скв. Е-1 (рис. 1 Б) проявлялись ГП_1, выявленный в реальном времени с представлением заключения в КФ РЭС, и постсейсмический эффект ПСЭ. Продолжительность ГП_1 составила 91 сут. Заблаговременность предупреждения о возможном сильном землетрясении - 76 сут. С 19 января и до ЗТ авторы еженедельно уведомляли КФ РЭС о продолжении развития ГП_1 и опасности сильного землетрясения.

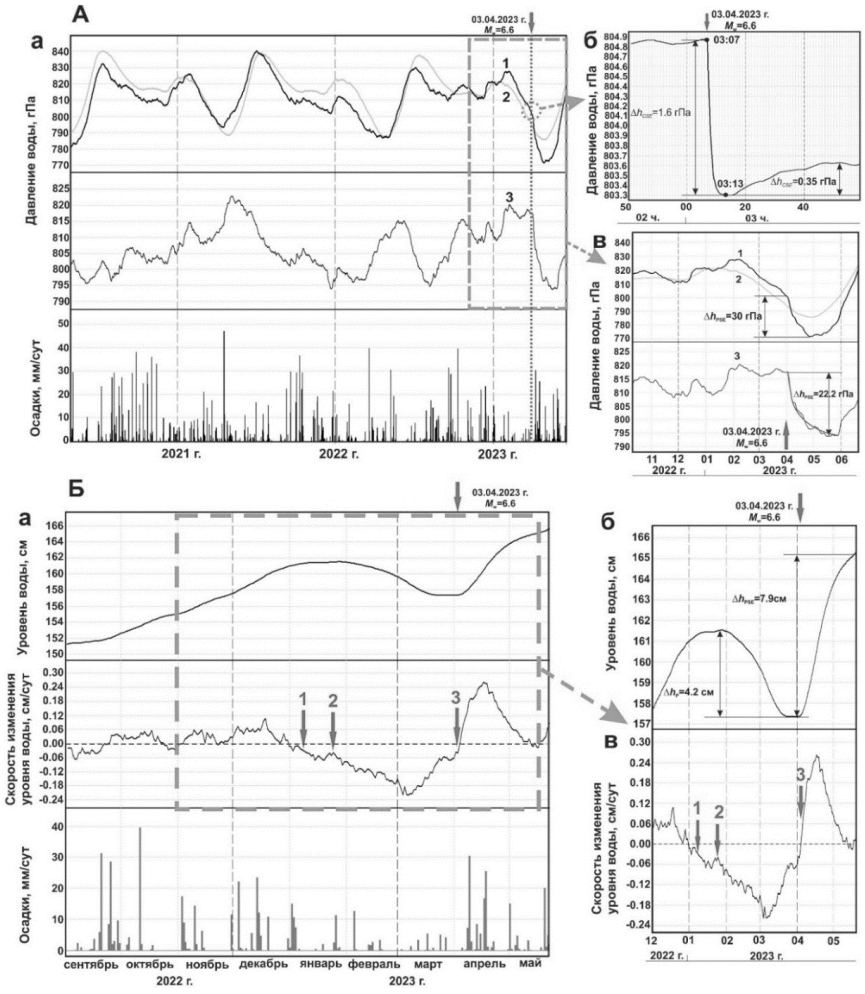


Рис. 1 – Вариации давления воды в скважинах ЮЗ-5 (А) и Е-1 (Б) в период землетрясения 3 апреля 2023 г., *M*w=6.6. В скв. ЮЗ-5 проявились: предполагаемый ГП (Ав, верхний график) в форме повышенных величин давления в феврале-марте, по сравнению с поведением среднесезонной функции напора по многолетним данным (серая линия); косейсмический скачок понижения давления с амплитудой 1.6 гПа (Аб, КСЭ_1); постсейсмическое понижение давления с амплитудой 22.2 гПа в течение апреля-мая (Ав, нижний график, ПСЭ). В скв. Е-1 проявились: ГП_1 – понижение давления с повышенной скоростью и постсейсмический эффект (ПСЭ) в форме повышения давления с амплитудой 7.9 см в течение двух месяцев (Ба-в). Стрелками с цифрами 1-3 на графике среднесуточной скорости изменения давления Ба (средний график) и Бв показано: 1 – начало проявления предвестника ГП_1 (4 января); 2 – дата подачи прогнозного заключения в КФ РЭС (19 января); 3 – землетрясение 3 апреля 2024 г.

Зарегистрированные СГГЭ в двух наиболее изученных скважинах при ЗТ можно использовать для верификации ранее предложенных типизаций СГГЭ для этих скважин [8-10]. На рис. 2 представлены диаграммы распределения различных типов СГГЭ, диагностированных за весь период наблюдений в скв. ЮЗ-5 (А) и в скв. Е-1 (Б), в сопоставлении с данными о СГГЭ в период ЗТ. На таких диаграммах, построенных в координатах, магнитуда M_w – эпицентральное расстояние d_e (в км), также показаны наклонными линиями расчетные величины сейсмической энергии в районах наблюдений e (в Дж/м^3) и максимальные линейные размеры очагов землетрясений L (в км), в зависимости от величин M_w и d_e. В поле диаграмм условными обозначениями показаны произошедшие землетрясения и зарегистрированные типы СГГЭ при этих землетрясениях.

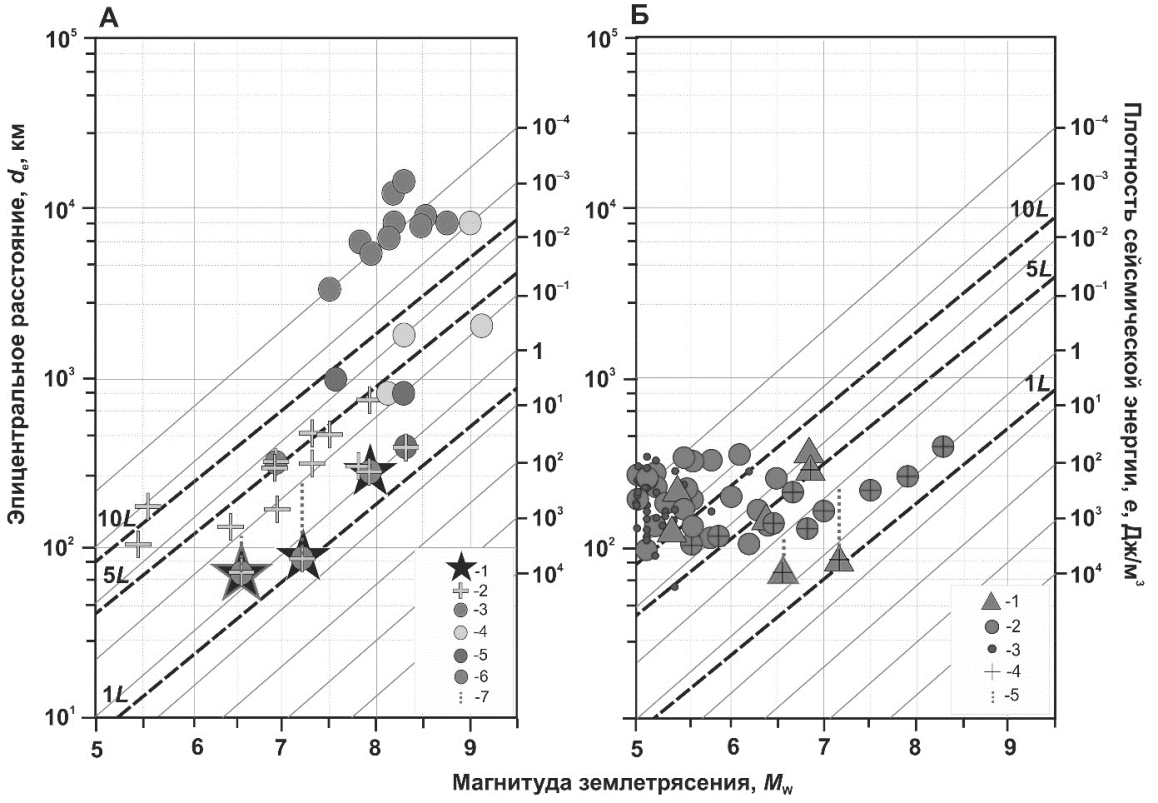


Рис. 2. – Распределение различных типов СГГЭ в зависимости от величин магнитуды M_w и эпицентрального расстояния землетрясений до скважин d_e, плотности сейсмической энергии e, величины линейного размера очага землетрясения L (1L, 5L, 10L – один, пять и десять максимальных линейных размеров очагов землетрясений) в сопоставлении с данными по СГГЭ при землетрясении 3 апреля 2023 г. (выделено красной обводкой) по данным наблюдений: в скважине ЮЗ-5 (А): 1 – предполагаемые предвестники ГП, 2 – косейсмические скачки давления, КСЭ_1, 3-6 – вибрационные эффекты воздействия сейсмических волн: 3 – тип I, 4 – тип II, 5 – тип III, 6 – тип IV (типы I-IV по [7]); в скважине Е-1 (Б): 1 – ГП_1, диагностированный в режиме реального времени с предоставлением заключений в КФ РЭС; 2 – ГП_1, выделенные ретроспективно [4]; 3 – землетрясения, перед которыми ГП_1 не проявлялся; 4 – постсейсмический эффект ПСЭ в форме повышения давления воды с амплитудами не менее 2 см водяного столба (≈2 гПа).

Такое представление СГГЭ позволяет отобразить в компактном виде взаимосвязь между зарегистрированными эффектами в изменениях давления воды в отдельных скважинах с энергетическими, пространственными и др. характеристиками

сейсмических событий, вызывающих такие эффекты, а также оценить удаленность скважины от очага землетрясения по отношению d_e/L. С использованием данных рис. 2 можно давать содержательное описание проявлений характерных типов СГГЭ в скважинах ЮЗ-5 (А) и Е-1 (Б) в зависимости от энергетических и пространственных параметров землетрясений, сопровождающихся определенными типами СГГЭ.

Например, в скв. ЮЗ-5 по данным 1997-2023 гг. ГП появлялся перед землетрясениями с M_w=7.2 и 7.8 (L = 76–139 км) на эпицентральных расстояниях d_e=86–200 км (d_e/L = 1–3). (рис. 2 А). Интенсивность сейсмического воздействия в районе скважины во время этих землетрясений составляла 5–6 баллов при значениях e=0.4 – 4 Дж/м^3. При таких землетрясениях, кроме ГП, также проявлялись КСЭ_1 и ПСЭ, соответствующий типу IV вибрационного воздействия сейсмических волн. Произошедшее 3 апреля 2023 г. землетрясение сопровождалось аналогичным набором сейсмогидрогеодинамических эффектов при сопоставимых величинах параметров этого ЗТ и сейсмического воздействия в районе скважины. Это является подтверждением правильности предложенной ранее типизации СГГЭ для скв. ЮЗ-5 [10] в части наиболее сильных и близких местных землетрясений.

Убедительным показателем верификации ранее созданной типизации сейсмогидрогеодинамических эффектов для скв. Е-1 [4, 9] является успешный прогноз землетрясения 3 апреля 2023 г. с использованием ГП_1 (рис. 1 Б), подтвержденный КФ РЭС. После ЗТ наблюдалось плавное повышение давления воды с амплитудой ≈8 см в течение двух месяцев, что также является характерным постсейсмическим эффектом в связи с местными сильными (в основном, с M_w≥6.5) землетрясениями на расстояниях не более 200 км от скважины (рис. 2 Б).

Представление данных о СГГЭ в виде диаграмм (рис. 2) позволяет не только решать задачи геофизического мониторинга и прогнозирования землетрясений, но также может быть полезным при общей оценке влияния сейсмичности на режим подземных вод.

Благодарности. *Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».*

Список литературы

1. Болдина С.В. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., M_w=7.2, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка / С.В. Болдина, Г.Н. Копылова // Геодинамика и тектонофизика. − 2017. − Т. 8. − № 4. С. 863−880. − https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321.

2. Болдина С.В. Исследование эффектов землетрясений в изменениях давления подземных вод: аппаратура и некоторые результаты наблюдений в скважинах полуострова Камчатка / С.В. Болдина, Г.Н. Копылова, В.А. Кобзев // Геодинамика и тектонофизика. −2022. − Т. 13. − № 2. − С. 0594. − https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0594.

3. Болдина С.В. Гидрогеологические эффекты землетрясения 03 апреля 2023 г., M_w=6.6 в районе полуострова Камчатка (по данным прецизионных наблюдений в скважинах) / С.В. Болдина, Г.Н. Копылова // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. [Электронный ресурс]: Труды Девятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 24–30 сентября 2023 г. / Отв. ред. Д. В. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 28-33.

4. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987-1998 гг.) / Г.Н. Копылова // Вулканология и сейсмология. 2001. − № 2. − С. 39−52.

5. Копылова Г.Н. О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Восточная Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008-2009 гг. и сильными (M≥5) землетрясениями / Г.Н. Копылова, С.В. Болдина // Вулканология и сейсмология. − 2012. − № 5. − С. 41−54. − https://doi.org/10.1134/S074204631205003X.

6. Копылова Г.Н. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. / Г.Н. Копылова, С.В. Болдина. Монография. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2019. − 144 с. − ISBN: 978-5-9610-0344-4

7. Копылова Г.Н. Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели / Копылова Г.Н., С.В. Болдина // Физика Земли. − 2020. − №4. − С. 102–122. − https://doi.org/10.31857/S0002333720030035.

8. Копылова Г.Н. Сейсмогидрогеологические эффекты как проявление триггерного воздействия землетрясений на подземные воды (на примере скважин Петропавловск-Камчатского полигона, полуостров Камчатка) / Копылова Г.Н., С.В. Болдина // Физика Земли. − 2023. − № 3. − С. 78–95. − https://doi.org/10.31857/S0002333723030079.

9. Kopylova G. and Boldina S. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study from the Kamchatka Peninsula // Front. Earth Sci. − 2020. − V. 8. − P. 576017. − https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017.

10. Kopylova G.; Boldina, S. Seismo-Hydrogeodynamic Effects in Groundwater Pressure Changes: A Case Study of the YuZ-5 Well on the Kamchatka Peninsula // Water. − 2023. − V. 15. − P. 2174. − https://doi.org/10.3390/w15122174.

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ (КОМПЛЕКСОВ) ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ПЛИТЫ МАСШТАБА 1:1 000 000 ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ С ЦЕЛЬЮ ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Котович А.Д.
ФГБУ «Гидроспецгеология», Москва, anastasiya.sirotova@yandex.ru

Аннотация. Приведены аргументы в пользу проведения региональной оценки геолого-гидрогеологических условий в масштабе всей страны для целей захоронения жидких промышленных отходов. Одной из организаций, начавшей гидрогеологические исследования в этой области, стала ФГБУ «Гидроспецгеология».За период 2020–2022 гг. завершено создание комплекта цифровых специализированных гидрогеологических карт распространения глубокозалегающих водоносных горизонтов (комплексов) Западно-Сибирской плиты масштаба 1:1 000 000 для использования с целью, не связанной с добычей полезных ископаемых. В настоящее время выполняются работы по созданию аналогичного комплекта карт по территории Сибирской платформы. Изложена структура комплектов специализированных гидрогеологических карт для восьми надпорядковых структур, выделенных в пределах Западно-Сибирской плиты.

Ключевые слова: *жидкие промышленные отходы, перспективный водоносный горизонт, буферный горизонт, специализированная гидрогеологическая карта.*

Annotation. The arguments are presented in favor of conducting a regional assessment of geological and hydrogeological conditions on a national scale for the disposal of liquid industrial waste. One of the organizations that began hydrogeological research in this area was the Federal State Budgetary Institution "Hydrospetzgeologiya". A set of digital specialized hydrogeological maps of the distribution of deep-lying aquifers (complexes) of the West Siberian plate for purposes not related to mining on the scale 1:1 000 000 was created in the period of 2020–2022. Currently, work is underway to create a similar set of maps on the territory of the Siberian platform.The sets of specialized hydrogeological maps for eight tectonic structures identified within the West Siberian Plate is outlined.

Key words: *liquid industrial waste, promising aquifer, buffer horizon, specialized hydrogeological map.*

По мере развития атомной, химической, горнодобывающей промышленностей, а также ядерной энергетики и военно-промышленных комплексов появилась новая задача – защита среды обитания человека от разного рода промышленных отходов, в том числе и от жидких токсичных отходов.

С помощью подземного захоронения жидкие токсичные промышленные отходы удаляются из непосредственной среды обитания человека. Надежная длительная природная изоляция предотвращает поступление токсичных компонентов в зону активного водообмена и далее в биологические цепочки. Подземное захоронение является основной альтернативой накоплению жидких отходов на поверхности земли и сбросу их в водные объекты.

В связи с вышесказанным появилась необходимость в региональной оценке геолого-гидрогеологических условий в масштабе всей страны для целей захоронения жидких промышленных отходов.

ФГБУ «Гидроспецгеология» стало одной из первых организаций, начавшей гидрогеологические исследования для захоронения жидких промышленных отходов в недра земли. И теперь, одним из ее основных направлений региональных работ, является создание комплектов специализированных гидрогеологических карт условий захоронения жидких токсичных промышленных отходов в глубокозалегающие водоносные горизонты 1:1 000 000 масштаба.

До этого в 2013 году специалистами ФГБУ «Гидроспецгеология» и Федерального агентства по недропользованию (Роснедра) на территорию Российской Федерации (по каждому федеральному округу) был создан «Атлас специализированных карт условий захоронения промышленных отходов различной степени опасности» (главные редакторы А.А. Анненков, А.Ф. Морозов, В.И. Осипов) [1, 3]. Одной из карт, входящих в состав Атласа, является «Карта геолого-гидрогеологических условий захоронения жидких токсичных промышленных отходов в глубокие водоносные горизонты (комплексы) масштаба 1:2 500 000».

Цифровые карты масштаба 1:1 000 000 составляются на те территории Российской Федерации, которые на карте масштаба 1:2 500 000 показаны в качестве перспективных для постановки дальнейших исследований с целью выявления участков недр для возможного захоронения жидких токсичных промышленных отходов.

За период 2017–2019 гг. специалистами ФГБУ «Гидроспецгеология» завершены работы по созданию комплекта цифровых специализированных гидрогеологических карт распространения глубокозалегающих водоносных горизонтов (комплексов) Европейской территории Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 для использования с целью, не связанной с добычей полезных ископаемых.

В 2020–2022 гг. создан аналогичный комплект карт по Западной-Сибирской плите.

В настоящее время выполняются работы по созданию комплекта цифровых специализированных гидрогеологических карт глубокозалегающих водоносных горизонтов (комплексов) масштаба 1:1 000 000 по территории Сибирской платформы.

Глубокие водоносные горизонты, которые могут использоваться для захоронения, приурочены к определенным типам тектонических структур, обеспечивающим надежность процесса захоронения. Поскольку возможность захоронения жидких отходов производства зависит в большей степени от региональных условий, определяющихся тектоническим строением и характером водообмена.

Выделение и характеристика глубокозалегающих горизонтов (комплексов), перспективных для захоронения жидких отходов производства, буферных горизонтов и перекрывающих их водоупорных толщ приводится по надпорядковым тектоническим структурам. В пределах Западно-Сибирской плиты выделяются следующие надпорядковые структуры: Южно-Карская (I), Ямало-Гыданская (II), Надым-Тазовская (IV) и Обская (VI) синеклизы; Приуральская (III), Ишимско-Иртышская (VII), Кулундино-Кетская (VIII) и Приенисейская (V) моноклизы (рис. 1).

На основе комплексного анализа тектонического строения, литолого-фациальных характеристик, гидрогеологических параметров, геофизических исследований выполнена оценка глубокозалегающих водоносных горизонтов Западно-Сибирской

плиты и, в соответствии с требованиями [4], выделены глубокозалегающие (в зонах замедленного и весьма замедленного водообмена) водоносные горизонты (комплексы), перспективные для подземного захоронения жидких промышленных отходов и разделяющие их водоупорные толщи [2]. Всего на территории Западно-Сибирской плиты 16 водоносных горизонтов (комплексов), перспективных для захоронения, и 12 водоупорных горизонтов.

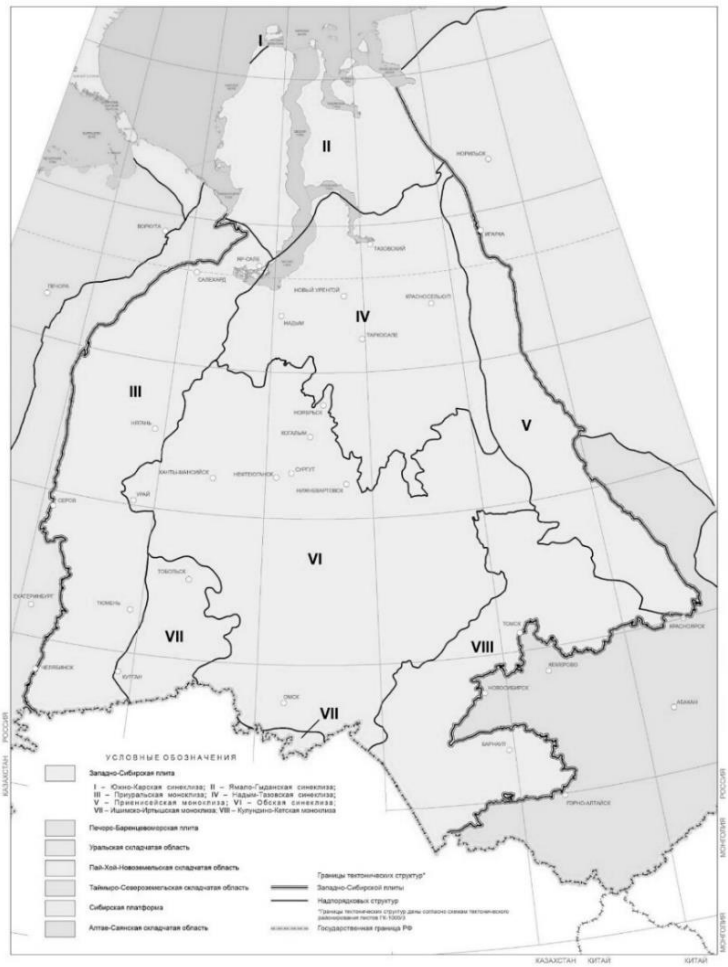


Рис. 1 Схема структурно-тектонического районирования Западно-Сибирской плиты

В пределах каждой тектонической структуры по выделенным гидрогеологическим подразделениям построены погоризонтные параметрические карты масштаба 1:1 000 000, где отражены их мощность, глубина залегания кровли (абсолютные отметки) и гидрогеологические параметры для водоносных горизонтов.

На основе погоризонтных параметрических карт распространения глубокозалегающих водоносных горизонтов (комплексов), перспективных для размещения жидких отходов производства, и разделяющих их водоупорных толщ, составлены специализированные гидрогеологические карты распространения глубокозалегающих водоносных горизонтов (комплексов) масштаба 1:1 000 000 для использования с целью, не связанной с добычей полезных ископаемых в пределах надпорядковых структур.

В состав комплекта также входят схематические гидрогеологические разрезы, характеризующие основные гидрогеологические особенности исследуемой территории и условия залегания гидрогеологических подразделений; экспликационные таблицы гидрогеологических подразделений, составляющиеся с целью выявления закономерностей распространения гидрогеологических подразделений в пределах

изучаемой территории (особое внимание уделяется корреляции гидрогеологической и геологической стратификации, на основе этого выделяются участки с различными условиями захоронения); опорные колонки, которые характеризуют выделенные участки (приводится тип гидрогеологического подразделения, литологический состав и гидрогеологические параметры) и каталоги опорных скважин, куда заносятся тип коллектора, абсолютная отметка кровли и мощность горизонта, дебит, понижение, удельный дебит, водопроводимость, коэффициент фильтрации, минерализация подземных вод, пористость, проницаемость и коэффициент приемистости.

В объяснительных записках приведено описание выделенных горизонтов (комплексов) с их характеристикой (минерализация, уровни и напоры, питание подземных вод; внешние и внутренние граничные условия формирования подземных вод; мощности и абсолютные отметки кровли водоносных горизонтов и разделяющих их водоупорных толщ; литологический состав водоносных горизонтов и водоупорных толщ, гидрогеологические параметры водоносных горизонтов).

По итогам проделанной работы установлено, что большая часть территории Западно-Сибирской плиты является пригодной для захоронения, кроме ее западной, восточной и юго-восточной частей.

Список литературы

1. Волосенко, С. И., Егоров, Н. Н., Новоселова В.И., и др. Составление атласа специализированных карт условий захоронения промышленных отходов различной степени опасности территории Российской Федерации масштаба 1:2 500 000. Госконтракт № АМ-02-34/24, ФГУГП «Гидроспецгеология», М. 2013.

2. Грабовников, В. А., Гидрогеологические исследования для обоснования подземного захоронения промышленных стоков, М.: Недра, 1993. – 335 с.

3. Егоров, Н. Н., Новоселова, В. И., Блажнов, Я. Н. Составление цифровой карты геолого-гидрогеологических условий захоронения жидких промышленных отходов в глубокие водоносные комплексы на территории России масштаба 1:2 500 000. ФГУГП «Гидроспецгеология», М., 2008.

4. Требования к организации и производству работ по составлению специализированной гидрогеологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 распространения глубокозалегающих водоносных горизонтов (комплексов) для использования с целью, не связанной с добычей полезных ископаемых. СТО 05.003-2022. М.: ФГБУ «Гидроспецгеология», 2022 г.

РЕШЕНИЕ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ГИДРОГЕОЛОГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГАММА-КАРОТАЖА

Русакова Ю.О.

Западно-Сибирский филиал института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Тюмень, julrusakova@rambler.ru

Аннотация. В статье рассмотрен опыт применения метода гамма-каротажа для характеристики фильтрационных свойств различных по степени глинистости осадочных пород олигоценового водоносного горизонта Западной Сибири. На опытных участках установлены значимые статистические связи параметра естественной радиоактивности с параметрами водопроводимости, медианным диаметром частиц и коэффициентом фильтрации. Апробация метода предложена для поиска по площади и в разрезе водоносного горизонта перспективных интервалов эксплуатации. Применение метода в ходе выполнения прикладных работ в области гидрогеологии позволяет существенно повысить достоверность определения фильтрационных свойств пород и осуществлять их прогнозирование.

Ключевые слова: *Олигоценовый водоносный горизонт, глинистость, естественная радиоактивность, фильтрационные характеристики*

Abstract. The article deals with the experience of using gamma logging method to characterize the filtration properties of different clayey sedimentary rocks of the Oligocene aquifer of Western Siberia. Significant statistical relationships of the natural radioactivity parameter with the parameters of water conductivity, median particle diameter and filtration coefficient were established at the experimental sites. Approbation of the method is proposed for searching prospective intervals of exploitation in the area and in the section of the aquifer. Application of the method in the course of applied works in the field of hydrogeology allows to significantly increase the reliability of determination of filtration properties of rocks and to carry out their forecasting.
Key words: *Oligocene aquifer, clay content, natural radioactivity, filtration characteristics*

В ходе выполнения проектных работ в области гидрогеологии пресных подземных вод зачастую одной из основных проблем является низкая достоверность исходных данных о параметрах изучаемого водоносного горизонта: глубине залегания, общей и эффективной мощности, характеристиках литологического состава пород. Особенно актуальна точность определения данных параметров, например, при проектировании зон с особыми условиями использования, когда от принятых в расчетах значений зависит размер территории существенных ограничений вида деятельности. Достоверная геологическая информация необходима также для обоснования показателей эксплуатации будущих водозаборов при проектировании разведочных работ на малоизученных перспективных площадях.

Основным источником сведений о характеристиках водовмещающих пород на небольших разведанных участках обычно является скудное, а подчас противоречивое описание изучаемого разреза, приведенное в паспортах водозаборных скважин, а на достаточно больших территориях в принципе отсутствуют данные разведочного бурения.

Исходя из многолетнего опыта решения подобных задач на территории Западной Сибири хорошо зарекомендовала себя практика использования имеющихся в большом количестве данных геофизического каротажа нефтяных разведочных скважин. Особенность их интерпретации заключается в том, что в интервале горизонтов пресных подземных вод они представлены только гамма-каротажем (ГК) в обсаженных и зацементированных стволах скважин. Несмотря на это, а также на тот факт, что наиболее эффективно метод ГК применяется в комплексе, например, с методом самопроизвольной поляризации (ПС) [1], в условиях отсутствия каких-либо других достоверных данных, отдельное использование метода гамма-каротажа вполне оправдано.

В основе метода лежит отличие значений измерений различных по литологическому составу пород, а особенно песков и глин. Установлено, что обогащение осадочных толщ радиоактивными элементами происходит вследствие их осаждения или адсорбции тонкодисперсными и коллоидными частицами, поэтому благодаря большой удельной поверхности глинистые породы в процессе осадконакопления сорбируют большее количество радиоактивных элементов и на каротажной диаграмме выделяются положительной аномалией кривых - максимальными значениями параметра естественной радиоактивности; для песков отмечается обратная зависимость – отрицательная аномалия кривых и наименьшие значения параметра.

Эффективность применения метода для водоносных горизонтов пресных подземных вод Западной Сибири обусловлена литологическим составом их пород. Так, основной источник крупного водоснабжения - олигоценовый водоносный горизонт отложений атлым-новомихайловской и куртамышской свит представляет собой сложно построенную толщу пород различной степени глинистости - чередующихся между собой песков, алевритов и глин. Ярко выраженными на каротажных диаграммах являются продуктивные водоносные пласты, сложенные наиболее чистыми песками, а также глины регионального водоупора - тавдинской свиты эоцена.

Для количественной характеристики геофизического параметра естественной радиоактивности и исключения влияния условий записи кривых на показания ГК используется относительное значение гамма-активности пород – безразмерная величина

двойного разностного параметра естественной радиоактивности *(ΔJ*, усл.ед.):

$$\Delta J = \frac{J_x - J\min}{J\max - J\min},$$

где *Jx* – показания ГК по кривой в целевом интервале; *Jmin* - минимальные показания ГК (опорный пласт песков); *Jmax* – максимальные показания ГК (опорный пласт глин) [2-4].

Данная методика широко и достаточно результативно используется для определения коллекторских свойств пород глубоких водоносных и нефтегазоносных пластов [5-8], однако, применительно к горизонтам пресных подземных вод Западной Сибири в современных научных публикациях она практически не представлена.

Взаимосвязь данного геофизического параметра с гранулометрическим составом и коэффициентом фильтрации пород, определенным в лабораторных условиях, изучалась на материалах разведочных работ Октябрьского и Ханты-Мансийской месторождений [9]. В результате выполненного анализа данных лабораторных исследований в комплексе с интерпретацией гамма-каротажа интервала отбора образцов установлены значимые зависимости между двойным разностным параметром естественной радиоактивности, медианным диаметром частиц и коэффициентом фильтрации песков различной степени глинистости.

Исследование статистической связи геофизического параметра естественной радиоактивности пород и их фильтрационных характеристик, определенных по данным гидродинамических испытаний апробировано на опытных участках Советского и Заводоуковского месторождений пресных подземных вод, а также по результатам испытаний водозаборных скважин в Шаимском нефтегазоносном районе (НГР) [10-11]. Установлено, что величина двойного разностного параметра естественной радиоактивности водовмещающих пород значимо статистически связана с величиной их водопроводимости и, наряду, с другими факторами, оказывает влияние на величину удельного дебита водозаборных скважин.

Таким образом, проведенные исследования обосновывают значимую связь геофизического параметра глинистости и фильтрационных характеристик водовмещающих пород, что предоставляет возможность успешного применения метода гамма-каротажа для характеристики и прогноза фильтрационных свойств водоносных горизонтов.

Опыт практического применения данного метода предложен к использованию для северной части территории Шаимского НГР [9], где в связи с необходимостью ввода в эксплуатацию новых участков разработки нефтяных месторождений, назревает потребность обеспечения системы ППД агентом заводненения, в качестве которого используются пресные подземные воды куртамышского горизонта олигоцена. Задача поиска по площади и в разрезе водоносного горизонта наиболее перспективных интервалов каптажа водозаборными скважинами может быть решена на основании анализа построенных карт распространения геофизического параметра глинистости.

Таким образом, применение метода гамма-каротажа в ходе выполнения прикладных работ в области гидрогеологии пресных подземных вод вполне оправданно и позволяет осуществлять прогнозирование фильтрационных свойств пород на малоизученных территориях, существенно повышая достоверность их определения, что в целом положительно влияет на качество и эффективность проектной деятельности.

Список литературы

1. Косков В.Н. Установление литологической принадлежности и коллекторских свойств терригенных пластов по промыслово-геофизическим данным Баклановского месторождения / В.Н. Косков; Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2017. Т.16 - № 1. С.9-11. – DOI:10.1593/2224-9923/2017.1.1.

2. Бурков Ф.А. Геофизические исследования скважин: учебное пособие / Ф.А. Бурков, В.П.

Исаев, Г.А. Лобова; Министерство образования и науки Российской Федерации, Томский политехнический университет. – Томск: ТПУ, 2017. – 110 с.

3. Латышова М.Г. Практическое руководство по интерпретации данных ГИС: учебное пособие для Вузов / М.Г. Латышова, В.Г. Мартынов, Т.Ф. Соколова, Москва: ООО «Недра - Бизнесцентр», 2007. –327 с.

4. Ride, M. The geological interpretation of well logs / M. Rider. – 2nd edition. – Scotland: Rider-French Consulting Ltd., 2006. – 281 p.

5. Аулова Д. Ю. Оценка влияния глинистости на фильтрационно-емкостные свойства коллектора / Д. Ю. Аулова, В. С. Жуков, В. В Моторыгин [и др.] Газовая промышленность. №4 (721), 2015. – С. 29-32.

6. Кокарев П. Н. Разделение коллекторов парфеновского горизонта Ковыктинского месторождения на литотипы с использованием материалов геофизических исследований скважин / П. Н. Кокарев, И. А. Диких // Науки о Земле и недропользование, 2020. – Т. 43. – № 2(71). – С. 220-229. – DOI 10.21285/2686-9993-2020-43-2-220-229. – EDN EFOGWA.

7. Роженас С. М., Мамяшев, В. Г., Никанорова, Т. Ф. Петрофизическое обоснование литологического расчленения отложений тюменской свиты Сургутского свода по данным гамма-метода // Исследование эффективности разработки нефтяных месторождений Западной Сибири: Тр. СибНИИНП. Тюмень, 1984. С. 34–40.

8. Сребродольский Д. М., Матчинова, Г. П. Связь естественной радиоактивности с глинистостью горных пород // Нефтегазовая геология и геофизика. 1977. № 9. С. 32–35.

9. Русакова Ю. О. и др. Применение метода естественной радиоактивности для прогноза литологического состава и фильтрационных свойств пород олигоценового водоносного горизонта // Известия УГГУ, 2023. Вып. 3(71). С. 100–111. DOI 10/21440/2307-2091-2023-3-100-111

10. Русакова Ю. О. Плавник, А. Г., Ковяткина, Л. А. Применение данных геофизических исследований для прогноза производительности водозаборных скважин в северной части Шаимского нефтегазодобывающего района // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ, 2022. № 4. С. 41–56. http://doi.org/10.31660/0445-0108-2022-4-41-56

11. Русакова Ю. О. Анализ основных факторов, определяющих значение удельного дебита водозаборной скважины. Ю. О. Русакова и др. / Известия УГГУ, 2023. Вып. 1(69). С. 78–87. http://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-1-78-87

ГЕОХИМИЯ И ГЕНЕЗИС ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Харитонова Н.А. [1, 3], Барановская Е.И. [1], Челноков Г.А. [2],
Брагин И.В. [3], Асеева А.В. [3], Карабцов А.А. [3]
[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, Москва, tchenat@mail.ru
[2]Геологический институт РАН, Москва, geowater@mail.ru;
[3]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток

Аннотация. В работе представлены новые данные о химическом и изотопном составе термальных вод северо-западной части Центральной Азии. На основе данных о содержании $\delta^{18}O$ и δD в изучаемых водах сделан вывод об их метеорном генезисе. Приведена характеристика водовмещающих пород и показаны механизмы формирования солевой компоненты изучаемых терм.

Ключевые слова: *термальные воды, химический состав, стабильные изотопы кислорода и водорода, центральная Азия*

Abstract. In this paper, new data on the chemical and isotopic composition of thermal waters located within the north-western part of Central Asia are presented. The $\delta^{18}O$ and δD values prove the meteoric genesis of the studied waters. The description of water-host rocks is given and the processes by which the salt component enters the water are shown.

Key words: *thermal waters, chemical composition, stable oxygen and hydrogen isotopes, Central Asia*

Отличительной чертой Центральной Азии является высокая современная тектоническая активность, здесь выявлено обилие активных разломов с высокими амплитудами и скоростями позднечетвертичных перемещений [3]. Открытые обширные трещинные системы территории обеспечивают проникновение метеорных вод в недра Земли на значительную глубину, их прогрев и подъем термальных вод в верхние гидрогеологические этажи. В северо-западной части Центральной Азии выявлено огромное количество термальных подземных вод различного химического и изотопного состава.

Основной целью работы являлось изучение геохимического облика термальных вод северо-западной части Центральной Азии и выявление условий их питания, формирования солевой компоненты и установление путей циркуляции. В основу работы были положены гидрохимические и изотопные данные, полученные во время полевых работ 2019, 2022 и 2023 годов. Были опробованы поверхностные водотоки (15 проб), озеро Иссык-Куль (4 пробы), подземные воды (45 проб). Во всех пробах был проведен детальный анализ химического состава вод (52 компонента) и получены данные по содержанию в водах стабильных изотопов кислорода и водорода ($\delta^{18}O_{вода}$, $\delta^{17}O_{вода}$, $\delta D_{вода}$). Замер нестабильных физико-химических параметров вод (pH, Eh, $O_{2раств}$, электропроводность, минерализация, температура и содержание HCO_3^-) осуществлялся на месте пробоотбора. Также были отобраны образцы водовмещающих толщ и вторичных новообразованных минеральных фаз.

Макрокомпонентный состав водной фазы определялся двумя параллельными методами: жидкостной ионной хромотографии (HPLC-10AVp, SHIMADZU) в ДВГИ ДВО РАН и капиллярного электрофореза на приборе «КАПЕЛЬ-105М» на кафедре гидрогеологии геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова. Концентрации микрокомпонентов установлены методом ICP-MS на приборе Agilent 7700 в ДВГИ ДВО РАН. Определение стабильных изотопов проводилось в двух лабораториях: ДВГИ ДВО РАН и ГИН РАН. Для сравнительных оценок использовано соотношение $^{18}O/^{16}O$ относительно водного стандарта SMOW. Твердая фаза была изучена классическими методами описательной минералогии (анализ образцов, шлифов и аншлифов), минеральный состав также определялся методам рентгенофазового анализа на Дифрактометре (XRD) MiniFlex II (Япония) в лаборатории рентгеновских методов ДВГИ ДВО РАН, химический состав твердокаменного материала был проанализирован атомно-эмиссионной спектрометрией на спектрометре iCAP 6500 Duo и ICP-MS на спектрометре Agilent 7500 (Agilent Techn., США). Для визуализации и измерения пространственной структуры образцов без их химической и механической обработки был использован микротомограф SkyScan 1272 (Bruker, Бельгия). Полученные результаты позволили визуализировать пористость и трещиноватость изучаемых проб. Вторичные фазы были проанализированы с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM 6490LV со спектрометром INCA Energy 350 (Oxford Instruments) для рентгеновского энерго-дисперсионного микроанализа (EDC).

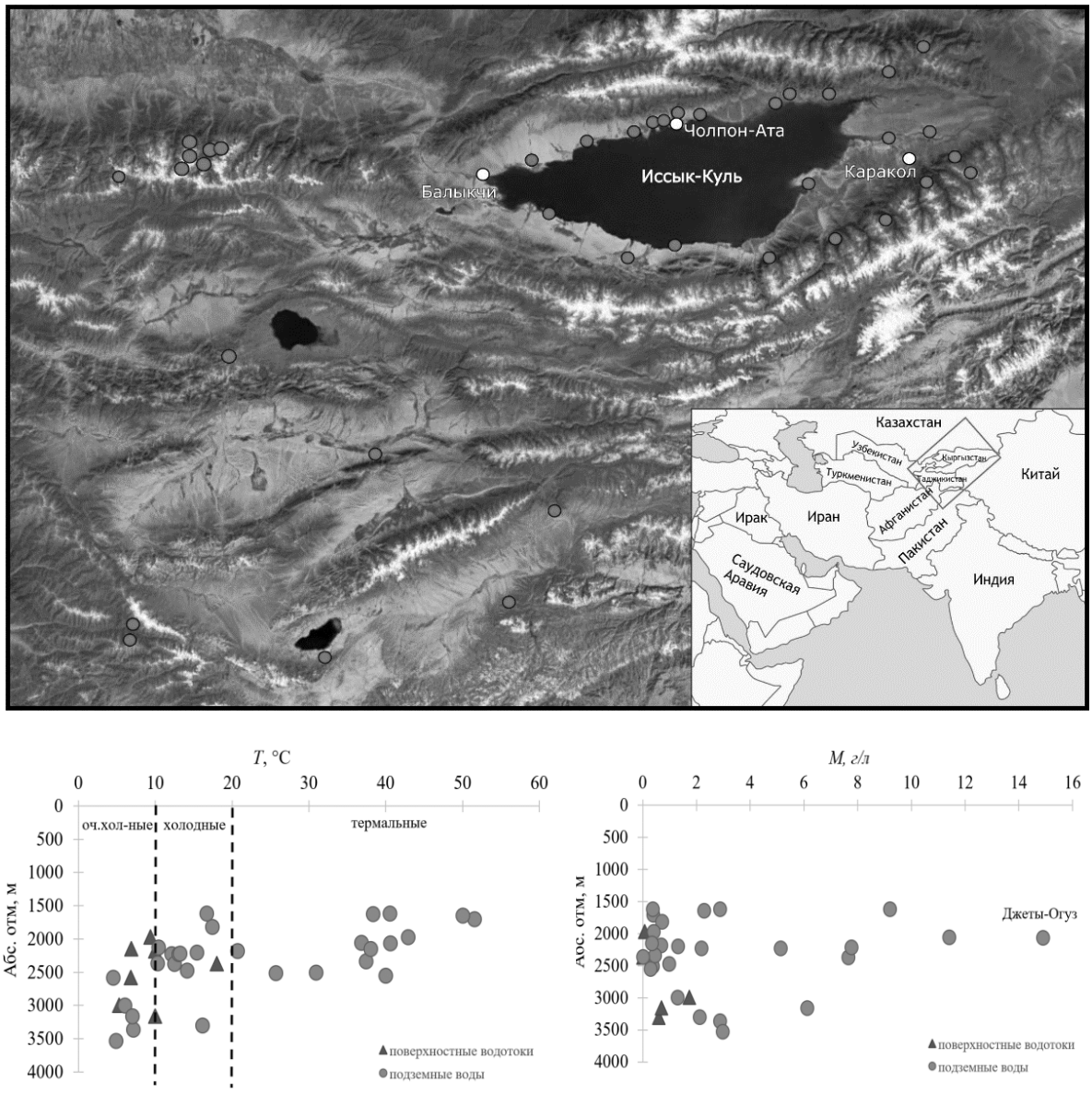


Рис.1. Обзорная карта района исследований с расположением точек опробования (А). Изменение температуры (Б) и минерализации (В) опробованных источников от места их локализации (высотной отметки).

Изучаемая территория характеризуется сложным геологическим строением: здесь обнаружены метаморфические, вулканогенные и осадочные образования от древних (архейских) до современных (кайнозойских) возрастов. Повсеместно распространены интрузивные толщи разнообразного состава, встречаются ультраосновные, основные, кислые и ультракислые породы. Интрузии слагают около 20% площади и имеют широкий возрастной диапазон (ранний протерозой – кайнозой). Характерной чертой геологического разреза является двухэтажность: нижний этаж образован сильно дислоцированными породами домезозоя, а верхний – недислоцированными породами мезокайнозоя [2]. Домезозойские образования различного состава и генезиса формируют фундамент впадин и хребты Тянь-Шаня, а мезокайнозойские отложения заполняют впадины. Распространение термоминеральных вод региона ассоциирует с неогеновыми накоплениями в межгорных впадинах. На изучаемой территории выделяют два межгорных артезианских бассейна: Восточно-Чуйский и Иссык-Кульский. Бассейны сложены мезо-кайнозойскими континентальными осадочными породами мощностью до 5000 м [1].

По температуре исследованные воды были разделены на три класса: весьма холодные (до 10 ºС), холодные (10÷20 ºС) и термальные (> 20 ºС). Все воды умеренно-щелочные (6.7 – 9.4), а окислительно-восстановительный потенциал зависит от типа воды: поверхностные водотоки с Eh 100÷220 mV, а подземные источники имеют сильно восстановительную обстановку с Eh до -260 mV (источник Джилы-Су). Минерализация вод варьирует: горные реки и родники обычно низкоминерализованные (до 150 мг/л), в то время как термоминеральные источники, более минерализованные с минерализацией от 1 до 5 г/л. Иногда минерализация достигает 15 г/л (месторождение Джеты-Огуз). Насыщенность газом изученных термоминеральных вод также неоднородна и меняется по отдельным участкам и скважинам.

По химическому составу высокогорные поверхностные водотоки и источники сходны и принадлежат к Ca-HCO_3 типу. Состав подземных источников варьирует и зависит от температуры и типа водовмещающих толщ. В холодных водах преобладают Ca^{2+} и Na^{+}, среди анионов HCO_3^{-}, редко Cl^{-}. В термальных источниках $Na^{+} > Ca^{2+}$ и $Cl^{-} > HCO_3^{-} + SO_4^{2-}$. Высокогорные воды характеризуются низкими содержаниями микрокомпонентов, а подземные термальные содержат повышенные содержания лития, стронция, рубидия и цезия. В термальных источниках выявлены воды с очень высокими концентрациями бора до 10 мг/л (Джеты Огуз, Арашан Бебельчир, Нарзан Кара-Ой и Каджисай). В источнике Чатыркуль выявлены высокие концентрации марганца (до 5 мг/л) и железа (до 32 мг/л).

Содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) в исследованных водах низкие и находятся в диапазоне значений 0,07 ÷ 0,81 мкг/л. Максимальные концентрации ΣРЗЭ наблюдаются в воде из скважин Джеты-Огуза с высокой минерализацией, а минимальные - в скважине курорта Ак-Су. Сопоставление суммарного содержания РЗЭ и минерализации вод показывает неплохую корреляционную связь (рис. 2А). Минимальные концентрации РЗЭ наблюдаются в водах с высоким pH (8,1-9,7), а максимальные коррелируют с интервалом pH 7,3-7,9 (рис. 2Б). Легкие РЗЭ (от La до Eu) доминируют над тяжелыми РЗЭ (от Gd до Lu), а максимальное содержание имеют La, Ce и Nd. Наблюдаемые различия в ΣРЗЭ в изучаемых термоминеральных водах обусловлены типом водовмещающих толщ, а также скоростью движения подземных вод и временем их циркуляции.

Стабильные изотопы кислорода ($\delta^{18}O$) и водорода (δD) демонстрируют значительный разброс значений: наиболее низкие значения (от -15,7 до -11,1‰ для $\delta^{18}O$ и -109 до -78‰ для δD) имеют прохладные подземные воды. Высокогорные реки и источники содержат более тяжелые изотопы. Наиболее высокие значения $\delta^{18}O$ и δD (-0,5 и -16‰, соответственно) выявлены в водах озера Иссык-Куль. Одним из диагностических признаков происхождения природных вод является соотношение $\delta^{2}H - \delta^{18}O$, которое для метеорных вод описывается уравнением Г. Крейга: $\delta^{2}H=8\delta^{18}O+10$. В целом, все изученные воды ложатся близко к линии глобальных метеорных вод, что подтверждает их атмосферный генезис. Смещение холодных источников в сторону отрицательных значений отражает большую высоту зоны их питания. Кислородные сдвиги вправо и влево указывают на неравновесное изотопное фракционирование в системе вода–порода-газ. Воды озера Иссык-Куль лежат на линии испарения, что характерно для озерных вод данной климатической зоны.

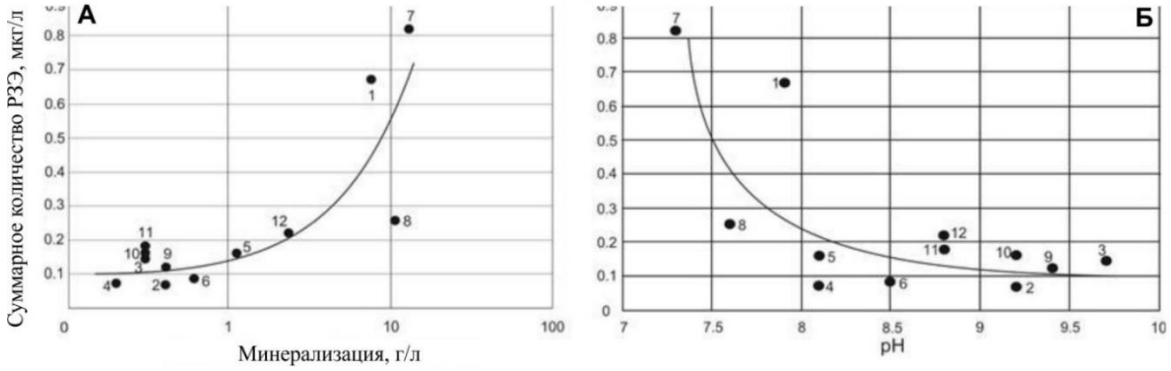


Рис. 2. Соотношение суммарного содержания редкоземельных элементов в изученных водах с минерализацией (А) и pH (Б).

Для рек наблюдается отчетливая высотная зависимость между содержанием в воде δD и точкой опробования, однако для подземных вод данная корреляция менее характерна. Чем горячее воды, тем слабее корреляция: для холодных подземных вод данная зависимость выражена слабее, а для термальных – отсутствует. Это свидетельствует, о значительном фракционировании изотопного состава природных вод при взаимодействии с водовмещающими толщами.

Высотная зональность по кислороду-18 не проявлена, если рассматривать все изученные воды комплексно, однако для рек она достаточно хорошо выражена. Таким образом, проведенные исследования показывают, что все изученные воды по изотопному составу располагаются близко к ГЛМВ и имеют исходно атмосферное происхождение. При этом область питания холодных подземных источников лежит гипсометрически выше, чем область питания термальных вод и обследованных рек. Исключением, возможно, являются воды источников Нарзан и Кара-Ой, а также воды месторождения Джеты-Огуз.

Расчеты температур прогрева с использованием геотермометров (кварцевого, Na-K и Mg-Li) показывают, что «глубинные» температура изучаемых вод могут достигать 120 ºС, что соответствует глубинам проникновения 2÷4 км.

Для выявления путей и механизмов происхождения и последующей эволюции подземных минеральных флюидов была проведена оценка степени равновесия исследуемых вод с водовмещающими породами и выявлены корреляционные связи между отдельными компонентами. Анализ полученных данных показывает, что концентраций основных химических элементов в изученных водах недостаточно для достижения равновесия с первичными алюмосиликатами и соответственно формирование химического состава вод на участках происходит за счет взаимодействия метеорной воды с алюмосиликатами водовмещающих пород. Источником, как кальция, так и натрия выступают, главным образом, полевые шпаты, при растворении которых в воду также поступает и кремний, впоследствии осаждающийся в виде новообразованных форм (кварца или халцедона).

Несмотря на тот факт, что большинство минеральных вод пересыщены по отношению к кальциту, тщательное изучение водовмещающих пород не выявило обилия трещин, заполненных карбонатом, более того, даже в местах выхода минеральных вод травертины не образуются. Установлено, что основной вторичной фазой на изливе являются хлориды и сульфаты.

Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ 23-27-00119 «Генезис и условия циркуляции термальных вод кристаллических массивов горноскладчатых областей».

Список литературы
1. Мандычев А.Н. Особенности гидрогеодинамики глубоких горизонтов артезианских бассейнов областей неотектонической активизации (на примере Восточно-Чуйского и Иссык-Кульского артезианских бассейнов). Автореферат диссертации. Бишкек, 1994.
2. Матынченков В.Е., Иманкулов Б.И. Минеральные воды Киргизии. Издательство Илим. Фрунзе. 1987. 250 с.
3. Трифонов В. Г., Зеленин Е. А., Соколов С. Ю., Бачманов Д. М. Активная тектоника Центральной Азии // Геотектоника. – 2021. – № 3. – С. 60-77. – DOI 10.31857/S0016853X21030097.

ПРОГРЕССИВНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ЭМПИРИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ)

Хаустов А.П., Редина М.М.
ФГАО ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, khaustov-ap@rudn.ru

Аннотация. На примере реального объекта (источник Чокрак) построена модель взаимодействующих компонентов гидрогеологической системы с целью оценки ее накопленной сложности. Основной параметр таких оценок эволюции – приращение энтропии. Определены характеристики постепенного усложнения процессов накопления и миграции маркерных соединений (полициклические ароматические углеводороды, ПАУ) в гидрогеохимической системе: параметры массопереноса и энергозатраты при условии постоянного воздействия сероводородных вод.
***Ключевые слова**: гидрогеохимическая система, эволюция, усложнение, энтропия, энергия*

Abstract. On the example of a real object (Chokrak spring), a model of interacting components of a hydrogeological system is formed in order to assess its accumulated complexity. The main parameter of such estimates is the entropy increment. The characteristics of the gradual complication of the accumulation and migration of marker compounds (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) in the hydrogeochemical system are determined: mass transfer parameters and energy consumption under the condition of constant exposure to hydrogen sulfide waters.
***Key words**: hydrogeochemical system, evolution, complication, entropy*

Эволюция гидрогеохимических систем применительно к образованию вторичных минералов рассмотрена в работах С.Л. Шварцева [4,5 и др.]. Позже он пришел к выводу о том, что эволюционные процессы образования вторичных минералов первичны по отношению к органическому веществу. Без них невозможны эволюционные процессы в биосфере.

В некоторых работах утверждается, что система вода–органическое вещество развивается независимо от каких-либо внешних условий. Заявление дискуссионно: известны по крайней мере 6 биологических путей фиксации углерода, следовательно, и воды. Из сказанного следует: вопрос о роли органического вещества в эволюции общеизвестной системы В.И. Вернадского актуален и не решен до настоящего времени. Причины – отсутствие эмпирических обобщений на конкретных объектах.

Общепризнано и то, что в неравновесном состоянии системы выполняют работу и, следовательно, производят энтропию; в равновесном состоянии такого не происходит, а производство энтропии прекращается. Утверждение спорное: все природные системы инерционны с разным энергетическим балансом. Классическая термодинамика считает, что производство энтропии – реальный критерий эволюции систем, а максимальная диссипации свободной энергии соответствует наивысшему уровню энтропии.

Суть процесса дополнительного усложнения по С.Л. Шварцеву – появление вторичных минералов, что обеспечивает продвижение эволюции в материнской системе на новые этапы [5]. Скорее это фиксация одного из состояний эволюции: с позиций теории систем переход в конечное состояние за счет добавочных усложнений рассматривается как переход в надсистему; в дальнейшем новая структура развивается как элемент системы, но более высокого порядка. Этот принцип сформулирован Г. Альтшуллером как «закон развития» целостности системы. Чаще в природе структурные взаимодействия необходимы и случайны, а р*азвитие компонентов системы идет неравномерно; чем сложнее система, тем более неравномерно развитие ее частей*. Это закон функционирования всех систем (в биологии сукцессия) благодаря добавочному усложнению взаимодействия компонентов.

Однако в основе взаимодействий должны лежать энергетические процессы, которые фиксируются и изменяются на различных структурных уровнях эволюции или геохимических барьерах (ГХБ) [1, 2, 6]. Работа по их преодолению должна переходить в теплоту и пополнять внутреннюю энергию системы (основной принцип самоорганизации). При этом необходим **сквозной проход энергии по всем компонентам системы; согласование (лучше когерентность) частоты колебаний, периодичности всех компонентов системы.**

Для наших задач важно то, что упорядоченная структура в системе возникает, когда она погружена в интенсивный и «не пересыхающий» поток энергии. То есть система должна быть максимально открытой и способной к максимальному числу реализаций. Далее, система должна подпитываться реагентами на входе и выводить конечные продукты; должна состоять из достаточного и разнообразного сочетания взаимодействующих компонентов; иметь возможность находиться в нескольких динамических квазистационарных состояниях (мультистабильностей). Между основными компонентами системы должны существовать обратные связи и каталитические циклы [1, 3, 6].

Покажем это на экспериментальном примере. Суть эксперимента: выход подземных вод – концентрированный источник энергии и потоков веществ с дискретным характером проявления. Он создает оптимальные каналы передач в естественной экосистеме, (они определяются по изменению молекулярной энтропии Больцмана ΔS) – это макроскопическая энергия структуризации. Порции энергии определяют скачок противодействия внешнему разрушению системы, или сохраняют ее целостность при структурных переходах на новые уровни. Вода – связывающий структурный элемент, создает *добавочное избирательное усложнение системы*. По мере растекания вода формирует пульсационный вектор движения (пространственную сопряженность компонентов), который искажается процессами фазовых переходов веществ через структуризацию или добавочные усложнения системы.

Перечисленным условиям эмпирической оценки прогрессивного усложнения систем наилучшим образом соответствует источник Чокрак в Крыму. Проведены целенаправленные исследования взаимодействия многокомпонентных систем «вода (сероводородный источник) – донные отложения (илы)–почвы–растения (корни и стебли солероса)» (рис. 1).

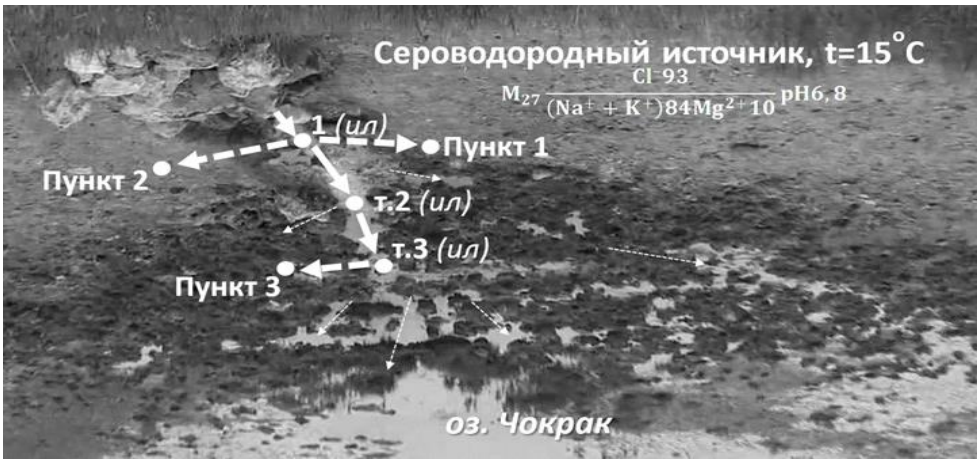


Рис. 1. Схема отбора проб в гидрогеохимической системе

С позиции катенарного подхода условия – следующие:

По признакам окисления серы можно четко выделить границы зоны влияния источника, выделить систему из среды и провести целенаправленный отбор проб взаимодействующих компонентов, в том числе биотических. Органическое вещество удерживается в системе, благодаря активным процессам окисления и жизнедеятельности бактерий. Процессы метаболизма биоты формируют непрерывный поток продуктов жизнедеятельности в том числе углеводородов (и энергии) в виде добавочного усложнения.

Поток энергии и реагенты поступают за счет относительно стационарной разгрузки подземных вод в условиях внешних потоков энергии из атмосферы (инсоляция, тепло, влага), направленных на разрушение целостности системы. По отношению к внешним воздействиям систему можно отнести к сильно неравновесным с внутренним производствам энтропии.

Сочетание компонент в системе вода–донные отложения–почвы–корни растений– стебли достаточно разнообразно. Они находятся в различных нестационарных динамических (условно когерентных в пространстве, но не во времени, состояниях) и образуют индивидуальные траектории миграции вещества и энергии.

Компоненты частично обеспечивают вывод энергии и веществ, или конечные продукты, за счет обратных связей в виде каталитических циклов (избирательного ускорения реакций), которые идентифицируются по оценкам комплекса органических соединений – ПАУ на геохимических барьерах и в соответствующих средах. Продукты жизнедеятельности микроорганизмов в воде (органические соединения) создают порядок и флуктуации и могут явиться наиболее информативными в матрице признаков системы.

Согласно Гамильтоновой механике, импульс (дебиты источника) приводит к росту усложнения за счет сквозного прохода энергии и массообмена с избирательным характером, или к порядку самоорганизации системы, формированию диссипативных структур: они в ходе своего образования аккумулируют энергию, уменьшают энтропию и поэтому способны к прогрессивной эволюции.

Методы отбора проб, пробоподготовка, химический анализ концентраций ПАУ[1] методами ВЭЖХ и масспектрометрии; интерпретация поведения ПАУ в различных условиях, расчеты термодинамических параметров в том числе для объекта изложены в [3].

[1] Идентифицированы 14 ПАУ: нафталин (Naph), аценафтен (Ace), флуорен (Flrn), фенантрен (Phen), антрацен (An), флуорантен (Flu), пирен (Py), хризен (Chr), бенз(a)антрацен (BaA), бенз(a)пирен (BaP), бенз(b)флуорантен (BbFlu), бенз(k)флуорантен (BkFlu), пери-лен (Pl), бенз(ghi)перилен (Bghi), индено(1,2,3-cd)пирен (IP), дибенз(a,h)антрацена (DBa)

Кратко – важные положения.

1. Для необратимых систем приращения энтропии в ΔS отрицательной области свидетельствует о метастабильном равновесии взаимодействия компонентов. При ΔS>0 (ΔS=0) высока вероятность спонтанных взаимодействий; структурная неупорядоченность в системе максимальна; эволюция систем определяется экстремальными состояниями.

2. Энтропия по своей природе и методам расчета – экстенсивный параметр, зависящий от массы веществ, участвующих в фазовых переходах, которые определяют биодоступность. Включение биосистем как компонентов в наши модели приводит к эволюционной нестабильности в процессах усложнения систем.

3. В самоорганизующихся системах всегда существует иерархия признаков, определяющих состояние, следовательно, структурированность объектов. Долгоживущие переменные управляют короткоживущими, вышележащий уровень – нижележащим, формируя разномасштабные переходы энергии и веществ (системы с распределенными параметрами). Отсюда важность эмпирической многомерности объектов при идентификации процессов усложнения и эволюции в системах.

Изменение энтропии при переходе ПАУ через границы ГХБ рассчитывалось по аналогии с вычислением для химических реакций. Приращение энтропии соответствует разности сумм стандартных (абсолютных) энтропий образования продуктов реакции и исходных реагентов с учетом стехиометрических коэффициентов, отражающих их количества. Для расчета приращения энтропии использовались данные о ПАУ, которые присутствуют в «отдающей» и «принимающей» средах: их молярные концентрации и стандартные энтропии образования ПАУ (приняты по справочнику NIST). Например, для условной системы «вода – ил», где определены в средах концентрации Naph и Flu, расчет приращения энтропии проводится по уравнению:

$$\Delta S = SoNaph\ (CNaph_{ил} - CNaph_{вода}) + SoFlu\ (CFlu_{ил} - CFlu_{вода}),$$

где SoNaph, SoFlu – стандартная энтропия образования соответствующего ПАУ, Дж/(моль·К); CNaph ил, CFlu ил – молярные концентрации ПАУ в иле, мкг/моль; CNaph вода, CFlu вода – молярные концентрации ПАУ в воде, мкг/моль. Суммарная погрешность определения содержаний органических примесей в пробах воды в среднем составляет около 30%. Предел обнаружения для различных экспериментов и органических веществ варьирует от 0,0001 до 0,1 мкг/дм3.

Для рассмотренной в нашем эксперименте системы рассчитаны характеристики потоков вещества и энергии в точках взаимодействия вод с илами, почвами и растениями (4 точки) и по направлениям от т. 1 к т. 3 (рис. 1). Результаты оценок суммарных значений энтропии и ее приращения на ГХБ в системах различной сложности (2-, 3-, 4- и 5-компонентных) показаны в табл. 1.

Активность миграции ПАУ определена на основе «рейтинга»: вещества упорядочены в соответствии с величиной произведения $КК_{средн}$ на всех ГХБ системы и отношения числа случаев перехода ПАУ через ГХБ к числу рассмотренных ГХБ. Считается, что активно мигрируют через ГХБ преимущественно малокольцевые ПАУ, но в нашем эксперименте это подтвердилось лишь частично (для Naph, Flrn и Phen). Очевидно, что для создания параметров порядка системы необходим баланс миграционной активности признаков при взаимодействии компонентов для поддержания свойства самоорганизаций системы. Эффективно этот процесс реализуется *комбинированным усложнением взаимодействующих соединений*. Это усложнение создает сама система; оно необходимо для ее существования. Поэтому для естественных взаимодействий компонентов вполне приемлемы другие принципы фазовых переходов за счет фиксации в средах относительно слабо подвижных многокольцевых ПАУ, но с большей токсичностью. Так реализуется эффект накопления в живых системах, или избирательный характер управления: долгоживущие переменные управляют короткоживущими. Этот принцип – необходимое условие процессов добавочного

усложнения и иерархии процессов в системе. Такие процессы – индикатор переменных состояний (паттернов). Они характеризуются переменными энергетическим потоками и их релаксацией внешними условиями, следовательно, приращениями энтропии на барьерах. Рейтинг ПАУ показывает однотипность их списка за счет постоянства воздействия источника.

Таблица 1. Вклад взаимодействующих компонентов системы в приращение энтропии, Дж/моль·К, (усложнение системы)

Параметры усложнения	**Значения энтропии S и приращения ΔS**							
	Вода-Ил		***Вода-Ил-Почва***		***Вода-Ил-Почва-Корень***		***Вода-Ил-Почва-Корень-Стебель***	
	S	**Σ ΔS**	**S**	**Σ ΔS**	**S**	**Σ ΔS**	**S**	**Σ ΔS**
Пункт 1	46,9	46,7	93,3	46,3	431,7	338,3	594,6	162,7
Пункт 2	46,9	46,7	124,5	77,4	346,1	221,6	497,0	150,8
Пункт 3	109,0	108,8	160,4	51,3	368,9	208,4	379,3	119,1
$\Sigma S_{взаим.}$ тт. 1-3	202,8	202,1	378,2	175,1	1146,8	768,3	1470,8	432,6
Средние тт.1-3	67,6	67,4	126,1	58,4	382,3	256,1	490,3	134,9
$КК_{средн}$ тт.1-3	816,2		368,7		247,2		185,5	
Структурное приращение **ΔS**	690,6		-84,1		1198,3		-2191,0	
ПАУ – маркеры переходов на ГХБ	BaP, Flu, Py, Flrn, Phen, Naph		BaP, Flu, Py, Flrn, Phen, Naph		BaP, Flu, Py, Flrn, Phen, Naph		BaP, Py, Flu, Flrn, Phen, Naph	

Усложнение системы по взаимодействию двух фаз в системе вода–илы наглядно определяется по направленному обмену ПАУ с необходимым временем насыщения илов от источника, что сопровождается окислением различных соединений серы. Интенсивное и сравнительно постоянное поступление ПАУ в илы и жизнедеятельность организмов создают малозатратные по энергетике насыщенные формы: для них установлено максимальное приращение в конечной точке (илы в т. 3). Процесс илообразования – это разложение органических веществ в окислительно-восстановительных реакциях. Исследуемые илы не имеют материнской породы, не содержат продуктов разложения высших растений. Это может создать и создает «буферный эффект» по отношению инфильтрации из рассредоточенных потоков разгрузки. Производство энтропии в этих условиях минимально, что подтверждает высокую изолированность катены в пунктах 1 и 2 (минимальное усложнение системы).

Перечисленные процессы невозможно оценить по отдельным маркерным показателям, поэтому был применен метод главных компонент. Он также подтвердил эти теоретические построения. В плоскостях $ГК_1$ и $ГК_2$ (82% дисперсии) выделены 3 группы взаимодействий: ил–вода, корни–почвы и группа почвы–корни–стебли. Это наглядно подтверждает прогрессивное усложнение взаимодействий в зоне влияния источника. Маркерные ПАУ формируют изолированную группу активно мигрирующих соединений (максимальные положительные нагрузки в структуре $ГК_2$): Naph, Flrn, Phen, BaP, Py. При этом BaP наиболее репрезентативен для всей группы ПАУ: его нагрузка совпадает с нагрузкой суммы ПАУ.

Такое деление вполне оправдано с позиций энергетики. Градиенты приращения энтропии для наиболее простого взаимодействия (вода–илы) низкие: в т. 1 это 15 Дж; в т. 2 (10 м ниже по течению) 20,2; в 3 т. 30,9. Это свидетельствует о постоянстве процессов окисления H_2S в уже насыщенной до предела субстанции. В то же время, для более сложных (многокомпонентных) систем градиенты выше: для 3-компонентных –

84,1, 4-компонентных +1198, 5-компонентных –2191. Здесь усложнение системы максимально за счет барьерной функции корневой системы в управлении потоками ПАУ. Отрицательные значения структурных приращений ΔS указывают на относительную изолированность компонентов в рассмотренных системах (обусловлено сезонностью взаимодействий).

Система, последовательно и радиально удаляясь от «простого» 2-компонентного взаимодействия, может прекратить перенос вещества за счет демпферных свойств почв (например, вследствие сезонного уменьшения градиента латеральной фильтрации), а энергетическое воздействие продолжится в других формах. Эффект насыщения сред реагентами носит накопительный характер по мере увеличения времени взаимодействия за счет инерционности процессов и зафиксирован приращением энтропии в т. 3.

Воде всегда присущ собственный эффект фазовых превращений или потенциал приобретения ведущей функции в системе за счет изменения физико-химических видов (свойство диспергирования). С тем, чтобы начать взаимодействие с почвами, а это наиболее сложная компонента, вода должна иметь определенный энергетический потенциал, которые реализуется, через наиболее экономные формы ее миграции от химически связанной до гравитационной. Этот потенциал как раз черпается за счет изменения фазово-агрегатных переходов. Реализуется принцип усложнения системы преимущественно за счет многообразия форм структурообразующей компоненты – воды. В конечном итоге вода должна пройти стадию деструктуризации и обрести доступные формы для микробоценозов и растений.

По этой схеме идет несогласованное возрастание флуктуации для образования новых взаимодействующих структур (принцип эволюции систем с распределенными параметрами) или паттернов, требующих подпитки энергией. Такой приток энергии должен обеспечить критическое состояние – бифуркацию с последующим скачкообразным выходом продукции системы (уход влаги в растения, минералообразование и др.) Реализуется принцип тепловых насосов: перераспределение части энергии из жидкости за счет испарения и конденсации. Но водный потенциал – не единственная причина расхода энергии, имеет место собственная свободная энергия почв и растений и ее сопротивление переизбытку массопотоков.

Доказано, что усложнение систем за счет взаимодействия компонентов (прогрессивная эволюция вследствие изменения фазово-агрегатных состояний воды) приводит к снижению роли геохимического потенциала (Гиббса) за счет производства энтропии на ГХБ.

Список литературы

1. Хаустов А.П. Органическое вещество и неравновесность геохимических систем / В кн.: Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: труды V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2023. С. 49–53.

2. Хаустов А.П. Редина М.М. Структурная энтропия как мера фракционирования массопотоков в экосистемах в условиях транспортного прессинга // Антропогенная трансформация природной среды. 2022. Т. 8 (2). С. 16–38.

3. Хаустов А.П., Редина М.М., Яковлева Е.В. Водопроявления подземных вод как геохимические системообразующие объекты (интерпретация на основе распределения ПАУ) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2018. № 3. С. 3–17.

4. Шварцев С.Л. Прогрессивно самоорганизующиеся абиогенные диссипативные структуры в геологической истории Земли // Литосфера, 2007, №1. С 65-89.

5. Шварцев С.Л. Основы теории добавочного усложнения в биосфере Земли // вестник Российской Академии Наук, 2019. Т. 89 (8). С. 800–810.

6. Khaustov A.P., Redina M.M. Geochemical Markers Based on Concentration Ratios of PAH in Oils and Oil-Polluted Areas // Geochemistry International, 2017. Vol. 55 (1). Pp. 98–107.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРИРОДНЫХ ВОД

Чуйкина Д.И., Король И.С., Мухортина Н.А.
Томский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 4.
dichuikina@mail.ru

Аннотация. Исследованы малые озера Томской области на содержание 13 полиароматических углеводородов (ПАУ). Идентификация проводилась методом ВЭЖХ. Суммарное содержание ПАУ в изученных пробах природных вод изменяется от 0.37 до 0.54 мкг/л. В водных образцах отмечается повышенное содержание легких 2-3-х ядерных полиаренов, обладающих лучшей растворимостью. Содержание неорганических компонентов, представленных катионами и анионами не превышают предельно-допустимых концентраций (ПДК). Рассчитан индекс загрязненности воды, все озера относятся к умеренно загрязнённым и загрязненным. Показана зависимость ИЗВ от содержания высокомолекулярных полиароматических углеводородов и соотношения перманганатной окисляемости к химическому потреблению кислорода (ПО/ХПК). Показано, чем выше значение ИЗВ, тем выше доля трудно окисляемых компонентов в поверхностных водах.

Ключевые слова: *природные воды, ионный состав, полиароматические углеводороды, индекс загрязненности воды, гидрохимические показатели*

Abstract. Small lakes of the Tomsk region have been studied for the content of 13 polyaromatic hydrocarbons. Identification was carried out by the HPLC method. The total content of polyaromatic compounds in the studied surface water samples varies from 0.37 to 0.54 micrograms/l. In the PAH mixture in aqueous samples, there is an increased content of light 2-3-core polyurethanes with better solubility. The content of inorganic components represented by cations and anions does not exceed the maximum permissible concentrations (MPC). The water pollution index has been calculated, all lakes are moderately polluted and polluted. The dependence of IS on the content of high molecular weight polyaromatic hydrocarbons and the ratio of permanganate oxidizability to chemical oxygen consumption (PO/COD) is shown. It is shown that the higher the value of IS, the higher the proportion of difficult-to-oxidize components in surface waters.

Key words: *natural waters, ionic composition, polyaromatic hydrocarbons, water pollution index, hydrochemical indicators*

Природные воды являются сложными многокомпонентными объектами, требующими многостороннего внимания. Увеличение объема бытовых и промышленных стоков приводит к значительному росту количеств биогенных и органических веществ, поступающих в водоемы, что ведет к изменению трофического статуса водоемов и ухудшению качества воды [1].

Особую опасность таит в себе поступление в водные экосистемы токсических веществ. В последние годы наблюдается усиленное загрязнение водоемов тяжелыми металлами, фенолами, нефтепродуктами и другими токсикантами. Гидрогеологические показатели не могут дать полного представления о токсичности среды, они не учитывают синергетические, кумулятивные или антагонистические эффекты от одновременного присутствия многих загрязнителей и поэтому не могут служить надежной основой для прогнозирования экологических последствий загрязнения.

Классификация состояния природных вод основывается на определении целого ряда физико-химических показателей, включающих в себя температуру, pH, Eh, содержание ионов, тяжелых металлов, нефтяных компонентов и др. В России и странах ЕЭС для оценки качества природных вод используют различные индексы: индекс загрязненности воды (ИЗВ), баварский индекс (CJ), канадский индекс (CCME WQI) и классификации «Единые критерии качества вод» (ЕККВ), «Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды» (УКИЗВ) [2].

Однако, они не учитывают содержание полиароматических углеводородов, которые являются канцерогенными соединениями, проявляющими мутагенные

и токсичные свойства. ПАУ сорбируются и консервируются в донных отложениях водоемов, что позволяет использовать их в качестве индикаторов для оценки антропогенного воздействия на природные водные объекты. В работе [3] показано, что соотношения ПАУ могут использоваться не только как индикаторы источников поступления ПАУ в водоем, но и как критерий качества водного объекта. Применение таких показателей как pH, содержание растворенного кислорода, $БПК_5$, содержание ионов позволяет оценивать не только качество вод, но и трофический статус водоема [4]. Все эти данные показывают актуальность подобных исследований.

Цель данной работы - установить состав полиароматических углеводородов в водах малых водоемов Томской области для оценки антропогенной нагрузки и показать взаимосвязь с индексами качества природных вод.

ОБЪЕКТЫ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованные водоемы находятся в непосредственной близости от жилых массивов (г. Томск, п. Самусь, п. Богашево, п. Тимирязево) в связи с чем испытывают влияние хозяйственной деятельности человека. Проведенные исследования водных образцов озер Мальцево, Круглое, Савинское, Федосеевское и Песчаное позволили оценить их текущее состояние по ряду гидрологических показателей. В момент отбора проб значения температурного показателя находились в диапазоне 18-21°C, что является нормой для данного времени года. Значение pH озер Мальцево, Круглое, Савинское, Федосеевское и Песчаное находится в диапазоне 6.8-7.2. Водные объекты характеризуются, как пресноводные потоки, и показатель электропроводности Eh равен соответственно 0.26; 0.28; 0.34; 0.30; 0.14 мСм/см.

Отбор проб воды проводили в августе 2022 года с глубины 0.4-0.6 м от поверхности с последующей консервацией н-гексаном. Содержание ПАУ в воде определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), на хроматографе Shimadzu LC-20 (Shimadzu, Япония). Методом капиллярного электрофореза в образцах воды был определен ионный состав воды. Биологическое потребление кислорода ($БПК_5$) определяли согласно НДП 10.1:2:3.131-2016; перманганатную окисляемость (ПО) - методом титриметрии в кислой среде по ПНД Ф 14.1:2:4.154-99.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение катионно-анионного состава поверхностных вод необходимо для оценки экологического состояния этих объектов, в том числе для возможности определения антропогенного загрязнения. Методом капиллярного электрофореза был определен ионный состав, включающий: основные катионы: $Ca^{2+,}$ Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+} и анионы: Cl^{-}, SO_4^{2-}, NO^{3-}, PO_4^{3-}, F^{-}. Результаты представлены в табл. 1.

Известно, что повышенное содержание соединений азота и фосфора в водных объектах указывает на загрязнения промышленными и бытовыми сточными водами. В работе [5] было показано, что химический состав вод малых озер, расположенных на территории нефтедобывающих районов отличается повышенным содержанием NO_3^- до 1.432 мг/дм^3 и содержанием PO_4^{3-} до 0.417 мг/дм^3. Результаты исследования указывают на удовлетворительное качество природных вод, по показателям катионно-анионного состава. Содержание всех определённых катионов и анионов не превышает ПДК [6].

Для оценки экологического состояния водных объектов важно учитывать содержание ПАУ. Авторами [7] показано, что значительной канцерогенной и мутагенной активностью обладают ПАУ с пятичленными кольцами: бенз[a]пирен, бенз(b)флуорантен, бенз(k)флуорантен, дибенз(ah)антрацен. В литературе содержится информация о том, что 5-6 циклические ароматические соединения относятся к техногенному происхождению, в то время как более легкие полиарены связывают с гумусовой и наземной высшей растительностью. Согласно рекомендациям СанПин 1.2.3685-21 содержание нафталина в воде не должно превышать 10 мкг/л, а бенз(a)пирена – 0.01 мкг/л.

Таблица 1. Гидрохимические показатели малых озер Томской области

Показатель	ПДК	Малые озера Томской области				
		Мальцево	Круглое	Савинское	Федосеевское	Песчаное
$БПК_5$ ($мгO_2$/л)	3	3.1	3.8	3.5	3.4	3.1
Раств. кислород (мг/л)	12	7.3	7.3	8.1	7.8	7.5
Ca^{2+} (мг/л)	180	2.83	3.47	36.76	52.19	16.35
Mg^{2+} (мг/л)	50	0.96	0.98	7.00	9.48	5.11
Na^{+}(мг/л)	200	1.83	2.41	10.23	6.13	6.78
K^{+}(мг/л)	200	2.25	1.94	2.52	1.22	0.13
Cl^{-} (мг/л)	300	1.36	2.66	14.98	2.51	0.43
SO_4^{2-} (мг/л)	100	2.62	2.81	3.91	2.91	0.56
PO_4^{3-}(мг/л)	3.5	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
NO_3^{-}(мг/л)	45	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
F^{-} (мг/л)	1.5	<0.1	<0.1	0.21	0.20	0.38
ИЗВ		1.74	1.86	2.00	1.95	1.80

В пробах вод изученных озер были количественно определены индивидуальные ПАУ, результаты представлены на рис. 1.

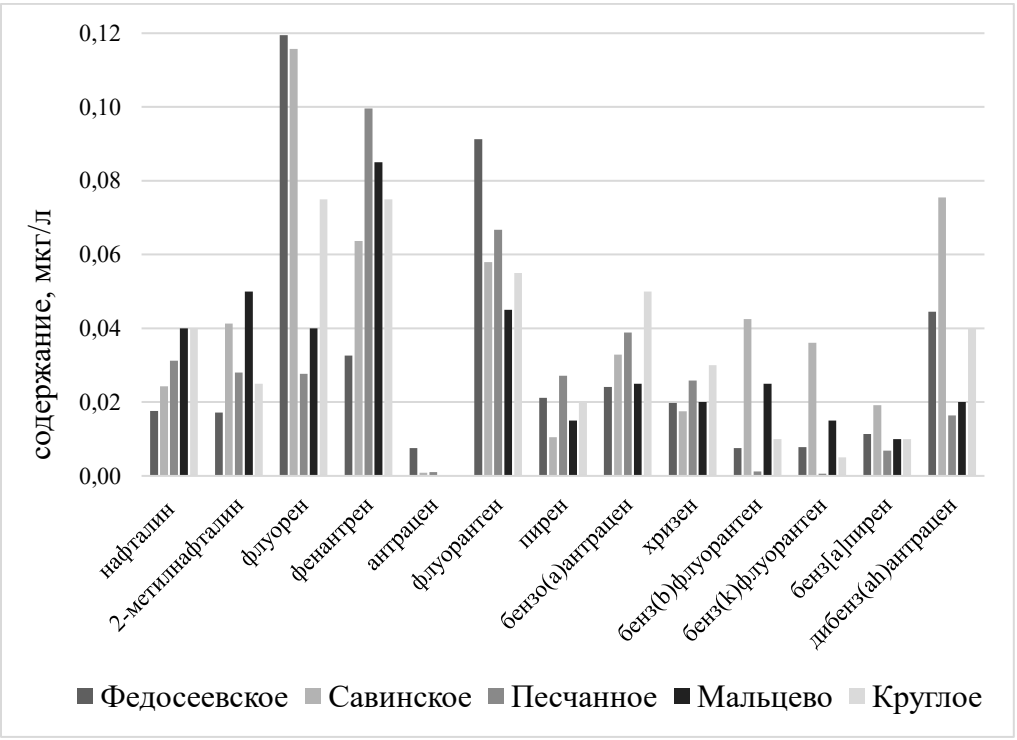


Рис. 1 Содержание ПАУ в малых озерах Томской области

В смеси ПАУ в водных образцах отмечается повышенное содержание таких соединений как флуорен, фенантрен, а также флуорантен. В целом в воде преобладают более легкие 2-3-х ядерные полиарены, обладающие лучшей растворимостью. Для озер Федосеевское и Савинское характерно максимальное содержание флуорена, также для этих озер отмечается высокое содержание флуорантена и дибенз(ah)антрацена.

Для всех изученных озер подтверждается закономерность о количественном преобладании флуорантена над пиреном за счет его лучшей растворимости в воде [7].

Озеро Песчаное отличается минимальным суммарным содержанием ПАУ, при этом для этого водоема характерно максимальное содержание фенантрена, относящегося к фоновым соединениям, происхождение, которого может быть связано с пирогенными процессами хозяйственно-бытовой деятельности. Кроме того, в работе [7] показано, что почвы способны генерировать фенантрен и хризен из погребенной в них биомассы.

Внимание к экологическому состоянию водных объектов вызывает интерес во всем мире. В работах [8,9] показано, что суммарное содержание ПАУ в городских водоемах Китая (оз. Донг и оз. Тансюнь) находится в диапазоне от 0.013 до 0.989 мкг/л. Концентрации ПАУ в поверхностных водах оз. Байкал изменяются от 0.03 до 0.13 мкг/л [10]. Для изучаемых малых озер Томской области полученные результаты суммарного содержания ПАУ в водах изменяются от 0.37 до 0.54 мкг/л.

Оценка качества природных вод с использованием различных коэффициентов и индексов проводится во всем мире [2]. В нашей работе мы использовали один из наиболее распространённых показателей в России: индекс загрязнения воды; для расчета использовали содержание растворенного кислорода, $БПК_5$, ионно-катионный состав воды из таблицы 1.

Показатель ИЗВ для малых озер Томской области находится в интервале от 1.74 до 2.0. Изученные малые озера можно отнести к III классу умеренно загрязненных, ближе к загрязненным [11].

Следует отметить, что есть ряд потенциально опасных загрязняющих веществ, которые оказывают серьёзное токсикологическое воздействие на организм человека и природу, но не нормируются и не учитываются в различных коэффициентах и индексах, используемых для оценки качества воды. К таким веществам относят индивидуальные ПАУ. При расчете ИЗВ из всех используемых параметров наибольший вклад в значение вносят перманганатная окисляемость, биологическое потребление кислорода и химическое потребление кислорода (ХПК) и значения растворенного кислорода. В то же время эти величины являются характеристиками органических соединений, подвергающихся окислению в водных образцах. Известно, что именно ПАУ, имеющие в своем составе более 3-х ароматических колец, являются основными представителями трудноокисляемой растворенной органической компоненты при определении ПО и $БПК_5$ [7].

В нашей работе проведена попытка проследить влияние ПАУ на изменение значений ИЗВ. Была построена зависимость индекса ИЗВ от соотношения высокомолекулярных ПАУ к низкомолекулярным (ВМ/НМ), поскольку высокомолекулярные ПАУ обладают более высоким токсикологическим воздействием на организм человека, чем низкомолекулярные (рис. 2).

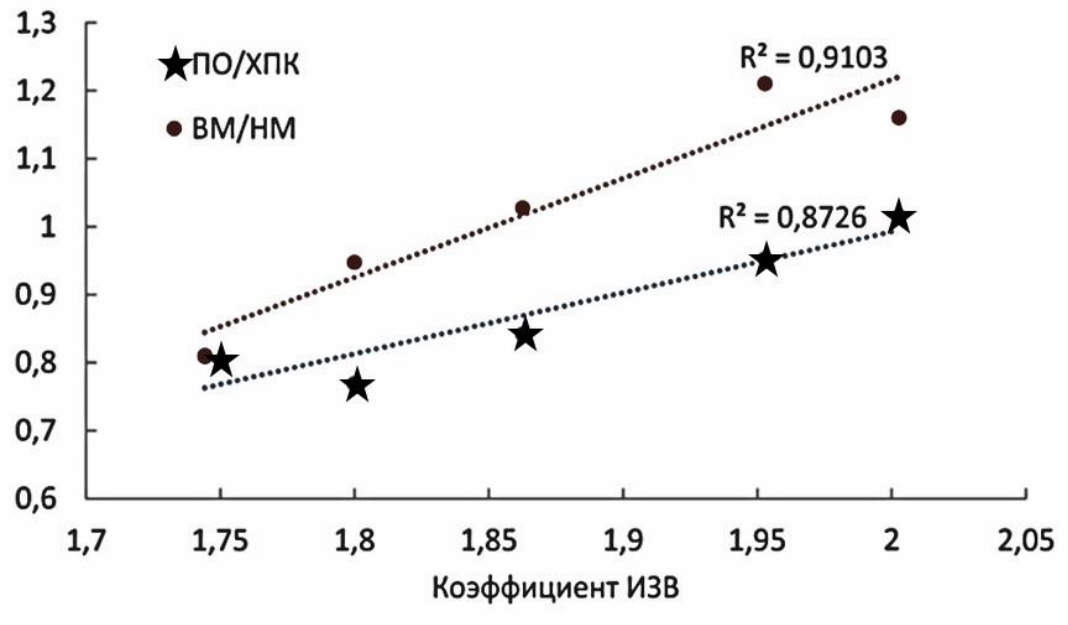


Рис. 2. Соотношение ВМ/НМ к ИЗВ, ПО/ХПК к ИЗВ для малых озер Томской области

Соотношение ВМ/НМ для исследуемых малых озер находится в интервале 0.81 – 1.21. Значения ВМ/НМ >1 указывают на преобладание высокомолекулярных ПАУ с числом колец более 4 над низкомолекулярными. Поскольку ВМ ПАУ обладают большей стабильностью и медленной трансформацией, то более способны к накоплению в природных объектах и дают возможность при систематическом наблюдении за этими соединениями выявить направленность процессов, происходящих при загрязнении водных объектов. Отношение ВМ/НМ ПАУ в водном образце может дать информацию, коррелирующую с коэффициентами оценки качества природных вод, как показано на рисунке 2. Увеличение доли труднокисляемых соединений приводит к повышению уровня загрязнения, что подтверждается зависимостью соотношения ПО/ХПК от ИЗВ, которая также показывает высокую корреляцию (рис.2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования дают возможность оценить текущее экологическое состояние малых озер Томской области с учетом вклада полиароматических соединений. Для всех исследованных объектов содержание приоритетных ПАУ по нормируемым в РФ показателям (нафталин и бенз[а]пирен) ниже и на уровне установленного ПДК. Исключение - озеро Савинское, в котором содержание бенз[а]пирена превышает ПДК в 2 раза.

Рассчитаны значения ИЗВ и показана зависимость между значением данного индекса и соотношением ВМ/НМ ПАУ, а также соотношением ПО/ХПК. Состояние изученных озер позволяет отнести их к категориям от умеренно загрязненным - ближе к загрязненным. Предложенные показатели дают возможность рассматривать их как эффективные маркёры для дальнейшей оценки и сравнения состояния с другими водными экосистемами Томской области.

Использование полиароматических углеводородов природных вод в сравнении с общепринятыми показателями качества вод представляет собой новую методологию геоэкологического мониторинга, основанную на выявлении источников загрязнения и наблюдения связей между ними. Предложенный подход может оказаться эффективным для оценки экологического состояния озер и лечь в основу для дальнейших мониторинговых исследований.

Исследование выполнено в рамках проекта фундаментальных научных исследования Российской академии наук № 0266-2022-0016 «Цифровые гидрогеологические и гидрогеохимические модели нефтегазоносных бассейнов центральных и южных территорий Западной Сибири».

Список литературы

1. Минакова Е.А., Шлычков А. П., Кондратьев С. А., Латыпова В. З. Миграционные потоки биогенных элементов в геосистеме «водосбор — водный объект» в современных условиях // Геоэкология. – 2022. – №2. – с.13-21.

2. Кимстач В.А. Классификации качества поверхностных вод в странах Европейского экономического содружества. // СПб.: Гидрометеоиздат. – 1993. – 48 с.

3. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition / Mark B. Yunkera, Robie W. Macdonaldb, Roxanne Vingarzanc, Reginald H. Mitchelld, Darcy Goyettee, Stephanie Sylvestre// Organic Geochemistry. – 2002. – V.33 – P. 489–515.

4. Freshwater lakes in the Western Himalayan Region: An analysis of the present situation / Neha Kumari, Kushal Thakur, Rakesh Kumar, Sunil Kumar, Danish Mahajan, Bhavna Brar, Dixit Sharma, Amit Kumar Sharma// Water-Energy Nexus. – V. 6. – December 2023. – P. 18-31.

5. Агбалян Е.В., Шинкарук Е.В. Химический состав вод малых озер нефтегазодобывающих районов Севера Западной Сибири // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 7. – С. 45-51.

6. Санитарные нормы и требования СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания".

7. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклоароматических углеводородов. // Л. – Гидрометеоиздат. – 1988. – 233 с.

8. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water Bodies of Dong Lake and Tangxun Lake, China: Spatial Distribution, Potential Sources and Risk Assessment by / Kuo Yao, Zhanling Xie, Lihao Zhi, Zefan Wang and Chengkai Qu // Water. – 2023. – 15(13). – № 2416.

9. The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of soil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: A case study / Q. Song, Z. Xue, H. Wu, Y. Zhai, T. Lu, X. Du, J. Zheng, H. Chen, R. Zuo // Environmental Research. – 2023. – Vol. 216. – Part 4. – 114816.

10. Горшков А.Г., Маринайте И.И., Земская Т.И., Ходжер Т.В. Современный уровень нефтепродуктов в воде оз. Байкал и его притоков // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – №. 18. – С.711-718.

11. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы: Учебно-методическое пособие [Текст] / сост. О.В. Гагарина. // Ижевск: Издательство «Удмуртский университет». – 2012. – 199 с.

II. СИСТЕМА «ВОДА-ПОРОДА-ГАЗ-ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО»

ФОРМИРОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ЮЖНОГО УРАЛА

Абдрахманов Р.Ф.
Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа, hydro@ufaras.ru

Аннотация. В статье рассмотрено формирование минеральных лечебных вод в гидрогеологических комплексах Южного Урала. В пределах Центрально-Уральского бассейна изучены Катав-Ивановское и Ассинское месторождения, а в пределах Магнитогорского мегасинклинория глубинные воды Уральского профиля и Мулдаккульского месторождение минеральных вод. Отмечено, что в ходе седиментогенеза талассогенные растворы карбона и нижней перми были захоронены в горных породах и явились первоосновой подземных седиментогенных вод

Ключевые слова: *минеральные воды, Южный Урал, трещиноватость пород, седиментогенные воды*

Abstract. The article considers the formation of mineral medicinal waters in the hydrogeological complexes of the Southern Urals. Within the Central Ural basin, the Katav-Ivanovskoye and Assinskoye deposits have been studied, and within the Magnitogorsk megasynclinorium, the deep waters of the Ural profile and the Muldakkul mineral water deposit have been studied. It was noted that during sedimentogenesis, thalassogenic solutions of the Carboniferous and Lower Permian were buried in rocks and were the primary basis of underground sedimentogenic waters

Key words: *mineral waters, Southern Urals, rock fracturing, sedimentogenic waters*

Исследование вещественного состава, происхождения и закономерностей скоплений подземных вод горно-складчатых сооружений является одним из наиболее важных направлений региональной гидрогеологии и генетической гидрогеохимии.

Вопреки устоявшимся представлениям о монолитности и водоупорности горных пород, имеется достаточно сведений об их трещиноватости и водопроницаемости. Анализ материалов по пустотности пород глубоких горизонтов (СГ-3-Кольская сверхглубокая, СГ-4-Уральская сверхглубокая, Кулгунино-1, Урал-Тау-1, скважины Уральской и Асташской нефтеразведочных площадей и др.) свидетельствует о том, что породы разбиты многочисленными трещинами и изменены контактово-метасоматическими процессами.

В скважине «Урал-Тау-1», заложенной на границе Зилаирского синклинория и антиклинория Урал-Тау, в сланцах и кварцитах до глубины 3648–3960 м отмечаются разнонаправленные трещины, выполненные кварцем и кальцитом. На Асташской площади (рис. 1) в Зилаирском синклинории метаморфические породы (аргиллиты, перекристаллизованные известняки) характеризуются наличием тонких трещин на глубине >3200 м. Пористость известняков серпуховского яруса в скважине № 2 в среднем составляет 1,76 %, а визейского – 3,14 %. В скважинах №№ 6 и 11 пористость известняков турнейского яруса <0,68 %. Терригенные породы зилаирской свиты характеризуются пористостью 0,4–3,5 %. О проницаемости пород косвенно можно судить по водопритокам. В скважине №1 из интервала 1231–1365 м получен приток воды 3,5 м^3/сут, в скважинах №№ 2 и 6 в интервалах 2440–2460 и 2670–2840 м – слабый приток воды с плотностью 1,0037 и 1,0130 г/см^3.

Наиболее проницаемыми являются вулканогенно-осадочные породы Уральской площади Магнитогорского мегасинклинория. В скважине № 2 при бурении рифогенных известняков кизильской свиты отмечено интенсивное поглощение промывочной жидкости на глубине 3085 и 4195 м; в скважине № 4 из отложений кизильской свиты

приток пластовой воды составил 62,4 м^3/сут. В скважине № 7 из интервалов 2786–2815 и 3856–3932 м получен приток пластовой воды хлоркальциевого типа.

Нашим исследованиями [2, 3] установлено широкое развитие минеральных лечебных вод в глубоких гидрогеологических комплексах Южного Урала. В пределах Центрально-Уральского бассейна изучены Катав-Ивановское и Ассинское месторождения, а в пределах Магнитогорского мегасинклинория глубинные воды Уральского профиля и Мулдаккульского месторождение минеральных вод.

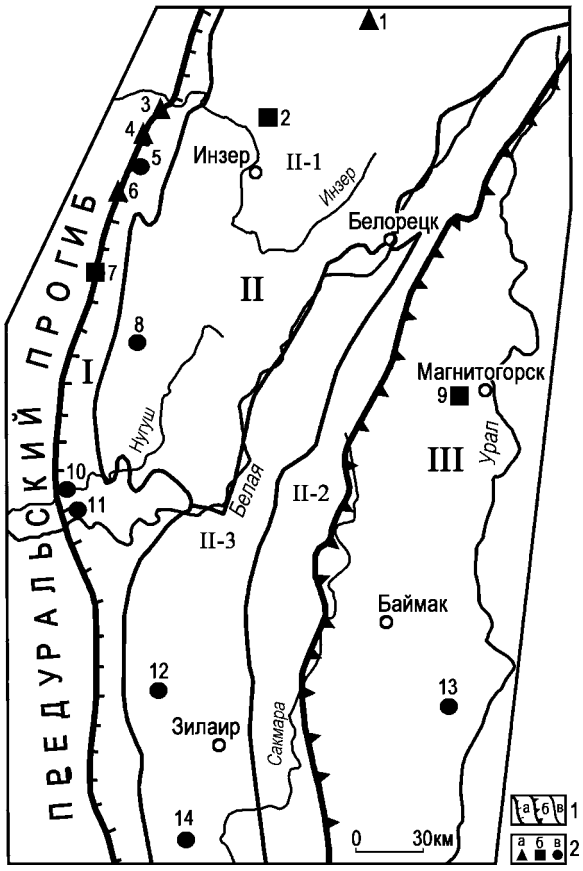


Рис.1. Схема тектонического районирования Южного Урала [1] и расположения пунктов гидрогеохимического опробования

1 – границы: а – Предуральского прогиба и Западно-Уральской внешней зоны складчатости (I), б – Центрально-Уральского поднятия (II) и Магнитогорского мегасинклинория (III), в – структур Центрально-Уральского поднятия (II-1 – Башкирский мегантиклинорий, II-2 – Уралтауский мегантиклинорий, II-3 – Зилаирский синклинорий); 2 – пункты гидрогеохимического опробования: а – минеральные источники (1 – Катав-Ивановские, 3 – Тереклинские, 4 – Ташастинские, 6 – Аскынский; б – гидроминеральные месторождения (2 – Ассинское, 7 – Красноусольское, 9 – Мулдаккульское); в – скважины нефтеразведочных площадей (5 – Архлатышская, 10 – Мурадымовская, 11 – Иштугановская, 12 – Асташская, 13 – Уральская, 14 – Сакмарская), 8 – Кулгунинская параметрическая скважина

Катав-Ивановское месторождение (см. рис. 1) приурочено к трещиноватым кварцевым песчаникам зигазино-комаровской свиты среднего рифея (юрматинская серия), в северо-восточном продолжении Инзерского синклинория. Источник представляет пластовый выход (~ 100 м). Дебит отдельных выходов составляет 1.5–2.0 л/с. Суммарный дебит колеблется от 10 л/с до 20–25 л/с. Химический состав источника хлоридный натриевый, минерализация 4.2 г/дм^3, T ~ 13° С. Судя по этим данным, а также расположению источника в структуре Инзерского синклинория он, как и Ассинские минеральные источники, генетически связан с процессами смешения солёных глубинных вод с пресными водами зоны интенсивной циркуляции.

Ассинское месторождение минеральных вод. Месторождение расположено в западной бортовой части Инзерского синклинория, являющегося одной из структур Центрально-Уральского поднятия. Синклинорий сложен породами каратауской серии позднего протерозоя (рифея), состоящей снизу вверх из зильмердакской, катавской и инзерской свит, согласно залегающих друг на друге. Зильмердакская свита мощностью 750–2 800 м делится на бирьянскую, нугушскую, лемезинскую и бедерышинскую подсвиты, сложенные кварцевыми и кварцитовидными песчаниками, алевролитами и аргиллитами с прослоями конгломератов и сланцев. Катавская свита (150–650 м)

представлена известняками и мергелями, а инзерская (100–1 000 м) – алевролитами, песчаниками и сланцами.

Месторождение представлено восходящими источниками естественного происхождения (количество их достигает 20, суммарный дебит ~30 л/с) в основании левого склона долины речки Юрмаш (правый приток р. Инзер). Минеральные воды приурочены к контакту катавских известняков с бедерышинскими песчано-глинистыми сланцами, слагающими крылья и ядро небольшой брахиантиклинали, осложняющей западный борт Инзерского синклинория.

Установлено, что по термогидрогеохимическим показателям минеральные источники имеют хлоридный натриевый состав. Минерализация от 8.9 до 18.9 г/дм^3 и T 15.0–15.3°С. Источник, используемый в санатории «Ассы» для приготовления лечебных ванн, имеет состав:

$$N_2M18.5\frac{Cl80SO_419HCO_31}{Na76Ca14Mg9K1}pH6.65Eh+30T15.2.$$

Выход минеральной воды приурочен к трещиноватым, местами закарстованным известнякам приконтактной зоны катавской свиты с песчаниками зильмердакской свиты. Дебит источника стабилен во времени и составляет 4.5–5.0 л/с.

Участие процессов смешения природных растворов с различной степенью минерализации в формировании геохимической гаммы Ассинских минеральных вод вполне очевидно. Судя по всему, исходными для них служат маломинерализованные метеогенные воды катавских и инзерских отложений и солёные воды (возможно, слабые рассолы) морского происхождения, выдавливаемые под влиянием гидростатического давления из наиболее погруженных частей Инзерского синклинория.

Присутствие глубинной составляющей в минеральных водах подтверждается также и результатами изучения их гелиеносности. Установлено, что приповерхностное поле гелия Инзерского синклинория в районе Ассинского месторождения отличается сильной изменчивостью: амплитуда содержания He в подземных водах достигает трех порядков: $n\times(10^{-5}–10^{-3})$ мл/л.

Высокоминерализованные Ассинские минеральные воды характеризуются аномальными концентрациями гелия от $(1.7–15)\times10^{-3}$ мл/л до $(4.9–11)\times10^{-2}$ мл/л. Связь гелия с хлором (минерализацией), T и величиной Eh – прямая. Это, с одной стороны, свидетельствует о разбавлении субтермальных глубинных соленых вод, формирующихся в восстановительной геохимической обстановке, холодными пресными кислородсодержащими водами, а с другой – о совместных путях миграции с глубины гелия и подземных вод в виде единого хлоридного газоводного флюида (N_2, H_2S, He).

В ходе восходящей разгрузки, помимо простого разубоживания его, судя по всему, происходит слабая метаморфизация воды за счёт обменно-адсорбционных процессов в глинистых породах, в результате чего в наименее минерализованных смесях появляется в небольших количествах хлористый кальций.

Величина геотермического градиента в Башкирском мегантиклинории составляет 1.1°С/100 м, глубина залегания и температура нейтрального слоя – 25 м и 4°С. Исходя из этих данных, а также принимая во внимание температуру минеральных источников (15.0–15.5°С), рассчитана глубина формирования питающих источники струй. Она составляет 950–1 000 м и соответствует максимальному погружению зильмердакской свиты в Инзерском синклинории.

Информацию о гидрогеохимических условиях глубоких частей недр Магнитогорского синклинория несут скважины **Уральского профиля**, разбуренного в его южной части (см. рис. 1) и Мулдаккульского месторождения минеральных вод. Скважиной № 2 Уральского профиля из известняков нижнего карбона при испытании на приток интервала 3.86–3.93 км был получен высоко метаморфизованный рассол типа IIIб следующего состава:

$$M62.8\frac{Cl98SO_4 2}{Ca46Na40Mg14}rNa/rCl0.41.$$

Хлоридные кальциево-натриевые воды с минерализацией 18.7 г/дм^3 установлены и скважиной 4 в нижнекаменноугольных эффузивно-осадочных породах на глубине 2.02–2.12 км. Заслуживает внимания повышенная концентрация в водах брома (51.8 мг/дм^3), близкая к таковой в морской воде. Судя по величинам отношений rNa/rCl (0.64) и Cl/Br (196), эти воды (как и воды скважины 2) являются разбавленными седиментогенными рассолами. Исходными для них являются рассолы каменноугольного морского бассейна, захороненные в породах и претерпевшие в них метаморфизацию в прямом направлении (с образованием $CaCl_2$).

Мулдаккульское месторождение минеральных вод приурочено к Кизильскому синклинорию в приосевой части Магнитогорского мегасинклинория. Синклинорий ограничен с запада Ирендыкским, а с востока – Ахуновско-Кацбахским антиклинориями. Синклинорий осложнен структурами более мелкого порядка, заложенными в нижнем карбоне во время интенсивных тектонических подвижек. К одной из таких структур – Мулдаккульской синклинали – и приурочено месторождение минеральных вод в терригенно-карбонатных трещиноватых и закарстованных кизильских породах, терригенных загипсованных уртазымских отложениях и терригенных янгельских осадках. В результате восходящей разгрузки по зоне разлома глубинных соленых, возможно рассольных, вод и смешения их с пресными инфильтрационными водами в озёрной котловине Мулдаккуль в янгельском водоносном комплексе сформировалась контрастная куполовидная гидрогеохимическая аномалия. Верхняя зона мощностью 50–80 м представлена SO_4-HCO_3 и Cl-HCO_3 водами с минерализацией 0.4–1.0 г/дм^3. Они принадлежат к I (содовому) или II (сульфатно-натриевому) геохимическим типам. Содержание в водах $NaHCO_3$ достигает 29 %, а Na_2SO_4 15 %. Ниже до глубины 100 м расположена зона SO_4-Cl вод типа IIIа (хлормагниевого) с минерализацией 1-3 г/дм^3. Под ней до глубины 500 м находится зона хлоридных вод типов IIIб (хлоркальциевого) или IIIа с минерализацией до 37.2 г/дм^3. Катионный состав вод в пределах всех зон – двух- и трехкомпонентный: Mg-Na, Mg-Ca, Ca-Na, Ca-Mg-Na. Наиболее минерализованная вода, выведенная скважиной 10 с глубины 350 м, имеет следующий состав:

$$HeN_2M37.2\frac{Cl96SO_4 4}{Na65Ca31Mg4}pH6.0.$$

Солевой состав минеральных вод также довольно сложный. Обычно в нем преобладают NaCl, $MgCl_2$ и $CaCl_2$, общий вклад которых в формирование минерализации составляет 70–90 %. Подчинённое положение занимают $MgSO_4$, $CaSO_4$ и особенно $Ca(HCO_3)_2$. В водах Cl-Ca-Na состава с минерализацией >15–20 г/дм^3 содержание специфической соли $CaCl_2$, определяющей хлоркальциевый геохимический тип вод, достигает 29 % (скв. №№ 2, 10, 14). Но наиболее обогащены $CaCl_2$ (53–70 %) воды с относительно невысокой минерализацией (2.4–4.6 г/дм^3), залегающие на глубине 120–180 м.

Минеральные воды отличаются повышенным содержанием микроэлементов талассогенного и биогенного происхождения (мг/дм^3): Br<33.9 (наиболее часто встречающееся значение 15–20), H_3BO_3<20.0 (8–14), I<2.0 (0.8–1.3), F<1.25 (0.2). Концентрация ОВ колеблется (мг/дм^3): нейтральные вещества (смолы, масла) 5.6–9.2, кислые битумы (нафтеновые кислоты, кислые битумы) 4.8–6.6, спирторастворимые вещества (спиртовые смолы, гумусовые вещества) 5.2–8.34. Суммарное содержание ОВ составляет 19.2–23.6 мг/дм^3. Радиоактивные элементы определены в воде скважины 10 в количестве: U 6×10–5 мг/дм^3, Sr–2 14.95–15.1 мг/дм^3, а 90Sr 1×10–12 Си/дм^3.

Минеральные воды отличаются не только ионно-солевым, микрокомпонентным и газовым составом, но и изотопным составом водорода и кислорода растворителя H2O, отражающем условия формирования и генезис вод. Постоянны концентрации изотопов водорода 2H (D) и кислорода 18O в водах Мирового океана, который принят за стандарт

(SMOW). Он равен для дейтерия (RDSMOW) 0.0158 %, а для 18O (R18OSMOW) – 0.1933 %. При изотопных исследованиях содержание D и 18O принято давать не в абсолютных величинах, а в относительных единицах стандарта (δ, ‰), отражающих отклонения от содержания этих изотопов в океанической воде:

$$\delta = \frac{R_{пр} - R_{SMOW}}{R_{SMOW}} \times 10^3, \text{ ‰},$$

где Rпр и RSMOW – изотопные отношения (D/1H и 18O/16O) в пробе воды и стандарте SMOW. Таким образом, для океанической воды δDSMOW = 0 и δ18OSMOW = 0. Положительные значения δD и δ18O свидетельствуют об «утяжелении» исследуемой воды относительно стандарта, а отрицательные – об «облегчении».

Изотопный состав природных вод подвержен значительным колебаниям вследствие фракционирования изотопов H и O под влиянием процессов испарения и конденсации, обменом с породами, газами и др. Процессы фракционирования изотопов в атмосферных и поверхностных водах гумидных областей Земного шара отражены в выведенном Х.Крейгом уравнении: δD = 8δ18O + 10.

Графическим выражением этого уравнения служит прямая линия, получившая название линии Крейга. Для выяснения вопросов формирования подземных вод с ней сравнивают фактические данные изотопных исследований.

Инфильтрогенные Cl–Na рассолы отличаются пониженными и низкими содержаниями дейтерия (δD ‰ –110…–170) и, таким образом, сильно отличаются от океанической воды. Метеогенный генезис растворителя подчёркивается близостью фигуративных точек рассолов этого состава к линии Крейга атмосферных и поверхностных вод суши. Фигуративные точки седиментогенно-эпигенетических Cl–Ca рассолов тяготеют к прямой, расположенной правее линии Крейга. Они «утяжелены» относительно Cl–Na рассолов (δD ‰=–90…–20) и «облегчены» по сравнению с водой Мирового океана.

Исследуемые минеральные воды (скв. 10 и 11) занимают промежуточное положение (δD ‰=–101…–78, δ18O ‰=–11…–13) между линией Крейга и седиментогенными рассолами, что подчёркивает их смешанное инфильтрогенно-седиментогенное происхождение. Отличается по изотопному составу и вода оз. Мулдаккуль, для которой δD ‰=–52.7, δ18O ‰=–4.5. Положение фигуративной точки на рис. 2 указывает, что вода в озере подвержена значительному испарительному концентрированию.

Судя по литолого-фациальному облику терригенных и карбонатных толщ каменноугольного и нижнепермского возраста в районе Мулдаккульского месторождения минеральных вод широкое развитие получили морские и лагунные палеобассейны с водами Cl-Mg-Na состава повышенной солёности (36–150 г/дм^3). Лагунно-морские бассейны с солеными и рассольными водами, судя по палеогеографическим данным, существовали также в турнейское и визейское аремя. Поэтому следует полагать, что высокоминерализованные седиментогенные воды свойственны не только янгельской свите, но и глубоким осадочным комплексам нижнего карбона.

Таким образом, в ходе седиментогенеза талассогенные растворы карбона и нижней перми были захоронены в горных породах и явились первоосновой подземных седиментогенных вод. В дальнейшем на стадии эпигенеза Cl-Mg-Na воды были превращены в растворы Cl-Ca типа под влиянием процессов метаморфизации в системе «вода–порода» (альбитизации, доломитизации, обменной адсорбции).

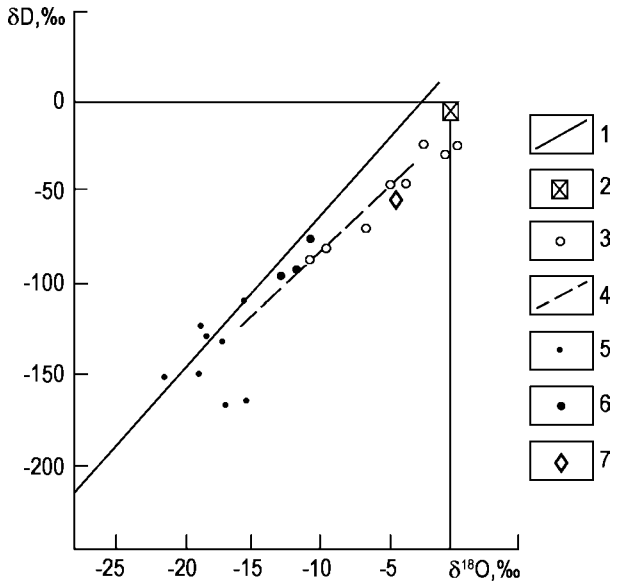


Рис. 2. Мулдаккульские минеральные воды на диаграмме изотопного состава некоторых генетических типов природных вод

1 – линия Крейга метеогенных и поверхностных вод, 2 – стандарт океанической воды (SMOW), 3 – седиментогенные хлоридные кальциевые рассолы, 4 – линия хлоридных кальциевых рассолов, 5 – инфильтрогенные хлоридные натриевые рассолы 6 – Мулдаккульские минеральные воды (скв. 10, 11), 7 – вода озера Мулдаккуль

Список литературы

1. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г., Пучков В.Н. Геохимические особенности и происхождение глубинных газово-жидких флюидов Урала // Доклады Академии наук, 2013, том 452, №1. С. 70-74.

2. Абдрахманов Р.Ф. Пресные подземные и минеральные лечебные воды Башкортостана. Уфа: Гилем, Башк. энцикл., 2014. 416 с.

3. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г. Геохимия и формирование подземных вод Южного Урала. Уфа: Гилем, 2010. 420 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Бердова Д.В., Дубовецкий В.Н., Белкин И.Ю.
ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, tnnc@rosneft.ru

Аннотация. В докладе освещены основные аспекты работы с обширными базами гидрогеохимических данных, вопросы, возникающие при обработке и определении кондиционности результатов анализов проб подземных вод. Для принятия оптимальных решений в области гидрогеохимии недостаточно только субъективного мнения экспертов, в работе продемонстрировано применение гибкого математического аппарата для решения задач этой области. Отражены наработки и перспективные возможности внедрения машинного обучения в процесс анализ данных.

Ключевые слова: *база данных, минерализация, кондиционность пробы, химический анализ.*

Abstract. The report highlights the main aspects of working with extensive databases of hydrogeochemical data, issues arising during the processing and determination of the conditioning of the results of analyses of groundwater samples. To make optimal decisions in the field of hydrogeochemistry, only the subjective opinion of experts is not enough; the paper demonstrates the use of a flexible mathematical apparatus to solve problems in this field. The developments and promising opportunities for the introduction of machine learning into the data analysis process are reflected.

Key words: *database, mineralization, sample conditioning, chemical analysis.*

Гидрогеохимия, как прикладная наука, задействована на всех этапах освоения нефтегазовых месторождений. От геологоразведочных работ и оценки запасов, когда

для корректного подсчета УВС необходимо знать значение минерализации пластовых вод, до контроля обводненности добывающих скважин на стадии эксплуатации месторождения. Проведение ГРР на новых активах (ТРИЗ, месторождения на шельфе) требует детального изучения объектов эксплуатации, и в том числе, подземных вод. Такое детальное изучение недр ставит перед исполнителями ряд задач, связанных с обобщением и анализом, получаемой информации.

При изучении гидрохимической информации специалисты часто сталкиваются с отсутствием структурированных данных, содержащих результаты анализов проб подземных вод и сведения об их кондиционности. Дополнительным осложняющим фактором на новых участках недропользования является отсутствие «эталонных проб» пластовых флюидов (подземных вод), поэтому приходится и перечень анализируемой информации – анализировать весь массив информации. Такие операции отнимают значительную часть времени, однако рутинные задачи могут быть сокращены в пользу более важных производственных вопросов.

В связи с этим, целью работы является структурирование и консолидация в едином информационном пространстве необходимых данных по исследованиям проб пластовых вод, а также последующая автоматизация рутинных аналитических операций при создании гидрохимичекой модели объектов эксплуатации с использованием гибкого математического аппарата. При такой постановке цели объектом анализа может выступать как нефтяной пласт (отдельный объект разработки), так и водоносный комплекс в целом.

Одной из систем комплексирования данных и методов изучения гидрогеологических объектов может выступать автоматизация процессов. Согласно концептуальной схеме, инструмент представляет собой: базу данных, алгоритмы отбраковки, локальную аналитику и вывод результатов.

На данном этапе реализации инструмента для хранения данных используется MS Access. Структура представляет собой несколько связанных таблиц, в соответствии с которыми вводятся и хранятся данные. Доступ к данным осуществляется на языке SQL, что позволяет в будущем рассмотреть вариант переноса БД на выделенный SQL сервер. Наполнение БД осуществляется путем ввода значений минерализации, физических характеристик пробы и содержания компонентов в мг/дм^3, которые автоматически пересчитываются в другие единицы измерения, используемые при анализе. На этапе ввода отображаются возможные несоответствия в данных, есть возможность автоматической корректировки, также рассчитывается катион-анионная разница. Эти аспекты являются основой для последующих алгоритмов отбраковки.

После создания базы данных следующим этапом анализа являются алгоритмы отбраковки, они включают в себя несколько групп операций. Первый этап – общие критерии, на основании которых проба автоматически помечается как «брак». Например, анализируется следующие первоочередные критерии: плотность воды не должна быть меньше 1 г/см^3, разница между суммой анионов и суммой катионов в мг-экв/дм^3 не должна превышать 10%, так как по принципу электронейтральности эти значения должны быть равны.

Второй этап – сравнение с эталонной пробой. Некоторые компоненты, например, калий в высоких концентрациях, в целом, не характерен для природных подземных вод. Другие компоненты сопоставляются по содержаниям с аналогичными в кондиционных пробах данного объекта. В случае несоответствия, эталонной пробе или значительного отклонения, пробе присваивается статус «требует уточнения». После чего требуется более детальный анализ и просмотр «в ручном режиме» профильными специалистами (рис. 1).

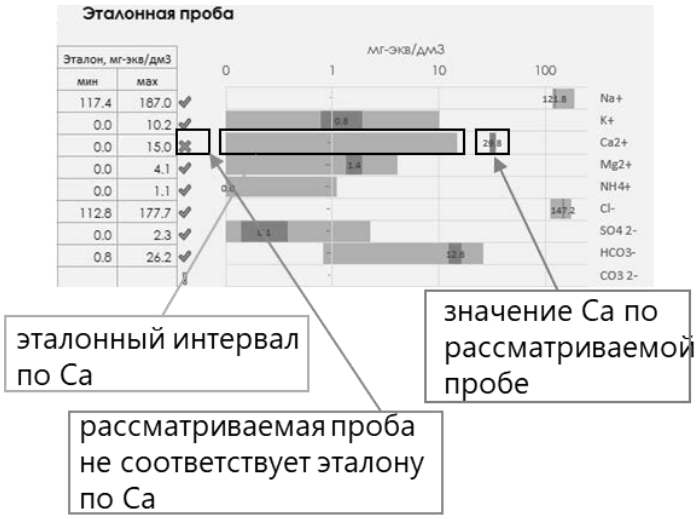


Рис. 1. Сравнение результата анализа пробы воды с эталонным интервалом

Для того, чтобы отойти от формализма чётких логических правил и субъективного мнения экспертов было принято решение использовать для анализа данных проб подземных вод алгоритмы, использующие машинное обучение [4]. На первом этапе с их помощью можно получить обученную модель, основанную на всём имеющемся объёме информации по пробам. С помощью модели выполняется дополнительная проверка кондиционности пробы, менее строгая к отбраковке по стандартным алгоритмам. Модель позволяет найти новые зависимости, которые неочевидны эксперту при классическом анализе результатов, что делает итоговую гидрохимическую модель объекта более гибкой, но в то же время обоснованной. Так же с помощью созданных моделей машинного обучения можно ответить на вопросы «к какой группе пластов может принадлежать проба с заданными свойствами?» или «если проба была бы кондиционна, то какая у неё могла бы быть минерализация?» и т.д. Это делает возможным прогнозирование минерализации неопробованных пластов по группе результатов-аналогов.

Третий этап – построение уточняющих графиков. Это графики, описывающие основные распределения, например, минерализации по глубине или зависимости минерализации от содержания макрокомпонентов в %-экв/дм^3, и др. Графики строятся для визуализации результатов отбраковки и уточнения по «пропущенным» пробам (Рис. 2).

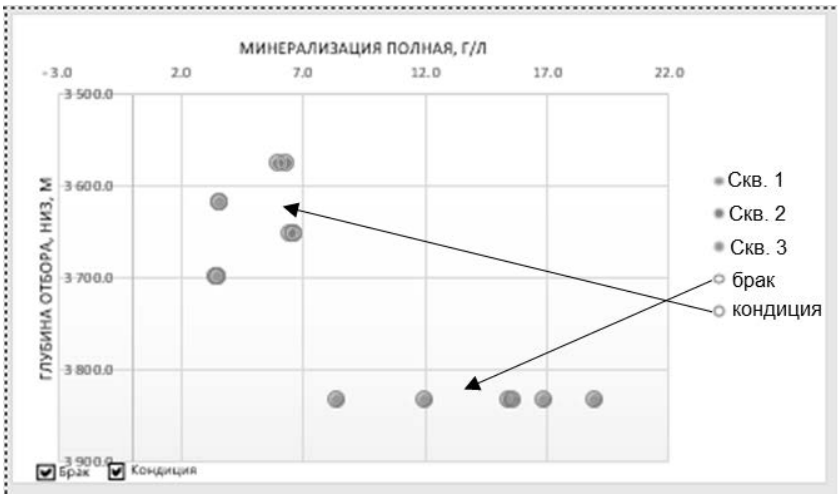


Рис. 2. График зависимости содержания Na^+ в %-экв/дм^3 от минерализации

По результатам интерпретации в модуле «Локальная аналитика» формируется таблица со сводной информацией по всем пробам, возможностью отображения результатов в трех единицах измерения (мг/дм^3, мг-экв/дм^3, %-экв/дм^3), средних значений и корректировкой графиков в зависимости от решаемых задач.

Модуль обладает высокой вариативностью работы с анализируемыми данными. Возможно многократное перестроение графиков, на которых отображаются как отдельно пробы со статусом «брак» или «кондиция», так и все пробы с отметкой статуса. Такая визуализация поможет в поиске «пропущенных проб», что положительно скажется на результирующей модели гидрохимического облика.

Процесс анализа гидрохимических данных, оценка кондиционности проб и выдача итогового результата занимают значительное время. За счет использования разрабатываемого ПО удалось решить три задачи: упорядочить и систематизировать все текущие и фондовые результаты исследования проб подземных вод по интересующему региону; повысить прозрачность принятия решения о качестве проб подземных вод; значительно ускорить процесс анализа и принятия решений по гидрохимическим вопросам. При этом количество типовых, рутинных операций уменьшается вдвое, появляется больше времени и простора для аналитической работы. Перечень операций при автоматизированном подходе к процессу анализа выглядит так: ввод новых проб и автоматические расчеты, сравнение с эталонной пробой, просмотр проб, которые требуют доработки, построение графиков, карт и вывод текстовой части.

Разработанное ПО позволяет комплексно рассматривать весь имеющийся набор проб, что дает ключ к пониманию процессов формирования пластовых вод и залежей УВС, за счет возможности привязки к фациальной картине развития регионального гидрогеологического комплекса.

Выводы

1. Расширение гидрохимической базы и поиск новых инструментов отбраковки и определения состава и генезиса подземных вод будет совершенствовать аналитическую составляющую аппарата. Кроме того, увеличение масштаба работ для выделения региональных закономерностей, может служить основой для получения представления о процессах формирования химического состава подземных вод и различий в нем, а также помогает в изучении процессов формирования залежей УВС.

2. Подходы, применяемые в этой работе, сокращают затраты времени почти на 50%, а понятные алгоритмы позволят использовать инструмент сотрудникам разного уровня подготовки, простая визуализация упрощает восприятие итоговой информации.

3. Перспективы использования инструмента связаны с его мощным потенциалом для использования в НИР по выявлению и обоснованию гидрохимической зональности и гидрохимического режима пластовых вод.

Список литературы

1. Большакова М.А., Корзун А.В., Ступакова А.В., Сауткин Р.С., Калмыков А.Г., Абля Э.А., Краснова Е.А., Харитонова Н.А., Тихонова М.С., Козлова Е.В., Санникова И.А., Рязанова Т.А., Белкин И.Ю. (2021). Информационная значимость геохимических и гидрогеологических данных в нефтегазовой геологии. Георесурсы, 23(2), с. 214-220. DOI: https//doi/org/10.18599/grs.2021.2.21

2. Киреева Т.А. Нефтегазопромысловая гидрогеохимия: учебное пособие / Т.А. Киреева. – Москва: МАКС Пресс, 2017. – 224 с.

3. Новиков Д.А. Гидрогеологические предпосылки нефтегазоносности западной части Енисей Хатангского регионального прогиба // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 881-901. DOI:10.5800/GT-2017-8-4-0322/

4. Открытая программная библиотека, разработанная компанией «Яндекс». https://catboost.ai/

5. Ставицкий Б.П., Курчиков А.Р., Конторович А.Э., Плавник А.Г. Гидрохимическая зональность юрских и меловых отложений Западно-Сибирского бассейна / Б.П. Ставицкий, А.Р. Курчиков, А.Э. Конторович, А.Г. Плавник // Геология и геофизика. – Т.45. - № 7. – с. 826.

ОЦЕНКА СВЯЗАННОСТИ ПОТОКА В ТРЕЩИНОВАТОМ МАССИВЕ НА УЧАСТКЕ «ЕНИСЕЙСКИЙ» В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МНОГОТОЧЕЧНОЙ ГЕОСТАТИСТИКИ

Вилькина М.В.[1,2], Никуленков А.М.[1,2], Румынин В.Г. [1,2]
[1]*СПб отделение Института геоэкологии РАН, Санкт-Петербург,*
wilkina.mari@hgepro.ru, annik@hgepro.ru, rumynin@hgepro.ru
[2]*Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург*

Аннотация. Изучение фильтрационных свойств трещиноватого массива является важной задачей, стоящей перед исследователями в рамках глубинного захоронения радиоактивных отходов. В условиях ограниченного количества полевой информации, авторами рассматривается стохастический подход к воспроизведению геологической среды с помощью алгоритмов многоточечной геостатистики. Эффективные коэффициенты фильтрации используются для оценки полученных результатов.

***Ключевые слова**: многоточечная геостатистика, перколяция, дайки, трещиноватость, захоронение РАО, эффективные параметры*

Abstract. Studying the flow parameters of the fractured crystalline massif is an important question in the scope of nuclear waste disposal. Under the condition of a lack of field data, the authors have examined the stochastic approach to represent the geological media with the use of the multiple-point geostatistic approach. Effective hydraulic parameters are used to assess the results obtained.

***Key words**: multiple-point geostatistics, percolation, dykes, fractures, radioactive repository, effective hydraulic parameters*

Место для глубинного захоронения радиоактивных отходов должно удовлетворять целому ряду геологических, социальных, экономико-политических и логистических факторов. На территории России для размещения ПГЗРО были выбраны кристаллические породы Енисейского кряжа. Предполагаемое месторасположение ПГЗРО находится на территории закрытого административно-территориального образования Железногорск (Красноярск-26), в 60 км на северо-восток от г. Красноярска. Участок, на которой проводятся профильные исследования по изучению свойств трещиноватого массива, получил название «Енисейский».

В нескольких километрах на северо-запад от участка Енисейский расположен уже действующий объект атомной энергии – горно-химический комбинат (ГХК). Данное предприятие функционирует с середины прошлого века. Его особенность заключается в том, что основные производственные мощности ГХК расположены внутри скального массива [0].

На территории исследования выделяют один водоносный комплекс метаморфических изверженных пород архея, в котором различают два типа подземных вод, сопряженных с различным типам трещиноватости. Первый тип – трещиновато-грунтовый тип подземных вод, приуроченный к зоне экзогенной трещиноватости, мощность которой по разным оценкам, варьирует от 80 до 200 м. Второй тип – трещинно-жильный, образующий локальные, линейно вытянутые обводненные зоны, которые прослеживаются на значительные глубины и расстояния. Таким образом положение трещин в массиве контролирует движение подземных вод.

С помощью корреляционного анализа было установлено, что зоны с повышенным модулем трещиноватости $M_{тр} \geq 10$ в 60% процентов случаев приурочены к внедрению в массив даек. Таким образом можно заключить, что направление движения подземных вод ассоциировано с простиранием даек. Отсюда встает необходимость пространственного описания даек в теле массива.

Существует два принципиальных подхода к моделированию геологической среды: детерминированный и стохастический. Первый метод отвечает ситуации, когда на основе

точных данных о геологической структуре создается детальная модель среды. Для данного метода необходимо наличие большого числа первичной информации, в частности, данных бурения скважин. Свои детерминированные модели геологической среды участка Енисейский в свое время были разработаны и предложены такими авторами как К.А. Заболоцкий («Красноярский филиал АО Государственный специализированный проектный институт»), О.А. Морозов (Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН). Детерминированный подход является наиболее предпочтительным с точки зрения детальности, однако главным ограничением при его использовании является достаточность первичной информации. На настоящий момент информация о геологическом строении участка Енисейский ограничена керновым материалом двух десятков скважин. Данный факт определяет необходимость рассмотрения альтернативного метода воспроизведения геологического строения среды – стохастического.

Методы исследования. Стохастический метод моделирования геологической среды основан на вероятностных подходах, когда достоверные данные о геологическом строении территории – керновый материал – анализируется статистически на предмет пространственной изменчивости. В настоящий момент выделяют два подхода к описанию пространственной неоднородности: двухточечный и многоточечный.

Двухточечная или классическая двухточечная статистика получила свое название, так как основана на вычислении разницы (дисперсии) между двумя точками в пространстве (рис. 1а). В ее основе лежит работа [0], в которой говорится, что при наличии фактически измеренных значений $z(x_i)$ функции $Z(x)$ в нескольких точках двух- или трехмерного пространства x_i, необходимо провести анализ изменчивости функции $Z(x)$, чтобы предсказать значение z в любой точке x.

$$\sigma_z^2 = Var(Z) = \frac{1}{N}\sum_{i=1\dots N}(z_i - m_Z)^2, \quad (1)$$

где σ_z^2 – дисперсия переменной Z, m_z – среднее (математическое ожидание), N – число измерений генеральной совокупности, z_i – реализация случайной величины Z.

Данный метод хорошо зарекомендовал себя при моделировании геологически-правдоподобных линзовидных и слоистых тел. Однако использование всего двух точек для определения пространственной неоднородности не позволяет применять данный метод для воспроизведения объектов с признаком формы – например, даек. Необходимость статистически-достоверно воспроизводить геометрически-сложные структуры обозначила потребность в развитии следующего метода – многоточечной геостатистики.

Многоточечная геостатистика оценивает взаимную корреляцию между тремя и более точками пространства. Так как прямые измерения (скважины) в геологии часто ограничены по количеству, источником информации о неоднородности геологической среды для многоточечной статистики стали тренировочные образы (как вариограммы в двухточечной). Впервые алгоритм использования тренировочных образов в качестве источника информации был изложен в работе Guardiano и Srivastava [0]. Как уже отмечалось, подземные выработки ГХК находятся всего в нескольких километрах к северо-западу от участка Енисейский и относятся к единому структурному блоку. Большой объем достоверно задокументированной информации о геологическом строении территории делают объект ГХК привлекательным с точки зрения использования его в качестве тренировочного образа (рис. 1б).

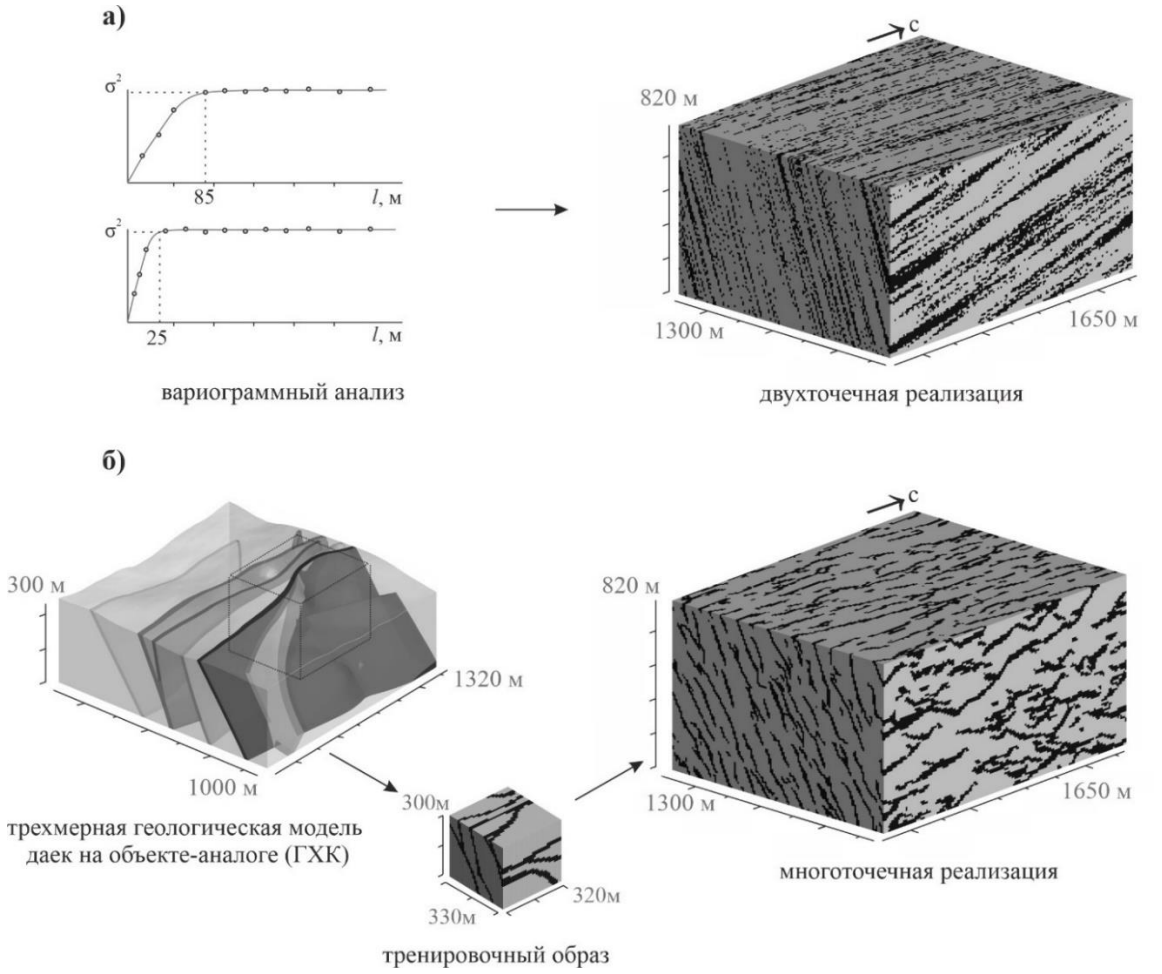


Рис. 1. Примеры реализаций комплекса даек с помощью двухточечной и многоточечной геостатистики

Результаты и их обсуждение. На основе многоточечной геостатистики и трехмерного обучающего образа была сгенерирована бинарная матрица гнейсового массива участка Енисейский, элементы которой принадлежат множеству $\{1, 0\}$, имеющему признаки линейных зон тектонической деформации с повышенной проницаемостью $\{1\}$ и области слабонарушенных гнейсов с первичной трещиноватостью $\{0\}$. Две выделенные зоны фильтрационной неоднородности характеризуются коэффициентами фильтрации k_f и k_m. Интерпретация откачек в изолированных интервалах (пакерные опробования) позволила оценить диапазон изменения коэффициента k_f, 10^{-4}–10^{-3} м/сут; среднее значение k_f =$3.5 \cdot 10^{-3}$ м/сут. Проницаемость гнейсов вне зон тектонической деформации находится, судя по всему, ниже границы чувствительности полевых методов, k_m <10^{-4} м/сут.

Известно, что поток жидкости в трещиноватой среде с резким контрастом проницаемости между зонами неоднородности не всегда может быть описан в рамках моделей сплошности среды: он может концентрироваться в относительно небольшом количестве слабосвязных между собой каналов, тем не менее, обеспечивая, при этом, быстрый транспорт растворенных компонентов (например, радионуклидов) [0]. К двум главным методам, позволяющим определить возможность такого рода «фокусирования» потока в бимодальной среде относятся: 1) прямой метод моделирования прохождения частиц через среду, сгенерированную методом трехточечной статистики (particle tracking); 2) косвенный метод, основанный на моделировании поведения функции фильтрационного расхода $Q(\nu)$ или эффективного коэффициента фильтрации $k_{eff}(\nu)$

(где $\nu = k_f / k_m$ – коэффициент «фильтрационного контраста») при различной пространственной ориентации гидравлического градиента, средней скорости Дарси. В настоящем докладе рассматривается второй подход, дополненный методом традиционного стохастического анализа поведения трех главных компонент эффективного коэффициента фильтрации в коррелируемом трехмерном бимодальном пространстве.

Модельные результаты поведения функции $\bar{k}_{eff}(\nu) = k_{eff}(\nu)/k_f$ в направлении двух главных осей анизотропии: с севера на юг и с востока на запад приведены на рис. 2. Как видно, рост коэффициента ν в диапазоне, примерно, 1–100 приводит к постепенному уменьшению расхода воды, фильтрующейся в массиве, т.е. эффективная проницаемость массива уменьшается в каждом из двух направлений. Однако, начиная со значений $\nu > 100 - 1000$, наблюдается стабилизация расхода (и соответственно, величины эффективного коэффициента фильтрации), что позволяет предположить о пренебрежимо малой роли слабопроницаемой трещиноватой матрицы в формировании суммарного фильтрационного потока, величина которого определяется фокусированием потока в отдельных каналах.

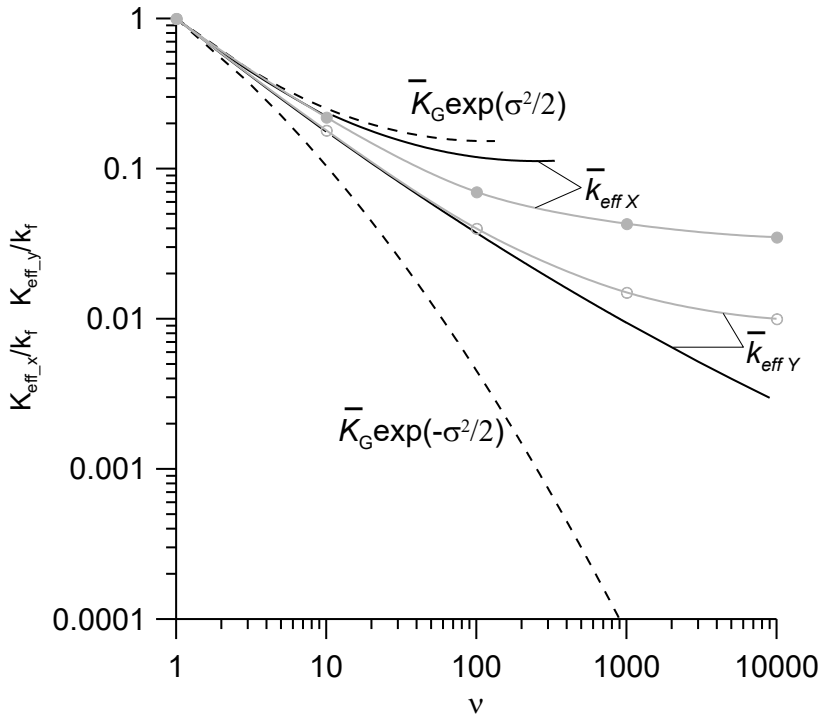


Рис. 2. Сравнение эффективных коэффициентов фильтрации, полученных методом численного моделирование фильтрации (программный код MODFLOW) в бимодальной трещиноватой среде, сгенерированной методом многоточечной статистики, и методом стохастического анализа с использованием экспериментальных вариограмм. Серые линии и кружки – численное моделирование, сплошные черные линии – аналитическая модель, штриховые линии – 2D плановая модель предельно анизотропной среды ($\lambda_{I1} / \lambda_{I2} >> 1$).

Результаты, полученные на модели, сравнивались с результатами, полученными аналитически. Для этого сгенерированная на основе многоточечной статистики матрица использовалась для определения стохастических характеристик бинарной модели трещиноватой среды, описываемой случайной функцией (SRF) [0]:

$$Y(\mathbf{x}) = I(\mathbf{x})Y_1(\mathbf{x}) + [(1 - I(\mathbf{x})]Y_2(\mathbf{x}),\ (2)$$

где $I(\mathbf{x})$ – индикатор SRF, принимающий значение 1 (для проницаемы зон) или 0 (для матрицы) с вероятностью *P* или (1–*P*), соответственно. $Y_1(\mathbf{x})$ и $Y_2(\mathbf{x})$ определяются средними значениями коэффициента фильтрации k, $m_i = \langle Y_i \rangle$, причем $Y_i = \ln k_i$, $m_1 = k_f$, $m_2 = k_m$. Глобальными параметрами функции $Y(\mathbf{x})$ являются: среднее $m_Y = m_1 P + m_2(1-P)$, дисперсия $\sigma_Y^2 = P(1-P)(m_1 - m_2)^2$ и корреляционные масштабы индикаторной функции λ_{I1}, λ_{I2} (в направлении плановых осей *X* и *Y*), λ_{I3} (в вертикальном направлении *Z*).

Легко показать, что при логнормальном законе распределения проницаемости, характеристики m_Y и σ_Y^2 связаны с коэффициентом контраста, $\nu = k_f / k_m$, соотношениями:

$$m_Y = \ln\left(k_m \nu^P\right),\ \sigma_Y^2 = P(1-P)(\ln \nu)^2 .(3)$$

В этом случае среднегеометрическое значение коэффициента бимодальной трещиноватой среды определяется зависимостью:

$$k_G = \exp(m_Y) = \frac{k_f}{\nu}(\nu)^P . \qquad (4)$$

Анализ исходного бимодального распределения, полученного методом многоточечной статистики, дает *P* = 0.21, λ_{I1} = 80–100 м (направление север–юг), $\lambda_{I2} \approx \lambda_{I3}$ = 20–30 м (направление запад–восток и вертикальное). В дальнейшем анализе можно положить $\lambda_{I1} / \lambda_{I2} \approx \lambda_{I1} / \lambda_{I3} = 4$–5.

Для расчета главных компонент эффективного коэффициента фильтрации, характеризующего фильтрацию в 3D статистически анизотропную среду, воспользуемся результатом решения соответствующих уравнений фильтрации с помощью Фурье-преобразования ковариационного спектра (использование трехмерной статистически анизотропной ковариационной функции для экспоненциальной автоковариации) [0, 0]. Асимптотические решения, представляющие для нас практический интерес, имеют относительно простую форму.

Будем полагать, что главные оси тензора коэффициента фильтрации, $\hat{k}_{ii}$, соответствуют трем ортогональным направлениям трех корреляционных масштабов, λ_{I1}, λ_{I2} и λ_{I3}. При низких значениях σ_Y^2, ориентировочно, при $\sigma_Y^2 < 0.5 - 1$ (отвечает диапазону $\nu < 10$):

$$\hat{k}_{ii} = k_G\left[1 + \sigma_Y^2(1/2 - g_{ii})\right]. \qquad (5)$$

При больших σ_Y^2 ($\sigma_Y^2 > 1$, что отвечает рассматриваемой нами фильтрации в среде с большим контрастом, $\nu > 10$):

$$\hat{k}_{ii} = k_G \exp\left[\sigma_Y^2(1/2 - g_{ii})\right],\ (6)$$

где $i = 1,2,3$ (без суммирования) – индексы координат; g_{ii} – функции, определяемые корреляционными масштабами λ_{I1}, λ_{I2} и λ_{I3}. Коэффициенты g_{ii} определяются интегральной функцией, графики которой приведены в работе [0, figs. 4a, 4b]. Для сгенерированной бимодальной трещиноватой среды, характеризующейся анизотропией корреляционных масштабов $\lambda_{I1} / \lambda_{I2} \approx \lambda_{I1} / \lambda_{I3} = 4$, находим: $g_{11} = 0.07$, $g_{22} = 0.4$ и $g_{33} = 0.45$.

В терминах относительных значений эффективного коэффициента фильтрации приходим к выражениям:

$$\bar{k}_{eff\,ii} = \frac{\hat{k}_{eff\,ii}}{k_f} = \frac{k_G}{k_f}\left[1 + \sigma_Y^2(1/2 - g_{ii})\right],\ \sigma_Y^2 < 0.5 - 1; \quad (7)$$

$$\bar{k}_{eff\,ii} = \frac{\hat{k}_{eff\,ii}}{k_f} = \frac{k_G}{k_f}\exp\left[\sigma_Y^2(1/2 - g_{ii})\right],\ \sigma_Y^2 > 1 \quad (8)$$

здесь $\bar{k}_{eff\,11} = \bar{k}_{eff\,X}$ (направление север–юг), $\bar{k}_{eff\,22} = \bar{k}_{eff\,Y}$ (направление запад–восток), $\bar{k}_{eff\,33} = \bar{k}_{eff\,Z}$ (вертикальное направление).

На график также нанесены расчеты, выполненные для эффективной плановой 2D модели, в которой линейные зоны фильтрационной неоднородности имеют неограниченную протяженность по вертикали ($\lambda_{I3} \to \infty$), а в плане происходит чередование хорошо проницаемых (k_f) и слабопроницаемых (k_m) зон, т.е. выполняется условие $\lambda_{I1}/\lambda_{I2} >> 1$. Эффективная проницаемость такой системы характеризуется параметрами:

$$k_{eff\,X} = k_G \exp(\sigma_Y^2/2), \quad (9)$$

$$k_{eff\,Y} = k_G \exp(-\sigma_Y^2/2). \quad (10)$$

Из представленных данных видно, что кривые, полученные методом численного моделирования, удовлетворяют диапазону значений, полученному с помощью аналитических решений для 3D анизотропной среды (формулы 7, 8), и имеют тенденцию к выполаживанию с ростом контрастности, $\nu = k_f / k_m$. Решения для 2D анизотропной среды (формулы 9, 10) формируют более широкий диапазон значений и не противоречат результатам модельных расчетов и результатам для 3D среды, однако значения $k_{eff\,Y}(\nu)$ (формула 10), не учитывающие трех-мерность фильтрационного потока, многократно уступают ранее полученным значениям.

Выводы. Оценка долговременной безопасности окружающей среды от эксплуатации объекта атомной энергии проводится с использованием численных моделей. В этой связи важным представляется достоверное воспроизведение геологического строения изучаемой территории. В условиях ограниченного количества полевой информации целесообразным представляется использование методов стохастических вместо методов детерминистических.

С помощью алгоритмов многоточечной геостатистики удалось воспроизвести геологическую среду, где протяженные, линейно-ориентированные области повышенной трещиноватости приурочены к дайковым комплексам. С помощью численного моделирования установлено, что данные области связаны между собой и формируют каналы фокусировки потока подземных вод. Полученные модельные прогнозы лежат в диапазоне значений, полученных с помощью аналитических решений для трехмерной бимодальной изотропной среды.

Список литературы

1. Росатом (Электронный ресурс) // О предприятии ГХК. URL: https://sibghk.ru/static-page/view?id_category=8&id=18 (дата обращения: 25.01.2024)

2. Matheron, G. The intrinsic random functions and their applications. Advances in Applied Probability / G. Matheron // Cambridge University Press. – 1973.-C.30.

3. Guardiano F. Multivariate geostatistics: beyond bivariate moments / F. Guardiano, M. Srivastava //Kluwer Academic Publishers. – 1993.- C.11.

4. Ohman, J. A regional-scale particle-tracking method for nonstationary fractured media. Water Resources Research / J. Ohman, A. Niemi, C.-F. Tsang // American Geophysical Union. – 2005.-P.18.

doi:10.1029/2004WR003498.
5. Rubin, Y. Flow and transport in bimodal heterogeneous formations. Water Resources Research / Y. Rubin // American Geophysical Union. – 1995.-P.8. doi: 10.1029/95WR01953
6. Gelhar, L. Stochastic subsurface hydrology / Gelhar L.W. // Prentice-Hall Inc. – 1993.-P.390
7. Gelhar, L. Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers. Water Resources Research / L.W. Gelhar, C.L. Axness // American Geophysical Union. – 1983.-P.19. doi:10.1029/WR019i001p00161

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВОДОСБОРОВ МАЛЫХ РЕК В КОНТЕКСТЕ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАНИРУЕМОГО ПГЗРО (УЧАСТОК «ЕНИСЕЙСКИЙ», КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)

Владимиров К.В.[1], Шварц А.А.[1,2], Иноземцев С.А.[1],
Никуленков А.М.[1,2], Румынин В.Г.[1,2]
[1]Санкт-Петербургское отделение института геоэкологии РАН им. Е.М. Сергеева, Санкт-Петербург, vladimirov@hgepro.ru
[2]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Проблема оценки инфильтрационного питания подземных вод в районе строящейся подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) в Красноярском крае имеет повышенный интерес в связи с необходимостью гидрогеологических прогнозов миграции радионуклидов в подземной среде, а также оценок водопритоков в строящиеся горные выработки. В данной статье на примере водосборных бассейнов малых рек и ручьев, дренирующих площадку строительства ПИЛ, рассмотрены основные особенности взаимосвязи подземных и поверхностных вод, влагопереноса в зоне аэрации и формирования инфильтрационного питания. Дана количественная оценка инфильтрационного питания, изучена его временная и пространственная неоднородность.
***Ключевая слова**: инфильтрационное питание, подземная исследовательская лаборатория, связь подземных и поверхностных вод, влагоперенос в зоне аэрации, численное моделирование*

Abstract. The problem of assessing groundwater recharge in the area of the construction site of the underground research laboratory (URL) in the Krasnoyarsk region is of increased interest due to the need for the radionuclides transport hydrogeological forecasts in the underground environment, as well as assessments of water inflows into the mine workings under construction. In this article, using the example of watersheds of small rivers and streams draining the construction site of the URL, the main features of the groundwater and surface water interaction, moisture transfer in the unsaturated zone and the groundwater recharge origin are considered. A quantitative assessment of groundwater recharge is presented, and its temporal and spatial heterogeneity is studied.
***Key words**: groundwater recharge, underground research laboratory, groundwater – surface water interaction, moisture transfer in the unsaturated zone, numerical modeling*

Участок «Енисейский» вблизи г. Железногорск Красноярского края рассматривается как потенциальное место для создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (далее – ПГЗРО) [1]. Начиная с 2018 г. на участке «Енисейский» начаты работы по созданию подземной исследовательской лаборатории (далее – ПИЛ), в которой планируется провести комплекс работ, подтверждающих пригодность массива скальных пород для безопасного хранения радиоактивных отходов.

Цель исследований

В контексте долговременной безопасности важную роль играет оценка водного баланса, в том числе инфильтрационного питания подземных вод на территории

потенциального воздействия планируемого ПГЗРО, поскольку инфильтрационное питание вместе с фильтрационными свойствами вмещающих пород определяет количество воды, которое может поступить в горные выработки, и именно с этой водой в дальнейшем будет происходить миграция радионуклидов в подземной среде. Площадное инфильтрационное питание также определяет потенциал переноса радионуклидов в самой водоносной толще в постэксплуатационный период ПГЗРО. Также следует отметить, что инфильтрационное питание является одним из ключевых входных параметров в прогнозных гидрогеологических моделях, особенно при значительной неопределенности и пространственной неоднородности фильтрационных параметров. Таким образом, целью исследований была поставлена количественная оценка и изучение пространственно-временной неоднородности инфильтрационного питания.

Объект исследований

Объектом данного исследования являются водосборные бассейны рек Шумиха и Байкал, а также ручьев Меркурьев и Безымянный, которые непосредственно дренируют площадку строительства ПИЛ. Площадь каждого из исследуемых водосборов ограничена гидропостами ГП-1 (р. Шумиха), ГП-2 (руч. Безымянный), ГП-4 (р. Байкал) и ГП-5 (руч. Меркурьев) (рис. 1).

Методы исследований

Для достижения поставленной цели был выполнен комплекс полевых исследований, а также привлечено несколько расчетных методик, в частности, математическое моделирование. Полевые исследования можно разделить на наблюдения за метеопараметрами, среди которых основными являются атмосферные осадки (включая снежный покров) и температура воздуха, наблюдения за поверхностными водами на 7 гидропостах и подземными водами в наблюдательных скважинах глубиной 30–700 м, гидрохимическое и радиологическое опробование поверхностных, подземных вод и атмосферных осадков, а также наблюдения за влажностью и температурным режимом почв в зоне аэрации до глубин 1,5–2 м на трех ключевых участках с помощью автономных датчиков влажности. Приповерхностные температурные измерения почв и грунтов также проведены на склонах различной экспозиции в долинах рек и ручьев изучаемых водосборов.

Для исследования взаимосвязи подземных и поверхностных вод использовались данные наблюдений в забивных русловых пьезометрах, а также результаты проведенных в руслах рек и ручьев гидрометрических и термометрических съемок.

Отдельный комплекс полевых работ был посвящен описанию почв, рельефа и растительности на изучаемых водосборных площадях, по результатам которых выделены типовые природно-территориальные комплексы.

Полевые исследования были поддержаны лабораторным изучением почв и грунтов с целью определения основных водно-физических свойств, гранулометрического состава, а также основной гидрофизической характеристики (ОГХ) и водоудерживающих свойств почв и грунтов методом центрифугирования, которые в своей совокупности контролируют фрагментацию атмосферной влаги на поверхностный и подземный сток.

Создание численных математических моделей преследовало цель, помимо независимой оценки инфильтрационного питания, изучить и количественно описать трансформацию атмосферных осадков в поверхностный и подземный сток. Среди программных средств использовались как чисто гидрогеологические программные коды (MODFLOW [2]), так и программные коды, способные описать весь путь движения влаги от поверхности до грунтовых вод (SWAT [3], GSSHA [4]). Для моделирования влагопереноса и теплопереноса в зоне аэрации использовалась программа HYDRUS-1D [5].

Следует отметить, что полевые исследования проводились как во всей области потенциального воздействия объекта (региональный масштаб), так и с повышенной

детальностью в пределах специально созданного полигона «Шумихинский» в бассейне р. Шумихи (локальный масштаб исследования) (рис. 1).

Расчеты инфильтрационного питания

Основным источником данных для всех воднобалансовых расчетов являлись суточные расходы рек и ручьёв. Расчленение гидрографов стока на быструю (поверхностный и почвенный сток) и медленную (грунтовый сток) составляющие по методу Лайн-Холлика [6] позволили получить независимые оценки инфильтрационного питания и его сезонную изменчивость.

Обработка данных многолетних режимных наблюдений за уровнями в скважине, расположенной в водораздельной части исследуемой области для оценки инфильтрационного питания грунтового водоносного горизонта, проводилась по широко известному методу, предложенному Мейнцером [7]. Данный метод позволил оценить количество и интенсивность поступления инфильтрационного питания на уровень подземных вод при весеннем снеготаянии и дождевых событиях.

Обработка данных гидрометрических измерений вдоль русел поверхностных водотоков включала в себя приведение замеров к меженным значениям, а также расчет основных гидрологических характеристик (модулей стока, слоя подземного стока). Данная методика позволила проследить площадную неоднородность подземного стока на исследуемой территории, а также сделать некоторые выводы о взаимосвязи подземных и поверхностных вод.

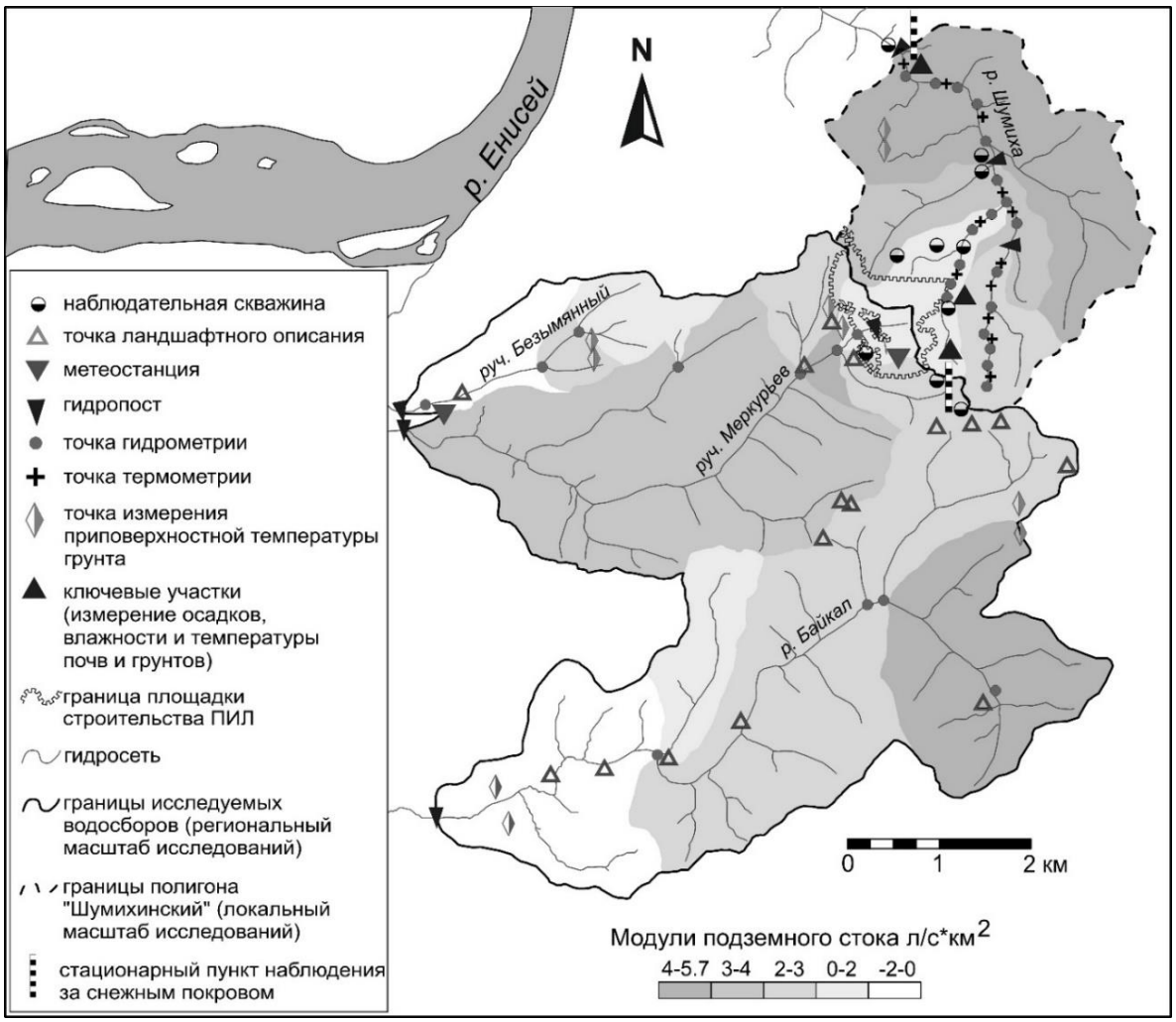


Рис. 1. Схема распределения подземного стока

Результаты лабораторных исследований почв и грунтов методом центрифугирования обрабатывались по предложенной в работе [8] модели, позволяющей помимо изучения ОГХ почв и грунтов, интерпретировать и оценить функцию влагопроводности.

Расчеты инфильтрационного питания на численной модели MODFLOW производились в пределах модельной области, ограниченной полигоном «Шумихинский» (рис. 1). Значения фильтрационных параметров принимались по данным проведенных опытно-фильтрационных работ, а инфильтрационное питание было получено в результате калибровки модели. На численных моделях SWAT и GSSHA инфильтрационное питание являлось выходным параметром, в то время как исходные данные включали в себя метеоданные, характеристики почв и растительности, фильтрационные свойства водоносных горизонтов. Модель зоны аэрации трех ключевых участков с использованием программы HYDRUS-1D содержала в качестве исходных данных ряды метеонаблюдений, а также параметры, полученные при интерпретации кривых ОГХ и водоудерживания. Калибровка модели проведена по фактическим данным измерений влажности и температуры.

Результаты

Результаты интерпретации и обработки гидрологических, гидрогеологических и гидрохимических данных показали, что на большей части водосборных площадей исследуемых водотоков наблюдается нисходящее подземное питание рек и ручьев с подпором во время дождевых паводков и снеготаяния, который не приводит к образованию обратных уклонов потока. В то же время, гидрометрическая съемка в русле р. Байкал и руч. Безымянный показала, что на определенных участках указанных водотоков происходят потери расхода, что говорит о питании подземных вод поверхностными. Полученный результат хорошо коррелирует с данными русловых пьезометров, в которых уровни подруслового потока стабильно ниже уровней поверхностных вод. Рассчитанные модули зимнего меженного подземного стока для участков разгрузки подземных вод в реки и ручьи варьируют от 0–1 до 4–6 л/с×км^2, что может говорить как о неоднородности инфильтрационного питания рассматриваемой территории, так и о сложном характере взаимосвязи подземных и поверхностных вод.

Расчленение гидрографов, полученных по результатам измерений на 7 гидропостах, позволили проследить сезонную изменчивость подземного и поверхностного стока. Было установлено, что подземные воды доминируют как в общем стоке рек и ручьев (от 50 до 90 %), так и во время весеннего половодья и дождевых паводков. Интересно, что среднегодовая величина подземного стока в большей степени определяется величиной снегозапасов, а не жидкими атмосферными осадками. Данный тезис подтверждается результатами расчетов инфильтрационного питания подземных вод по многолетним режимным наблюдениям в скважине в водораздельной части области исследования. Было установлено, что в период весеннего снеготаяния на уровень подземных вод поступает от 75 до 90 % годовой инфильтрации (за исключением аномального в контексте годовой суммы жидких атмосферных осадков 2022 г.) (рис. 2).

Исследования влагопереноса в зоне аэрации и количественная интерпретация данных работ в программе HYDRUS-1D выявили несколько основных закономерностей.

Во-первых, в условиях лесного ландшафта полного насыщения почв не наблюдается, то есть можно говорить об отсутствии поверхностного стока в явном виде.

Во-вторых, количество влаги, поступающий в верхнюю часть зоны аэрации за вычетом эвапотранспирации, составляет от 42 до 93 % (191–673 мм) от выпадающих атмосферных осадков. Такие повышенные значения (по отношению к региональным и локальным величинам модулей подземного стока, а также инфильтрации, полученной по методу Мейнцера) объясняются нами существованием в зоне аэрации, не только вертикального, но и так называемого склонового (латерального, быстрого) стока [9, 10].

В-третьих, в наблюдательных скважинах отмечается довольно быстрая реакция уровней на снеготаяние и дождевые паводки, которая составляет от нескольких до 7–10 дней, что говорит о наличии быстрых путей фильтрации влаги в зоне аэрации. В верхней части зоны аэрации, сложенной преимущественно суглинистыми грунтами, быстрые пути фильтрации могут быть связаны с деятельностью живых организмов и корней деревьев, а в нижней части – наличием хорошо проницаемых трещин в скальной массиве грунтов.

Модели, созданные в программных комплексах GSSHA и SWAT, дополнившие моделирование в MODFLOW, позволили дифференцировать все выпадающие осадки на поверхностный сток, склоновый сток, подземный сток, а также рассчитать испарение с поверхности грунтовых вод и эвапотранспирацию. Результаты моделирования подтвердили, что большая часть стока в реках формируется за счет подземных вод. Также было выявлено, что существенную роль в водном балансе играет перехват влаги растительностью (до 210 мм) и склоновый сток (до 153 мм).

Подводя итоги к проведенному исследованию, можно резюмировать, что из-за геоморфологических, ландшафтных и геолого-гидрогеологических особенностей изучаемой территории, для оценки инфильтрационного питания требуется использование совокупности методов, сочетающих в себе полевые гидрогеологические и гидрологические измерения, а также численное моделирование природных сред, параметрически обоснованное соответствующими метеорологическими, ландшафтными исследованиями, а также исследованиями в зоне аэрации.

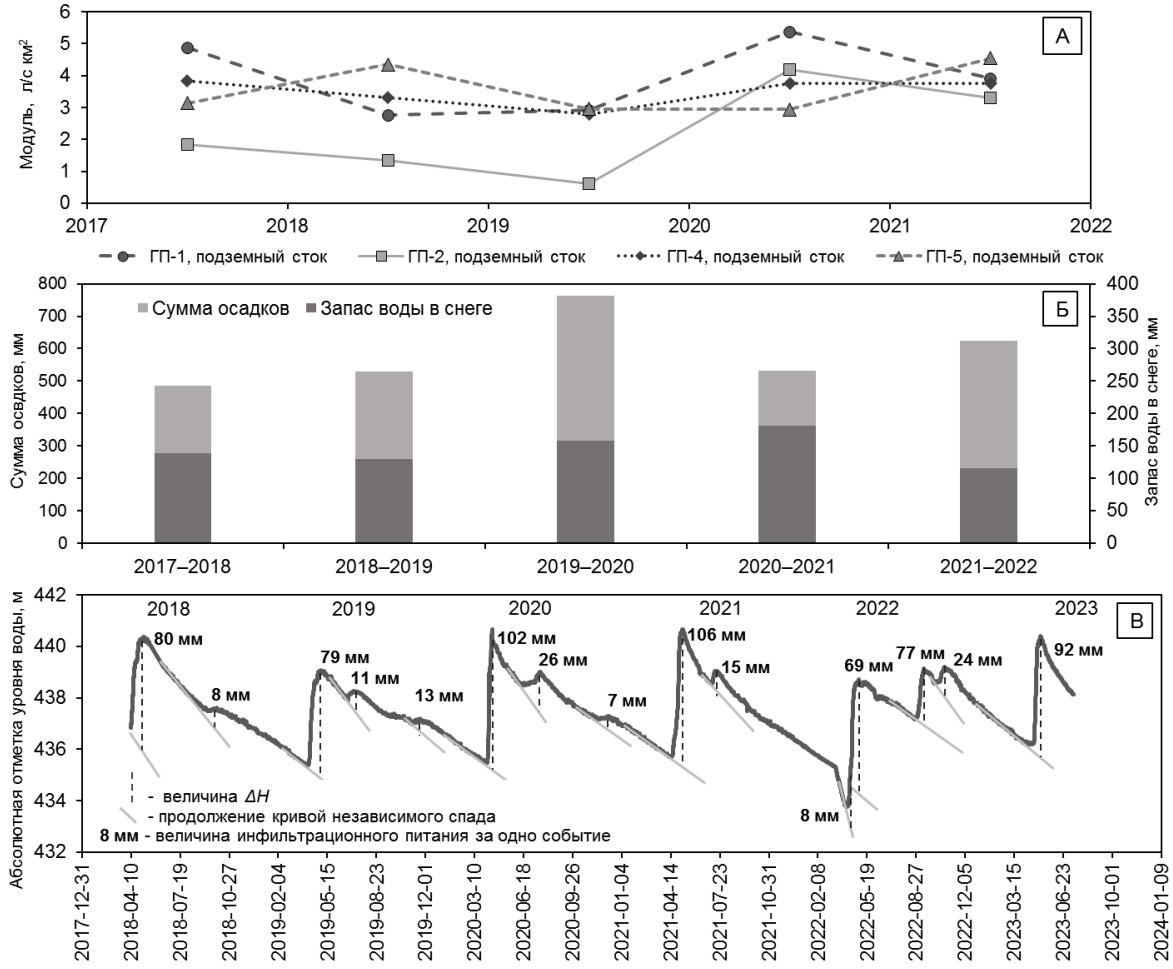


Рис. 2 – Годовая изменчивость подземного стока (А), атмосферных осадков (Б), и уровней подземных вод на водоразделе (В)

Список литературы

1. Линге И.И., Уткин С.С., Кулагина Т.А., Трохов Н.Н. Подземная исследовательская лаборатория на участке "Енисейский" Нижнеканского массива Красноярского края // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 12, № 7. С. 830–841.

2. Harbaugh A.W. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process // U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. 2005

3. Winchell M., Srinivasan R., Di Luzio M., Arnolds J.G. Arcswat Interface for Swat 2012. User's Guide. - Texas, Blackland Research and Extension Center, ARS Temple. 2013. 618 p.

4. Downer C., Ogden F. Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis (GSSHA) User's Manual; Version 1.43 for Watershed Modeling System 6.1. 2006. 221 p.

5. Šimunek J., Šejna M., Sakai H., van Genuchten M.Th. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimentional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. User manual – Version 4.17, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA. 2018. 310 p.

6. Ladson A.R. et al. A standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter // Australasian Journal of Water Resources. 2013. V. 17. P. 25–34

7. Meinzer O.E. The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles // US Geol. Survey Water Supply Pap. 1923. V. 489. P. 321.

8. Смагин А.В., Садовников Н.В., Мизури Маауиа Бен Али. Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования // Почвоведение. 1998. № 11. С. 1362–1370.

9. O'Geen, A.T., Dahlgren R.A., Swarowsky A., Tate K.W., Lewis D.J., Singer M.J. Research connects soil hydrology and stream water chemistry in California oak woodlands // California Agriculture. 2010. V. 64. P. 78–84.

10. O'Geen A.T. Soil Water Dynamics // Nature Education Knowledge. 2013. V. 4. P. 1–9.

СТРУКТУРА ПОРОВОЙ ВОДЫ В СИСТЕМЕ: ГЛИНИСТЫЙ ГРУНТ – ИОНЫ – ГАЗ – МИКРООРГАНИЗМЫ НА ОСНОВЕ ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА – ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ В ГИДРОГЕОЛОГИИ

Дашко Р.Э.[1], Колосова Д.Л.[2]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; Васильевский остров, 21 линия, д. 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106, regda2002@mail.ru

[2] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, daryakolmot@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена современным представлениям о структурированности поровой воды в глинистых грунтах, что имеет принципиальное значение при анализе процесса фильтрационной консолидации водонасыщенных глинистых грунтов, которая широко применяется в практике геотехнических, инженерно-геологических и гидрогеологических работ. Процесс структурирования поровой воды определяется ее сложным взаимодействием с фазами тонкодисперсного грунта: твердой и органической составляющими, ионами и газами различного генезиса, в том числе, биохимического. Обсуждаются результаты изучения структурированности поровой воды в глинистых грунтах с помощью ядерно-магнитного резонанса, исследования которых были начаты в 1980-х годах и продолжены в 2023 г. Однако теория фильтрационной консолидации не получает своего подтверждения при длительном наблюдении за состоянием и физико-механическими свойствами водонасыщенных глинистых грунтов в основании сооружений различного назначения. Эта теория использовалась в практике гидрогеологических работ проф. В.А. Мироненко при рассмотрении проблемы пополнения запасов водоносных горизонтов за счет поступления поровых вод из глинистых водоупоров в процессе роста эффективных напряжений при длительных откачках. Показана необходимость изучения макро- и микротрещиноватости в глинистых

водоупорах, по системе которых наблюдается перетекание подземных вод в зависимости от гидродинамических условий.

Ключевые слова: *структура поровой воды; глинистые водоупоры; трещиноватость глинистых пород; перетекание подземных вод; ядерно-магнитный резонанс*

Abstract. The article analyzes modern ideas about the structuring of pore water in clayey soils. This is of fundamental importance for the process of filtration consolidation of water-saturated clayey soils, which is widely used in the practice of geotechnical, engineering-geological and hydrogeological works. The process of pore water structurization is determined by its complex interaction with phases of dispersed soil: solid and organic components, ions and gases of various genesis, including biochemical ones. The results of the study of pore water structurization in clayey soils using nuclear magnetic resonance are discussed, the research of which was started in the 1980s and continued in 2023. However, the theory of filtration consolidation does not receive its confirmation under long-term observation of the state and physical and mechanical properties of water-saturated clayey soils in the base of structures for various purposes. This theory was used in the practice of hydrogeological works by Prof. V.A. Mironenko when considering the problem of aquifer recharge due to pore water inflow from clayey aquifers in the process of effective stress growth during long pumping. It is necessary to study macro- and micro-fissures in clayey aquicludes, through the system of which groundwater transfer is observed depending on hydrodynamic conditions.

Key words: *pore water structure; clay aquiclude; fissures of clay; groundwater transfers; nuclear magnetic resonance*

В настоящее время понятие о структуре поровой воды в глинистых грунтах базируется на оценке их физического состояния. Считается, что максимальное количество «физически-связанной» воды определяется показателем максимальной молекулярной влагоемкости ($W_{м\,max}$) глинистых грунтов, получаемым путем удаления воды из тонких глинистых образцов под давлением 65,5 кг/см^2. В практике инженерно-геологических работ рассматривают, что влажность $W_{м\,max}$ близка к влажности на пределе раскатывания (W_p) грунта. Следовательно, свободная (гравитационная) вода существует только в тех грунтах, в которых естественная влажность (W_e) существенно превышает $W_{м\,max}$ или W_p.

В практике инженерно-геологических и гидрогеологических расчетов широкое применение находит теория фильтрационной консолидации глинистых грунтов, предложенная еще в 1925 г. К. Терцаги [10]. Данная гипотеза базировалась на следующих положениях: 1) в водонасыщенных глинистых грунтах вода рассматривается как гравитационная и фильтрация подчиняется закону Дарси; 2) в грунте отсутствуют структурные связи, поэтому все внешнее давление (p_c), прикладываемое мгновенно, вызывает возникновение напора (H_0) в поровой воде в момент времени t=0: $H_0=p_c/\gamma_в$, где $\gamma_в$ – плотность воды; 3) осадка протекает только при удалении воды из грунта в условиях одномерной задачи уплотнения с возможностью двухстороннего оттока воды.

Стоит отметить, что в период становления теории фильтрационной консолидации отсутствовали сведения о структуре жидкой воды и ее возможных трансформациях, а также прочности и деформационной способности глинистых грунтов различной степени литификации.

Теория фильтрационной консолидации развивалась отечественными и зарубежными учеными. Среди отечественных следует особо отметить чл.-корр. АН СССР В.А. Флорина, чл.-кор. АН СССР Н.А. Цытовича, д.т.н., проф. З.Г. Тер-Мартиросяна, д.т.н., проф. Ю.К. Зарецкого, д.т.н., проф. Н.Н. Маслова, д.т.н., проф. М.Ю. Абелева, д.т.н., проф. С.А. Роза, д.т.н., проф. Е.И. Медкова, д.т.н., проф. А.И. Ксенофонтова (его исследования впервые были основаны на применении реологических свойств к глинистых грунтах, в том числе, характеристик вязкости) и др. Еще в период становления и развития гипотезы фильтрационной консолидации было установлено, что в основном уравнении фильтрационной консолидации, связывающим изменение напоров (H) во времени (t) с изменением напоров по глубине слоя (z), особое значение имеет постоянный коэффициент $C_и$:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = C_u \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}, \qquad (1)$$

где

$$C_u = \frac{k(1+e_1)}{a \cdot \gamma_в}, \qquad (2)$$

где k – коэффициент фильтрации грунта, e_1 – начальный коэффициент пористости грунта, a – коэффициент уплотнения грунта согласно компрессионным испытаниям.

При коэффициенте скорости консолидации (формула 2) $C_u \leq 10^7$ см^2/год фильтрационная консолидация развивается настолько медленно, что ею можно пренебречь.

Многолетние наблюдения за изменением физического состояния и свойств глинистых грунтов в основании различных сооружений под давлением в широком диапазоне показывают, что даже при эксплуатации сооружений в течение более 50 лет, состояние глинистых грунтов не меняется, что должно иметь свое объяснение.

Известно, что в 1934 г. в журнале «Успехи физических наук» была опубликована статья двух английских ученых Д. Бернала и Р. Фаулера о кристаллохимическом строении воды. Ее молекулы образуют тетраэдр – «жидкий кристалл», характеризующийся очень подвижным состоянием и аномалиями поведения (например, температура замерзания и кипения), что связано с наличием гибких водородных связей [1]. К сожалению, достижения в области физики и физикохимии структуры гравитационной воды и возможность ее глубокого преобразования под действием различных полей не учитывались и не учитываются при совершенствовании теории и практики капитальных разделов гидрогеологии, инженерной геологии, механики грунтов и геотехники.

Необходимо ответить на вопрос: чем вызвано структурирование воды и ее схожесть по характеру поведения с твердым телом? Анализ преобразования структур воды необходимо начать с гипотезы Я.И. Френкеля о жидком состоянии воды, которая основана на описании колебательных движений жидкости, происходящих по двум направлениям: 1) колебания и вращения молекул воды вокруг положений временного равновесия; 2) перемещения с одного положения равновесия в другое – трансляционное движение молекул воды с периодичностью в 10^{-13} с.

Трансформация «жидкого кристалла» происходит, прежде всего, под действием активных центров твердой фазы. Д.И. Дистлером и его научной школой были исследованы такие энергетически-активные центры, находящиеся на точечных дефектах и неоднородностях твердых поверхностей частичек, которые были подразделены на две категории: 1) группа эпитаксиальных центров приводит к увеличению плотности воды (ρ>1г/см^3) – короткодействующие (для пластинок слюд – 0,1 мкм); 2) поляризующие центры – останавливают трансляционное движение молекул воды (дальнодействующие – на расстоянии до 10 мкм) [4, 6]. При этом известно, что поры в глинистых грунтах характеризуются размером 2-5 мкм, уменьшаясь до 1 мкм в литифицированных разностях. Следовательно, можно сделать вывод о том, что вода в глинистых грунтах характеризуется как структурированная.

Доказательными исследованиями влияния твердой поверхности на изменение структурных свойств воды выступают экспериментальные работы д.т.н., проф. Н.В. Чураева и чл.-кор. АН СССР Б.В. Дерягина, проведенные на кварцевых пластинках, а также работы д.ф.-м.н., проф. М.С. Мецика по определению структурных изменений воды на пластинках слюды (алюмосиликатах) с большим количеством активных центров по сравнению с кварцем [3, 6].

В настоящее время самым современным и наиболее прогрессивным методом изучения строения вещества, в том числе и структуры воды, служит метод ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), широко используемый в практике физических и физико-

химических исследований. Этот метод был использован в экспериментальных исследованиях изменения структур поровой воды в глинистых грунтах еще в 80-х годах прошлого века проф. Р.Э. Дашко. Экспериментальные работы проводились на физическом факультете СПбГУ под руководством и при непосредственном участии проф. В.И. Чижика. Для оценки характеристик структуры поровой воды на данном оборудовании определялся параметр T_1 – время продольной релаксации молекул воды в постоянном магнитном поле, при котором достигается энергетическое равновесие в спин-решетчатой системе.

Опыты, проведенные еще в 60-х годах прошлого столетия В.И. Чижиком дали возможность убедиться в том, что показатель T_1 для гравитационной дистиллированной воды, сохраняющей минимальное количество газовой составляющей, составляет 2,65±0,02 сек, а для свободной воды при полном удалении воздуха – 3,34±0,02 сек, что определяет влияние газовой компоненты на структуру воды [9]. Это положение необходимо учитывать при оценке степени водонасыщения глинистых грунтов на структуру поровой воды.

На рисунке показаны результаты исследований изменения структуры поровой воды в глинистых пород различного гранулометрического состава, физического состояния (консистенции), влажности, а также минерального состава, реализованных в 1980-х годах.

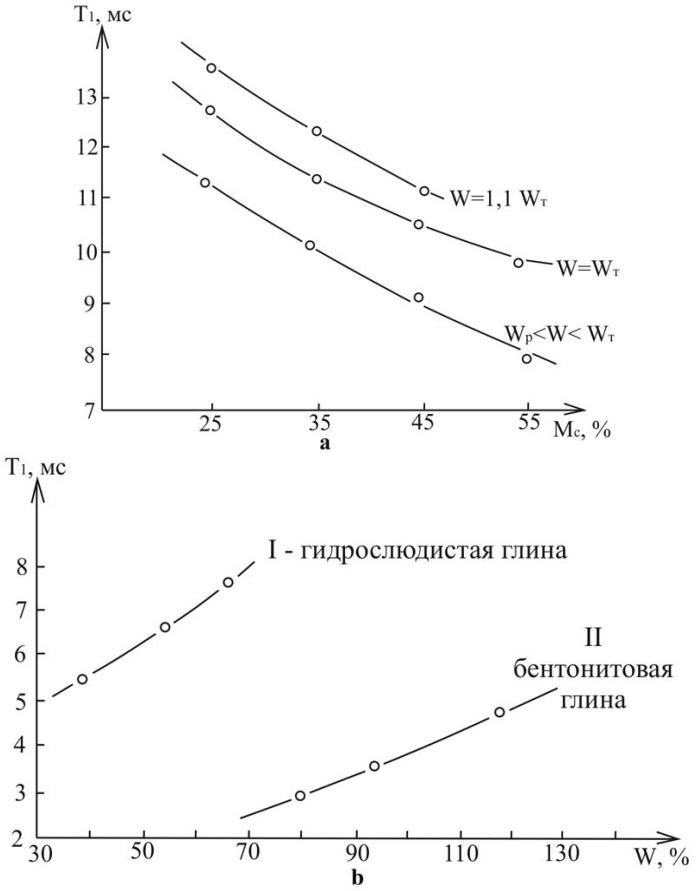


Рис. Изменение времени продольной релаксации поровой воды T_1 от а) содержания глинистой фракции в грунте (Mc) и показателя текучести (I_L); b) минерального состава глинистых грунтов, где W, $W_т$ и $W_р$ – влажность глинистых грунтов естественная, на пределе текучести и пластичности соответственно [2]

Как следует из анализа таких результатов, время T_1 практически на три порядка ниже, чем параметр T_1 для гравитационной воды. При проведении опытов 80-х годов

была получена следующая закономерность: если влажность глинистой породы снижается до (1,1-1,2) · W_p и менее, жидкообразная вода в глинистых грунтах с помощью ЯМР не фиксируется [2]. Следует напомнить, что понятия $W_т$ и W_p в практику инженерно-геологических исследований пришли из почвоведения в начале 30-х годах прошлого века. В данной науке эти параметры имеют физический смысл: $W_т$ – влажность начала загнивания корневой системы, а W_p – начало ее увядания. При этом следует подчеркнуть, что корневая система растений представляет собой вакуумные насосы с разряжением до -25 атм. Это означает, что вода может удаляться из грунтов только при превышении таких давлений.

В 2023 г. опыты были продолжены на установках ЯМР нового поколения на образцах глинистой пасты гидрослюдистого состава с влажностью на пределе текучести ($W_т$=45%), которые убедительно подтвердили, что гравитационная вода в порах глинистого грунта отсутствует. Современные установки ЯМР позволили определить параметр T_1 послойно по мере удаления от твердой поверхности тонкодисперсной частицы. Варьирование спектров характеризуется различными параметрами T_1 от $1 \cdot 10^{-3}$ сек (сильно-структурированная вода на поверхности глинистых частиц) до $1 \cdot 10^{-1}$ сек для структурированной воды в центре поры (наибольшая удаленность от твердой поверхности частиц).

Необходимо отметить, что дополнительное влияние на структурирование поровой воды в глинистых грунтах оказывает также ионный состав поровых растворов (ионы K^+, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Al^{3+}).

Количество активных центров присуще содержанию в водонасыщенных глинистых грунтах микробной составляющей, так как размер микроорганизмов сопоставим с размером частиц глинистой фракции. Данный факт подтверждается также наличием заряда, которым обладают живые и мертвые клетки микроорганизмов, а также продукты их метаболизма, влияя таким образом на структурированность поровой воды.

Предположение влияния газовой составляющей на структуру поровой воды в глинистых грунтах основано на их газодинамической характеристике. Газовые пузырьки в порах рассматриваются как твердые несжимаемые в связи с их малым радиусом и, соответственно, высокими силами поверхностного натяжения (давления Лапласа). Стоит отметить, что еще Ю.К. Зарецкий сделал вывод о том, что при степени водонасыщения (S_r) глинистых грунтов менее 0,95 вся поровая вода обладает инертными свойствами по отношению к прикладываемому давлению, и все осадки грунтов протекают только за счет ползучести скелета грунта, что связано также с изменением структуры воды при наличии газовой составляющей, о чем было сказано выше [5].

Вопросы структурных особенностей поровой воды в глинистых водоупорах имеет непосредственное научно-практическое значение при анализе таких немаловажных вопросов как прогнозирование возможности пополнения запасов подземных вод за счет водоупоров при проведении длительной эксплуатации водоносных горизонтов с различными целями: водоснабжение питьевыми и техническими водами, постоянно работающие дренажные системы водопонизительных скважин на открытых или подземных горных выработках и др.

Данное положение имеет принципиальное значение при прогнозировании изменения дебитов во время длительных откачек, а также трансформации кислотно-щелочных, окислительно-восстановительных условий и химического состава подземных вод, что имеет особое значение для скважин централизованного питьевого водоснабжения, а также изменения коррозионной способности подземных вод по отношению к материалам крепей, прежде всего, при подземной добыче полезных ископаемых.

Проф. Мироненко В.А. и его учениками на основании работ Шестакова В.М., Щелкачева В.Н., Хантуша М.С. и Флорина В.А. утверждалось, что при длительных откачках за счет роста эффективных напряжений ($\sigma_z=\gamma_в \cdot S$, где S – величина понижения) в

эксплуатируемом водоносном горизонте наблюдается пополнение запасов за счет оттока воды из глинистых толщ из подстилаемого относительного водоупора за счет процесса фильтрационной консолидации [7]. В этих работах анализируется необходимость проведения экспериментальных исследований по изучению компрессионных свойств водоупорных глинистых пород, которые должны предшествовать составлению проектов, направленных на изучение специфики длительной работы эксплуатационных систем.

Возникает вопрос, можно ли по компрессионным испытаниям выполнять прогнозирование возможности оттока воды из глинистых водоупоров и пополнения запасов подземных вод? Как известно, в стандартных компрессионных приборах длина пути фильтрации составляет 1 см (при двухстороннем оттоке воды); замеры порового давления иглодатчиками в слабых глинистых грунтах, включая мягкопластичную консистенцию ($0,5<I_L\leq 0,75$), показали, что величина порового давления зависит от содержания глинистой фракции и для таких грунтов составляет примерно 0,3 от p_c. Как известно, при названных выше условиях и понижении напора на 10 м, что соответствует повышению эффективных напряжений на 1 кгс/см^2, значение градиента напора в компрессионном приборе при двухсторонней фильтрации будет составлять 300 и более. Дальнейшее снижение уровня подземных вод будет приводить к дальнейшему росту градиентов, которые *in situ* – нереальны.

Стоит также отметить, что глинистые толщи водоупоров являются, в основном, коренными породами, которые характеризуются твердой консистенцией. Соответственно, вся структурированная вода в таких глинистых породах находится согласно исследованиям на установках ЯМР в твердообразном состоянии.

Для таких глинистых отложений приобретает громадное значение роль микро- и макротрещиноватости различного генезиса – тектонического и нетектонического (за счет процессов выветривания) [8]. При этом верхняя часть таких глинистых толщ захвачена нетектонической трещиноватостью за счет действия процессов выветривания, которая по нашим исследованиям может варьировать в пределах 15-30 м в зависимости от общей мощности водоупоров. Практика исследований показывает, что по этим трещинам происходило и происходит восходящее либо нисходящее перетекание подземных вод из водоносных горизонтов, о чем свидетельствуют вторичные образования на поверхности трещин.

Стоит отметить, что по таким трещинам при фильтрации наблюдается перенос различных форм микроорганизмов и их вторичное заселение. Обычно такой перенос происходит на тонкодисперсных частицах. Подтверждением образования биопленок преимущественно по трещинам служат результаты исследований содержания микробной массы (ММ): в блоках глин ММ = 10,3 мкг/г, а по трещинам превышает 72 мкг/г.

Таким образом, при проведении длительной эксплуатации подземных вод для различных целей следует уделять особое внимание строению водоупорных глинистых толщ, разделяющих водоносные горизонты. Пополнение запасов подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта, а также изменение кислотно-щелочных, окислительно-восстановительных условий и химического состава подземных вод наблюдается не за счет отжатия воды из водоупоров, а в результате ее перетекания из водоносных горизонтов по макро- и микротрещинам, которыми обладают практически все литифицированные глинистые породы.

Список литературы

1. Бернал, Д., Фаулер, Р. Структура воды и ионных растворов / Д. Бернал, Р. Фаулер // Успехи физических наук. – 1934. – т. 14. – № 5.

2. Дашко, Р. Э. Инженерно-геологический анализ и оценка водонасыщенных глинистых пород как основания сооружений / Р. Э. Дашко. – С-Пб: Институт “Георекнструкция”, 2015. – 386 с.

3. Дерягин, Б. В., Чураев, Н. В. Новые свойства жидкостей / Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев. – М.: Наука, 1971.

4. Дистлер, Г. И., Кобзарева, С. А. Дальнодействие активных центров кристаллических

поверхностей / Г. И. Дистлер, С. А. Кобзарева // Дальнодействие активных центров кристаллических поверхностей. Доклады Академии наук. – 1967. – т. 172. – № 5. – с. 1069-1071.

5. Зарецкий, Ю. К. Теория консолидации грунтов / Ю. К. Зарецкий. – М.: Наука, 1967.

6. Мецик, М. С. Свойства тонких пленок между пластинками слюды / М. С. Мецик // Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах: Сборник докл. IV конференции по поверхностным силам. – М., Наука, 1979. – с. 189.

7. Мироненко, В. А., Сердюков, Л. И., Котов, Й. Г. О влиянии сжимаемости «водоупорных» пород на процесс фильтрации в водоносных пластах / В. А. Мироненко, Л. И. Сердюков, Й. Г. Котов // Записки Горного института. – 1971. – т. 2. – с. 39.

8. Протосеня, А. Г., Вербило, П. Э. Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива / А. Г. Протосеня, П. Э. Вербило // Записки Горного института. – 2017. – т. 223. – с. 51-57

9. Чижик, В. И. Определение структуры водных растворов электролитов с помощью ядерной магнитной релаксации / В. И. Чижик. – 1966. Автореф. дис… канд. физ.-мат. наук. ЛГУ, Ленинград.

10. Terzaghi, K. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage / K. Terzaghi. – Wien: Franz Deuticke, 1926.

РАДИОАКТИВНОСТЬ ВОД РОДНИКОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КОЛЫВАНЬ-ТОМСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ЗОНЫ

Деркачев А.С[1,2]., Дульцев Ф.Ф[2]., Хващевская А.А[3].

[1]Новосибирский государственный университет, Новосибирск,

[2]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, derkachyovas@ipgg.sbras.ru

[3]Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, unpc_voda@mail.ru

Аннотация. Приводятся геохимические данные по родникам центральной части Колывань-Томской складчатой зоны, опробованным в пределах осадочных комплексов от среднего девона до раннего карбона. По химическому составу воды разделились на три группы: 1 – HCO_3 Ca-Mg, HCO_3 Mg-Ca; 2 – SO_4-HCO_3 Ca-Mg, SO_4-HCO_3 Mg-Ca; 3 – Cl-HCO_3 Ca-Mg, Cl-SO_4-HCO_3 Ca-Mg. С помощью программного комплекса ArcGis составлены карты распределения U, Th и Rn. Их концентрации достигают следующих значений (мкг/дм^3): U – 45,6 мкг/дм^3 в с. Новолуговое, Th – 0,027 мкг/дм^3 в с. Барышево. Наибольшая активность ^{222}Rn установлена в водах «Инских источников» и составила 130 Бк/дм^3.

Ключевые слова: *радиоактивность вод, родники, Колывань-Томская складчатая зона, юг Западной Сибири.*

Abstract. Geochemical data on springs of the central part of the Kolyvan-Tom fold zone sampled within sedimentary complexes from the Middle Devonian to the Early Carboniferous are presented. According to the chemical composition of the waters, they divided into three groups: 1 – HCO_3 Ca-Mg, HCO_3 Mg-Ca; 2 – SO_4-HCO_3 Ca-Mg, SO_4-HCO_3 Mg-Ca; 3 – Cl-HCO_3 Ca-Mg, Cl-SO_4-HCO_3 Ca-Mg. Using the ArcGis software package, distribution maps of U, Th and Rn were compiled. Their concentrations reach the following values (μg/dm^3): U – 45.6 μg/dm^3 in s. Novolugovoye, Th – 0.027 μg/dm^3 in the Baryshevo village. The highest activity of ^{222}Rn (130 Bq/dm^3) was found in the waters of the Inskiye Springs.

Key words: *radioactivity of waters, springs, Kolyvan-Tomsk folded zone, south of Western Siberia.*

Колывань-Томская складчатая зона характеризуется весьма сложным геологическим строением: сильно дислоцированные породы палеозойского фундамента прорваны гранитоидами пермо-триасового возраста. Трещиноватость интрузивов кислого состава в зоне активного водообмена обуславливает вынос, миграцию и переотложение подземными водами радиоактивных элементов: урана и продуктов его радиоактивного распада: тория, радия и радона, что в свою очередь ведет к повышению фоновых концентраций данных элементов в регионе. В административном плане

исследуемая территория относится к востоку Новосибирской области – её наиболее густонаселенной части. Кроме того, на окраине Новосибирска открыто месторождение урана «Пригородное». Количество и плотность расположения населенных пунктов вокруг города позволяют объединить их в Новосибирскую городскую агломерацию (НГА). Зачастую, в частных домовладениях в питьевых и хозяйственных целях используются собственные скважины, анализ радионуклидов в водах которых не проводится. Таким образом, на территории исследований риски воздействия природных источников ионизирующего облучения на население существенно повышены.

Радиоактивность природных вод изучается коллективом лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН с 2018 г, и данная работа продолжает эту серию [1-7]. Во время исследований были выявлены закономерно повышенные концентрации радионуклидов в водопунктах, приуроченных к гранитоидам. Также были выявлены новые проявления, как связанные с кислыми интрузивами (Новобибеевское и Седова заимка), так и те, природа которых не может быть объяснена близким расположением гранитоидов (Инские источники, Железнодорожное проявление).

При изучении гидрогеологии любого региона большое значение имеют исследования подземных вод в местах их естественной разгрузки: родники с повышенными концентрациями радионуклидов могут маркировать естественные пути миграции последних от интрузивных пород, или от мест вторичного накопления этих элементов в богатых органикой осадочных толщах [8-11] Фактический материал, лежащий в основании данной работы получен авторами в ходе полевых работ в пределах центральной части Колывань-Томской складчатой зоны в период с 2020 по 2022 гг. Основное внимание уделено концентрациям урана, тория и активности радона в пробах. Радон является дочерним продуктом в ряду распада урана, в то же время, он и сам является радиоактивным с периодом полураспада 3,8 сут, что исключает его перенос подземными водами на большие расстояния. Таким образом, повышенная активность радона в водах родников с одной стороны маркирует естественные пути миграции радионуклидов, а с другой – может указывать на небольшое расстояние до источника эманации.

На месте отбора проб проводилось определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O2 и HCO3– на приборной базе мультипараметрового измерителя pH/ОВП/проводимости Hanna HI98195, который оснащен платиновым датчиком для измерения окислительно-восстановительного потенциала и эталоном с двойным соединением серебро/хлорид серебра с гелеобразным электролитом, и оксиметра Hanna HI98198. Лабораторное изучение химического состава проб проводилось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Название химического типа воды дано в соответствии с формулой М.Г. Курлова (более 10 %-экв) по оттеночному принципу от меньшего к большему. Анализ активности радона в воде проводился с участием авторов работы на альфа-радиометре «Альфарад плюс».

Изученные воды разделились на три химические группы: 1 – с преобладанием гидрокарбонат-иона (HCO3 Ca-Mg, HCO3 Mg-Ca); 2 – обогащенных сульфат-ионом (SO4-HCO3 Ca-Mg, SO4-HCO3 Mg-Ca); 3 – обогащенных хлорид-ионом (Cl-HCO3 Ca-Mg, Cl-SO4-HCO3 Ca-Mg).

Воды первой группы умеренно и собственно пресные (минерализация 389 – 743 мг/дм3), геохимическая среда варьирует от восстановительной (Eh -55 мВ) до окислительной (Eh +235 мВ), водородный показатель в водах изменяется от нейтральных (7,1) до слабощелочных (8,3), содержание растворенного кислорода меняется в большом диапазоне от 0,52 до 10,72 мг/дм^3. Были проведены замеры активности радона-222 в воде, которые показали, что воды являются безрадоновыми (1 – 28 Бк/дм3) и очень слабо

радоновыми (38 – 130 Бк/дм^3) (по классификации Н.И. Толстихина). Содержание урана изменяется от 1,13 до 11,83 мкг/дм3. Установлена прямая зависимость накопления урана от концентраций основных анионов и иона кальция, а также обратная от Eh и O_2раств.

Воды второй группы отличаются наличием в составе сульфатов и по величине общей минерализации отвечают умеренно и собственно пресным (447 – 701 мг/дм^3), и слабосолоноватым (1049 мг/дм^3). Геохимические параметры среды изменяются от восстановительных до окислительных (Eh -92 – +281 мВ), pH 7,1 – 7,6, содержание O2раств. изменяется от 1,67 до 6,76 мг/дм3. Активность 222Rn составляет 3 - 65 Бк/дм3, а концентрации урана варьируют от 0,007 до 30,78 мкг/дм3.

В водах третьей группы отмечаются повышенные значения хлорид-иона (45–46 мг/дм^3) относительно описанных выше вод, что по классификации М.Г. Курлова позволяет отнести данные воды к хлоридным. Данные воды собственно пресные (минерализация 757 мг/дм^3) и слабосолоноватые (минерализация 1038 мг/дм3). Геохимическая среда окислительная с Eh +224–+259 мВ, pH 7,3–8,0 и содержанием O_2раств. 3,56– ,85 мг/дм^3. Активность радона-222 изменяется от 9 до 31, концентрации урана варьируют от 12,68 до 45,62 мкг/дм^3.

С геологической точки зрения изученные родники находятся в зоне широкого распространения среднедевонско-нижнекаменноугольных отложений. Согласно геологической карте на рисунке 1 [12] основная часть изученных объектов расположена в пределах поля юргинской (D3jg) и пачинской (D3pč) свит, представленных соответственно песчаниками мелко-среднезернистыми серыми, реже зеленовато-серыми, сланцами глинистыми темно-серыми с прослоями песчаников, алевролитов; и глинистыми сланцами, алевролитами, реже песчаниками и рифогенными известняками. Реже, родники изучены в области нерасчлененных Саламатовской (чингисской) и ярской толщ (D3–C1 sm-jar), сложенных глинистыми сланцами и известняками, а также буготакской свиты (D2bg), объединяющей в себе сложный комплекс эффузивно-осадочных образований пестрого литолого-петрологического состава.

В целом, концентрации урана в водах изученных родников варьируют в достаточно широких пределах: от 0,007 мкг/дм^3 в СНТ Березка до 45,6 мкг/дм^3 в селе Новолуговое, при фоновых концентрациях урана до 1 мкг/дм^3. Концентрации тория варьируют в пределах 0,0003 - 0,027 мкг/дм^3. В некоторых случаях, наблюдается взаимосвязь концентраций урана и тория (родник в с. Новолуговое, родник в долине р. Дубрава) Активность радона может достигать 130 Бк/дм^3 в водах «Инских источников». Распределение радионуклидов показано на рисунке 2. При этом, описанные выше концентрации значительно меньше концентраций этих радионуклидов в подземных водах Колыванского гранитоидного массива, которые составляют: U – до 6500 мкг/дм^3 Th – до 0,56 мкг/дм^3, Rn – до 43764 Бк/дм^3 [7]. Также установлено, что повышенная активность радона в водах не гарантирует обнаружение высоких концентрации урана и тория. Так, при повышенной активности радона в «Инских источниках», концентрации урана в их водах не превышают 3,6 мкг/дм^3. В то же время в пробе с наибольшей концентрацией урана (родник в СНТ Березка) активность радона составляет всего 8 Бк/дм^3.

Таким образом, воды изученных родников по химическому типу подразделяются на три группы, среди которых первая является наиболее многочисленной. Ее гидрокарбонатный магниево-кальциевый состав обусловлен широким распространением на территории исследований карбонатных водовмещающих пород. Воды второй группы характеризуются повышенными концентрациями сульфатов, что может объясняться процессами окисления сульфидов, широко распространенных в осадочных породах данного региона. Рост содержаний хлорид-иона и магния в водах третьей группы свидетельствует о высокой антропогенной нагрузке. Повышенные концентрации урана в ряде случаев могут быть обоснованы относительно близким

расположением к интрузивным образованиям. В случае со «Святым источником» в п. Верх-Тула возможно наличие осадочной толщи с высоким содержанием органического вещества, выступающего в роли геохимического барьера, способствующего накоплению урана. Наиболее высокие концентрации урана и активности радона характерны для вод $Cl\text{-}SO_4$ $HCO_3\text{-}Ca\text{-}Mg$ и $HCO_3\text{-}Ca\text{-}Mg$ составов.

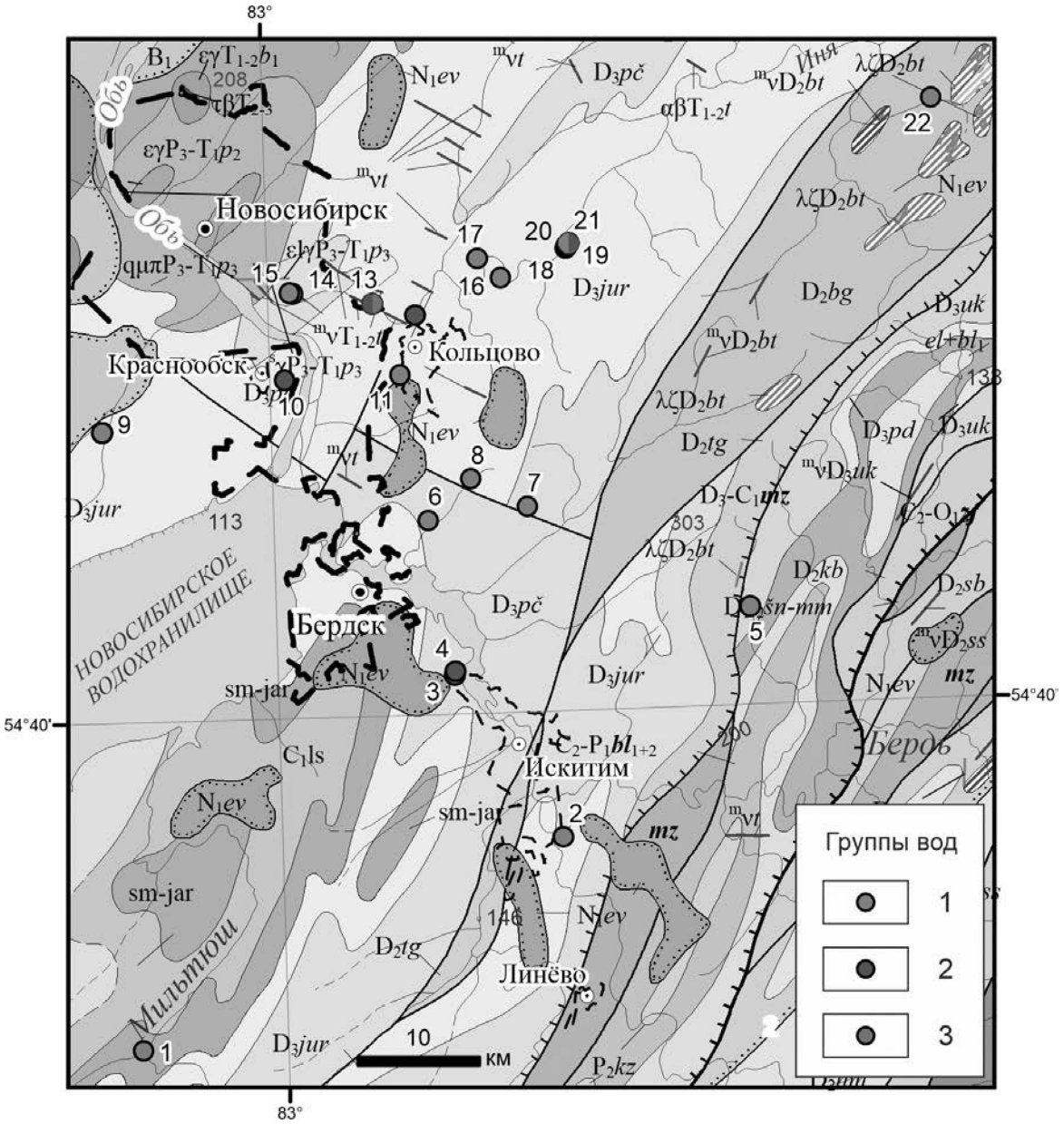


Рис. 1. Карта фактического материала на фрагменте геологической карты [12].
Названия родников: 1 – родник в д. Горевка; 2 – «Святой источник», п. Ложок; 3 – родник в СНТ Березка; 4 – родник в СНТ Березка (ул. Пароходная); 5 – родник в с. Елбаши; 6 – родник в п. Шадриха; 7 – родник в с/о Родничок; 8 – родник в п. Университетский; 9 – «Святой источник», Верх-Тула; 10 – родник в СТ Элитное-3; 11 – родник в долине р. Дубрава; 12 – родник в с. Барышево; 13 - родник в с. Новолуговое; 14 - родник в с. Новолуговое (каптаж); 15 – Родник у ж/д путей в Новосибирске; 16 – родник в с. Железнодорожный; 17 – родник в д. Издревая; 18 – Инские источники (1); 19 – Инские источники (2); 20 – Инские источники (3); 21 – Инские источники (4); 22 – родник в п. Ермачиха.

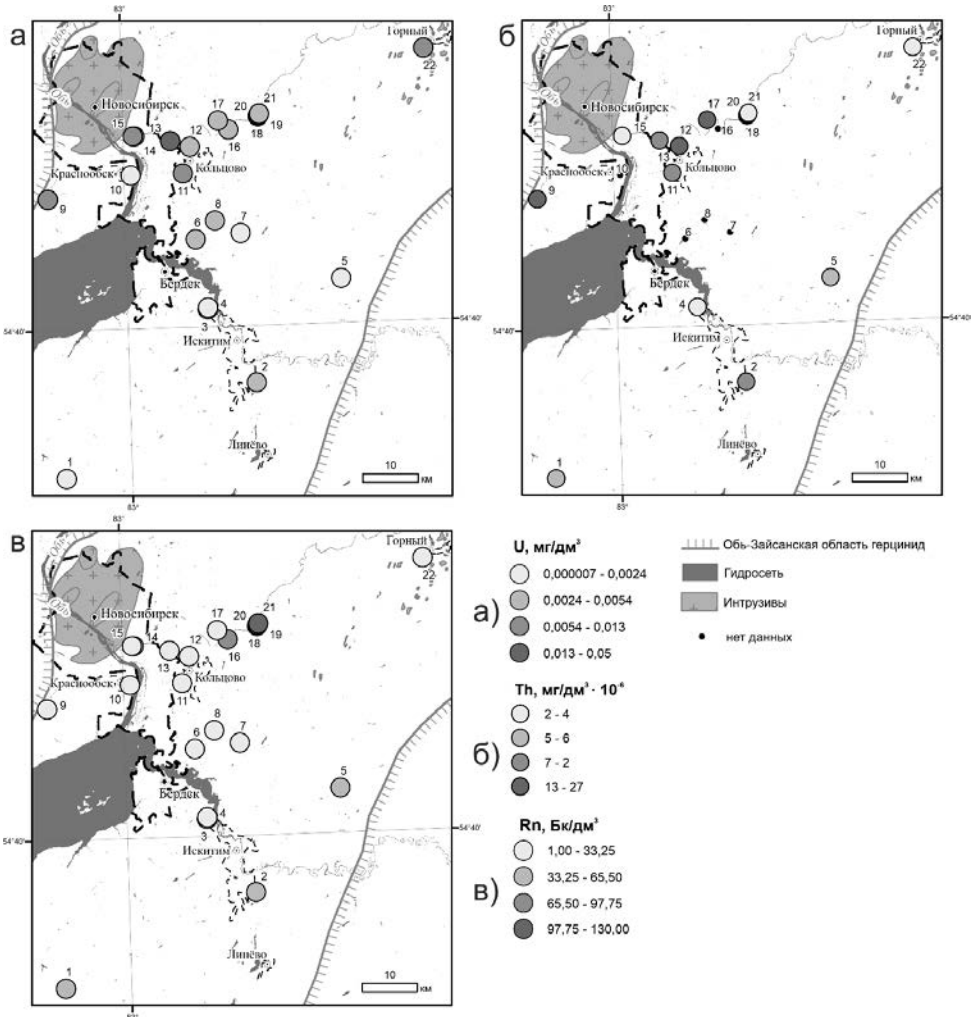


Рисунок 2. Распределение радионуклидов в водах родников центральной части Колывань-Томской складчатой зоны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области

Список литературы

1. Novikov D.A. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, Yu.G. Kopylova, A.N. Pyryaev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachev, A.F. Sukhorukova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh, A.A. Khvashchevskaya, P.N. Kalinkin, A.V. Petrozhitsky // Groundwater for Sustainable Development. – 2023. – V. 20. – 100886.

2. Novikov D.A. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachyov, A.V. Chernykh // Geochemistry. – 2023. – V. 83. – № 4. – 126016.

3. Максимова, А.А. Токсичные элементы в подземных водах северных районов Обь-Зайсанской складчатой области / .А. Максимова, А.В. Черных, Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.С. Деркачев, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Никитенков, А.А. Хващевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 17-26.

4. Черных А.В. Микрокомпоненты в природных водах Новосибирской городской агломерации: распределение, фон, аномалии / А.В. Черных, Д.А. Новиков, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.С. Деркачев // Химия в интересах устойчивого развития. – 2023. – Т 31. – № 4. – С. 465-476.

5. Новиков, Д.А. Об открытии слаборадоновых вод – Инские источники / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, А.Ф. Суорукова, Л.Г. Вакуленко, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, А.Н. Фаге, А.А. Хващевская, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, М.С. Мельгунов, П.Н. Калинкин, С.А. Растигеев // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 12. – С. 1714-1733.

6. Novikov D.A. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky–Mochishche zone of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, R. Kamenova-Totzeva, T.V. Korneeva // Environmental Earth Sciences. – 2021. – V. 80. – No. 216.

7. Novikov D.A. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachyov // Groundwater for Sustainable Development. – 2021. – V. 15. – 8 p.

8. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология: Учебн. Для вузов – М.: Альянс, 2012. – 602 с.

9. Дзюба А.А. Разгрузка рассолов Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1984. – 155 с.

10. Крайнов С.Р. и др. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец; отв. ред. Академик Н.П. Лавров. – М.: Наука, 2004. – 677 с.

11. Основы гидрогеологии. Гидродинамика / Гавич И.К., Ковалевский В.С., Язвин Л.С. и др. – Новосибирск: Наука, 1983. – 241 с.

12. Бабин Г. А., Черных А. И., Головиной А. Г., Жигалова С. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-44 – Новосибирск. Объяснительная записка / под ред. – СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 392 с. + 4 вкл.

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ИСТОЧНИКОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ТЕРРИТОРИИ ГОРНОГО АЛТАЯ: ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЛЕЧЕБНО-ОЗДОРОВИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛЯХ

Джабарова Н.К.[1], Кац В.Е.[2], Ролдугин В.В.[2], Коханенко А.А.[1], Сидорина Н.Г.[1]
[1]Томский НИИКиФ ФФГБУ ФНКЦ МРиК ФМБА России, Томск, Россия
[2]АО «Алтай-Гео», с. Майма, Республика Алтай

Аннотация. Показаны перспективы использования подземных природных вод уникальных источников юго-восточной части Горного Алтая в лечебно-оздоровительных целях для развития туристско-рекреационной зоны вдоль Чуйского тракта на территории Республики Алтай.

Ключевые слова: *Горный Алтай, подземные воды, лечебно-оздоровительный туризм, Чуйский тракт*

Abstract. The distribution of underground natural waters of unique sources of the southeastern part of Gorny Altai is shown. These waters can be used for medical and recreational purposes for the development of a tourist and recreational zone along the Chuisky tract of the Altai Republic.

Key words*: Gorny Altai, underground natural waters, health tourism, Chuisky tract*

В гидрогеологическом плане территория Республики Алтай находится в Алтае-Саянской гидрогеологической складчатой области. Подземные воды в основном сосредоточены в корово-блоково-жильных телах. Они локализуются в водоносных зонах, комплексах, развитых преимущественно в верхней трещиноватой зоне гидрогеологических стратотипов широкого возрастного диапазона (от триасового до протерозойского возраста). Определенный объем подземных вод в республике сосредоточен в блоково-пластовых, пластовых водах артезианских бассейнов межгорных впадин и в водоносных комплексах и горизонтах четвертичных отложений разного генезиса. Проявления подземных вод в виде родников широко проявлено практически по всей территории республики [1, 2].

В настоящее время на территории Республики Алтай вдоль Чуйского тракта формируется туристско-рекреационная зона, с развитием инфраструктуры которой значительно увеличился поток автотуристов в отдалённые высокогорные районы юго-востока региона. Рекреантов привлекают экзотичность ландшафтов высокогорных полупустынь, этнические, археологические памятники, целебные источники. Особый

интерес представляют объекты геологического наследия и историко-культурные объекты Геопарка «Алтай», функционирующего с 2016 года как «туристско-рекреационная зона».

Геопарк «Алтай» включает известный геологический объект Курайская (гигантская) рябь – свидетельство глобальных катастрофических процессов позднечетвертичного времени, и по своим характеристикам занимает одно из первых мест в мире [3]. В пределах Геопарка отмечается и большое количество родников (источников), которые приурочены к широкому спектру геологических образований; имеют большой разброс дебитов, температуры, характеризуются широким диапазоном гидрогеохимического состава от ультрапресных до солёных. Гидрохимический и микроэлементный состав родниковых вод зависит от ландшафтных условий, тектонической, геолого-структурной ситуации, типов водовмещающих пород и от гидрогеохимических особенностей территории. Это находит отражение в повышенных концентрациях в родниковых водах большого спектра эссенциальных микроэлементов и биологически активных компонентов. Непосредственно на территории Геопарка «Алтай» зарегистрировано более 50 родников, используемых населением для питьевых и лечебных целей, из которых 4 имеют статус ООПТ.

Цель работы. Оценить возможности использования подземных вод источников юго-восточной территории Горного Алтая для развития туристско-рекреационной зоны вдоль Чуйского тракта на территории Республики Алтай.

Результаты. Источники рассматриваемой территории в геологическом плане, как правило, образуют локальные скопления: в рыхлых континентальных отложениях межгорных впадин (Чуйская, Курайская, Чулышманская); среди протерозойских - палеозойских карбонатных фрагментарно-битуминозных и фосфатоносных отложениях; разновозрастных интрузивных образованиях, а также в тектонических разломах, разграничивающих структурно-формационные зоны.

Для характеристики родников (источников), как объектов Геопарка, проведена их оценка по следующим показателям: положение в рельефе (склон, подножие, долина); тип родника (нисходящий, восходящий); водовмещающие породы (литологический состав); геологический возраст пород; дебит и температура воды; гидрохимический состав вод, содержание эссенциальных и биологически активных компонентов; наличие каптажа; санитарное состояние; наличие баннера по характеристике источника с рекомендациями по применению родниковых вод. В таблице отображены объекты, которые могут представлять интерес для использования в лечебно-оздоровительных целях.

В Кош-Агачском районе известны локальные скопления термальных радоновых вод – **Джумалинские (ключи) родники**, каптирующие подземные воды девонских вулканитов. Джумалинские источники (другое название «Теплые Ключи»)- этот редкий вид термальных источников, содержащих радон, имеет статус памятника природы Республики Алтай. Местонахождение Джумалинских источников примыкает к восточной границе плато Укок. Сразу за Джумалинскими ключами начинается «зона покоя Укок», отнесенная ЮНЕСКО к охраняемым природным объектам.

Джумалинские источники представляют собой рассредоточенные выходы («струи») трещинно-жильных вод из гранитоидов Калгутинского комплекса на площади 600,0 м^2. На участках выхода вод развиты моренные отложения мощностью от 2-3 м до 10 м, из-под которых вытекают до 10 источников. Источники по характеру режима - постоянного действия, функционируют круглый год. Дебиты родников варьируют в разных выходах от 0,5 до 15 л/с. Температура воды в «струях» колеблется в зависимости от сезона года от 17 до 22ºС. Воды источников обогащены азотом до 94,7%, благородными газами и характеризуются наличием радона (от 7,4 до 107,0 Бк/дм^3) и фтора (до 15,5 мг/дм^3). В водах родника выявлен широкий спектр эссенциальных микроэлементов (железо, марганец, цинк, медь, барий, хром, литий, бор, селен, сурьма). На всей площади выходов источников развита богатая растительность (мхи, водоросли). Наиболее крупные ключи периодически газируют («пульсируют»). Три наиболее

мощных источника каптированы в трубы, вода из которых поступает в закрытые павильоны («баньки»), в которых имеются ванны с проточной радоновой водой, а также есть открытый бассейн с источником. Сезон принятия термальных ванн на Джумалинских источниках длится с мая по ноябрь.

В соответствии с Классификацией природных лечебных ресурсов МЗ РФ подземные воды Джумалинских источников по целевому назначению относятся к категории вод для наружного бальнеотерапевтического применения; по основным бальнеологическим показателям лечебной значимости - к группе слабо кремнистых (кремнистых) вод (H_2SiO_3 30,0-80,0 мг/дм^3), по минерализации и основному ионно-солевому составу к пресным (минерализация 0,18-0,31 г/дм^3), гидрокарбонатно-сульфатным (хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатным) натриевым, тёплым (Т 17-22 °С), слабощелочным (pH 8,2). Воды Джумалинских источников по составу схожи с водами Белокурихинского месторождения, которые используются для наружного применения при заболеваниях системы кровообращения, костно-мышечной системы, болезнях кожи и др. на курорте «Белокуриха».

Родник Чаган-Узунский находится на правом борту коренного склона р. Чуя в 1 км выше села Чаган-Узун. Родник нисходящего типа. Источник представляет собой сосредоточенный выход нижнекембрийской водоносной зоны, образуя небольшой горный ручей, который через 60 м впадает в р. Чуя. Специальные наблюдения на роднике за гидродинамическим режимом и качеством вод осуществляются АО «Алтай-Гео» с 2001 г. Дебит родника за прошедший период варьировал от 0,1 до 1,5 л/с, при этом перед Алтайским землетрясением (2003 г.) он был максимальным, после землетрясения уменьшался до полного «исчезновения». В 2008 г. вода появилась, с дебитом 0,1 л/сек. Температура воды в роднике варьирует от 1,5 до 3,3°С.

Гидрохимический и микроэлементный состав воды родника весьма непостоянен и зависит от сезона года и сейсмической обстановки в районе. Вода источника по составу гидрокарбонатная (сульфатно-гидрокарбонатная) магниево-кальциевая, пресная (минерализация 0,52-0,75 г/дм^3), с нейтральной (щелочной) реакцией водной среды (pH 7,6-9,3). В родниковой воде содержатся (в мг/дм^3) такие биогенные компоненты, как метакремниевая кислота 25,6-33,8; органическое вещество 7,5; свободная двуокись углерода 54,0, а также практически весь набор эссенциальных элементов (железо, марганец, медь, серебро, никель, ванадий, хром, цинк, литий, селен)

Родник Бугузунский (Аккаялу-Озекский) находится в 40 км северо-восточнее с. Кокоря, в правом борту р. Аккаялу-Озёк, в 4,8 км от устья реки. Родниковые воды стекают с известняков белого цвета, и вся долина ручья протекает среди белых мраморированных известняков. Родник представляет собой нисходящий рассредоточенный выход трещинно-карстовых вод, приуроченный к подошве известняков нижнекембрийского возраста. В геоморфологическом плане родник приурочен к тыловому шву склона с ледниковым ложем отроговой долины р. Аккаялу-Озёк. На участке рассредоточенного выхода зафиксировано три вытекающих из-под скал мощных источника, образующих ручей – правый приток реки. Гидродинамический режим родника изучался эпизодически. Суммарный дебит родника в 2008 г. составлял 0,6 л/сек., средний дебит составляет 0,2-0,3 л/с, температура воды 6°С.

Физико-химический состав воды родника сульфатно-гидрокарбонатный магниево-кальциевый, с минерализацией 0,21-0,35 г/дм^3, воды мягкие, жесткость 2,6-2,7 мг-экв/дм^3. Состав воды подвержен сезонным изменениям: катионный состав в весенне-летний период натриево-кальциевый, в осенний период магниево-кальциевый. Воды источников обогащены азотом до 81,9%. В воде родника выявлены органические вещества ($C_{орг.}$ 5,0 мг/дм^3), метакремниевая кислота, а также практически весь набор эссенциальных элементов. Источник является одним из объектов культурного наследия района и памятником природы Республики Алтай. Территория благоустроена, для

освещения помещений установлена солнечная электростанция. Родник каптирован тремя стальными трубами для забора воды и приема ванн, место приема ванн оборудовано дощатыми кабинками. Ниже по склону от родника оборудована летняя стоянка, состоящая из трех жилых домов и летней беседки.

Родник Чулышманский (сероводородный) находится в Улаганском районе, в приустьевой части Телецкого озера на склоне г. Атышту. Берег р. Чулышман в районе выхода источника на поверхность представляет крутой склон массива с небольшой террасой от одного до трех метров, на которой насчитывается три выхода подземных вод приблизительно с одинаковым дебитом. Родник нисходящего типа, представляет собой рассредоточенный выход («струи») трещинно-жильных вод из метаморфических сланцев на площади 30*2 м. Истоки родника находятся в скальных выходах в правом борту р. Чулышман в 1-3 м от берега. Специальные наблюдения на роднике за гидродинамическим режимом не проводились. По эпизодическим данным источник оценивается по классификации дебита как низко дебитный, незначительный, отдельные струи имеют дебит 0,06 до 1,5 л/сек. Температура воды в роднике составляет от 9 до 10,6 °С. По гидрохимическому составу воды родника гидрокарбонатные магниево-натриево-кальциевые; пресные (минерализация 0,25-0,27 г/дм^3), мягкие (жесткость 2,55-2,65 мг-экв./дм^3), слабо щелочные (pH 7,4-8,3). В водах родника выявлены биологически активные компоненты: метакремниевая кислота 15,2-30,0 мг/дм^3; содержание сероводорода варьирует от 0,1 до 8,3 мг/дм^3 [2, 3]. Из эссенциальных элементов установлены марганец, цинк, литий, железо, хром, серебро, медь, молибден. В настоящее время на площадке, недалеко от источника, расположен небольшой ванный павильон, домики для отдыха (аилы). Источник является памятником природы республиканского значения «Чулышманский источник «Адышту».

Курортологическое обследование территории (ТНИИКиФ, 2013) показали, что по биоклиматическому потенциалу местность в районе источника «Адышту» относится к категории умеренно комфортного воздействия на организм человека, что позволяет использовать её для лечебно-оздоровительных и рекреационных мероприятий. Местность расположена в зоне УФ комфорта с избытком УФ лучей в летние месяцы. Период возможной гелиотерапии – 7 месяцев, оптимальной – 4–5 месяцев. Вблизи с. Балыктуюль расположено естественное обнажение белых глин, которые при благополучном санитарном состоянии могут использоваться в целях медицины и косметологии.

В юго-западной части Чуйской долины, в урочище **Джегитай** (в 9 км западнее с. Тобелер) выявлены родники с маломинерализованными (минерализация 1,4-3,2 г/дм^3) сульфатно-гидрокарбонатными магниево-натриевыми водами. Эти же воды вскрыты самоизливающейся скважиной № 108. В воде скважины присутствует органическое вещество (до 11,4 мг/дм^3), среди микроэлементов выявлен литий (АО «Алтай-Гео», 2000 г.). Рекомендуется провести комплексные исследования состава и качества вод с целью решения вопроса их использования в лечебно-оздоровительных целях [4].

В соответствии с Классификацией природных лечебных ресурсов МЗ РФ подземные воды урочища Джегитай по целевому назначению относятся к категории вод для питьевого применения; по основным бальнеологическим показателям лечебной значимости - к группе вод без специфических компонентов и свойств, по минерализации и основному ионно-солевому составу к маломинерализованным (минерализация 1,4-3,2 г/дм^3), сульфатно-гидрокарбонатным магниево-натриевым, очень холодным (Т 0,3 ºС).

Заключение. Результаты исследований источников на территории юго-восточной части Горного Алтая показывают распространение здесь подземных вод различного состава. Наличие уникальных источников подземных природных вод способствует развитию не только познавательного туризма, но и спортивно-оздоровительного, а также лечебно-оздоровительного и экологического туризма вдоль Чуйского тракта.

Учитывая, что ресурсы минеральных подземных вод в Республике Алтай ограничены, перспективны комплексные исследования этих вод в динамике для разработки методических рекомендаций по их применению в оздоровительных целях с учётом и ландшафтно-климатических особенностей территории. Географически исследованная территория Горного Алтая относится к Юго-Восточной Алтайской биоклиматической провинции, климат которой отличается континентальностью с очень суровой зимой, коротким летом и скудным увлажнением. В Чуйской и Курайской котловинах средняя температура июля 13-14 °С. Однако высокая продолжительность солнечного сияния (более 2600 ч в течение года) позволяет использовать отдельные местности в рекреационных и лечебно-оздоровительных целях.

Список литературы

1.Кац В.Е. Природные источники (родники) на территории Геопарка «Алтай» в Республике Алтай [Текст] / В.Е. Кац, В.В. Ролдугин // Природные ресурсы Горного Алтая. – Горно-Алтайск: 2021. – № 25 (1-2). – С. 54-64.

2.Каплина В.И. Вода во спасение [Текст] / В.И. Каплина. – Барнаул: ООО «Спектр», 2018. –78 с.

3. Робертус Ю.В. Объекты геологического наследия в действующих и проектируемых Российских геопарках [Текст] / Ю.В. Робертус // Геологические памятники природы: характеристика, состояние, использование: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Горно-Алтайск: 2021. – С. 23-27.

4. Кац В.Е. Содержания лития в подземных водах Республики Алтай [Текст] / В.Е. Кац, О.О. Вторушина, Л.В. Щучинов, Л.Д. Щучинова // Актуальные вопросы гигиены в условиях современных вызовов: материалы Всероссийской конференции. – Омск: 2023. – С. 121-123.

Таблица

Характеристика обследованных источников подземных вод

Наименование показателей	Наименование источника, местонахождение					
	Джумалинский (Теплые Ключи) 100 км южнее с. Кош-Агач	Чаган-Узунский (Устье белой реки) 1 км восточнее п. Чаган-Узун	Бугузунский (Белая скала) 40 км северо-восточнее с. Кокоря	Чулышманский, (Аржан-Атышту, Сероводородный) склон г. Атышту, берег р. Чулышман	Джегитай 8,2 км южнее с. Тобелер	Ташантинский 0,5 км юго-западнее с. Ташанта
Положение в рельефе	Долина р. Джумала	Выход из коренных пород	Выход из коренных пород	Выход их коренных пород, подножие склона	Склон	Долина реки Ташантинка
Тип родника	Нисходящий-восходящий	Нисходящий	Нисходящий-восходящий	Нисходящий	Нисходящий	Нисходящий
Водовмещающие породы	Кварцевые порфиры, граниты	Метаморфизованные сланцы	Известняки	Сланцы метаморфические	Аргиллиты, сланцы	Алевролиты, песчаники
Геологический возраст водоносного комплекса (ВК), водоносной зоны (ВЗ)	Среднедевонская ВЗ	Нижнекембрийская ВЗ	Кембрийская ВЗ	Протерозойская ВЗ	Палеоген-неогеновый ВК	Среднедевонская ВЗ
Дебит	До 10 родников с дебитом 0,5 - 15 л/сек	0,1 - 1,5 л/сек	Суммарный дебит до 0,6 л/сек; средний 0,2 - 0,3 л/сек	0,06 - 1,5 л/сек	1,2 л/сек	0,3 л/сек
Температура, °С	17,0 - 22,0	1,5 - 3,3	6,0	9,0 - 10,6	0,2	3,0
Минерализация, г/дм^3 гидрохимический состав	0,18 - 0,31 Гидрокарбонатно-сульфатный натриевый	0,52 - 0,75 Гидрокарбонатный магниево-кальциевый	0,21 - 0,35 Сульфатно-гидрокарбонатный магниево-кальциевый	0,25 - 0,27 Гидрокарбонатный, магниево-натриево-кальциевый	1,4 - 3,2 Сульфатно-гидрокарбонатный магниево-натриевый	2,0 Хлоридно-гидрокарбонатный натриево-магниевый
Наличие биологически активных компонентов, эссенциальных микроэлементов в воде, мг/дм^3	H_2SiO_3 30,0-80,0 Rn 7,4-107,0 Бк/л F до 15,5 Mn, Zn, Li, Cu, Cr, Sb, Se, B	H_2SiO_3 25,6-33,8 С орг. 7,5	С орг. 5,0 Mn, Zn, Li, Cu, Ag, Cr Mo	H_2SiO_3 15,2-30,0 H_2S 0,1-8,3	H_2SiO_3 15,0 С (орг) до 11,4 Zn, Li, Cu, Ag, Cr	H_2SiO_3 24,0
Наличие каптажа и его техническое состояние	От выходов родников трубы в баньки и душ	Железная труба	От истоков родника трубы проложены в баньки	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД С ВОДОВМЕЩАЮЩИМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Домрочева Е.В.
Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, Domrochevayv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе приводятся результаты исследования химического состава природных вод на территории Тутуясской площади Томь-Усинского района Кузбасса. Отмечено, что имеющиеся изменения в значениях минерализации и pH присущи естественному их распределению. Источником поступления вод являются атмосферные осадки, поступающие в систему из областей питания, поэтому изученные воды инфильтрационного генезиса. Показаны результаты проведенного расчета равновесий подземных вод данной площади с карбонатными и алюмосиликатными минералами вмещающих пород. Установлено, что воды имеют равновесно - неравновесный характер: они не равновесны с первичными (эндогенными) минералами, которые они и растворяют, но в тоже время равновесны с глинами и карбонатами, т.е. осаждаются из вод.

Ключевые слова: *природные воды, формирование состава, равновесно - неравновесное состояние, Кузбасс.*

Abstract. The article presents the results of a study of the chemical composition of natural waters on the territory of Tutuyasskaya square in the Tom-Usinsky district of Kuzbass. It is noted that the existing changes in the values of mineralization and pH are inherent in their natural distribution. The source of water intake is atmospheric precipitation entering the system from the feeding areas, therefore, the studied waters of infiltration genesis. The results of the calculation of the equilibria of groundwater of this area with carbonate and aluminosilicate minerals of the host rocks are shown. It is established that the waters have an equilibrium - nonequilibrium character: they are nonequilibrium with primary (endogenous) minerals, which they dissolve, but at the same time they are equilibrium with clays and carbonates, i.e. they are precipitated from water.

Key words: *natural waters, formation of composition, equilibrium - nonequilibrium state, Kuzbass.*

В последние годы сотрудниками ТФ ИНГГ СО РАН продолжилось изучение поверхностных и подземных вод на территории Кемеровской области. Ранее авторами достаточно детально были изучены формирование и гидрогеохимические условия территорий Нарыкско–Осташкинской и Талдинской площадей Кузбасса [1, 2]. В данной работе исследования сосредоточены на территории одной из южных площадей – Тутуясской. Все площади представляют собой территории с большими оцененными запасами угольного метана [2].

Следует отметить, что при интенсивной разработке полезных ископаемых происходит значительное изменение состояния природной среды - изменяется ландшафт и как следствие изменение гидросети. Это очень характерно для Кузбасса, в частности для площадей соседних с Тутуясской. Сама же площадь до настоящего момента не была подвержена таким изменениям и имеет естественное (природное) состояние. Однако, при разработке месторождений происходит формирование вод по составу не характерных для региона. Все это объясняет необходимость изучения геохимии природных вод, особенно до начала освоения территории.

Анализ гидрогеохимических условий природных вод этого района позволил автору выявить причины изменения их химического состава и понять процесс взаимодействия подземных вод в системе вода–порода. Для этого с помощью программного комплекса HG были рассчитаны активности основных ионов и построены диаграммы равновесия подземных вод. Подобные работы выполнялись разными авторами, однако они более популярны среди иностранных, выполненных для зарубежных территорий [3, 4].

За основу работы взяты результаты анализа проб, отобранных в 2015–2016 гг. сотрудниками ТФ ИНГГ СО РАН в ходе совместных работ с ООО «Газпром добыча Кузнецк», а также другие имеющиеся данные по этой территории. В полевых условиях

измерялись: температура, pH, Eh и быстроизменяющиеся компоненты. Аналитические исследования проводились стандартными методами в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета, зарегистрированной в Системе аналитических лабораторий Госстандарта России. При проведении полного химического анализа вод использовались традиционные методы, а также методы спектрального и атомно-абсорбционного анализа.

Расчет активностей проводился с использованием программного комплекса HydroGeo, разработанного М.Б. Букаты [2]. Степень насыщения подземных вод относительно основных породообразующих минералов алюмосиликатных отложений анализировалась посредством нанесения данных по составу вод на диаграммы полей устойчивости алюмосиликатов. Методика их построения подробно рассматривается в работах Р.М. Гаррельса [5], Х.К. Хельгессона [6], Дж.М. Андерсона [7]. Все выявленные соотношения между минералами представлены на двумерной диаграмме в координатах, соответствующих в реакциях переменным.

Проведенное гидрогеохимическое опробование на данной территории показало, что исследуемые поверхностные воды являются умеренно пресными, по величине pH от нейтральных до слабо щелочных. Минерализация этих вод составляет от 37 до 371 мг/л, значения pH от 7,2 до 8,5. Минимальные значения макрокомпонентов установлены в Большом озере на слиянии рек Таборная и Ольжерас, максимальные – в р. Абашева и в р. Большая Кедровка. По химическому составу воды HCO_3- Ca с содержанием HCO_3^- 22–273 мг/л и Ca^{2+} 6–54 мг/л. Поверхностные воды природных озер и опробованных рек имеют небольшие значения общей минерализации, так как основным источником их питания являются осадки, выпадающие из атмосферы. Выпадая на поверхность, они, прежде всего, контактируют с верхним почвенным слоем земной поверхности и только после этого проникают глубже и взаимодействуют с горными породами. В связи с тем, что такое взаимодействие минимально, мы и наблюдаем, что почти все они имеют небольшой разброс значений минерализации и pH и относятся к HCO_3 Ca типу вод.

Анализируя распределение минерализации и значений pH, отмечается незначительное увеличение минерализации от водоразделов к реке. Такое распределение макрокомпонентов прослеживается для водосборных бассейнов рек Абашева, Тутуяс и Ольжерас. Вариации возникают в зимний и летний период отбора проб. В тоже время, отмечается небольшое увеличение их содержаний с уменьшением отметок рельефа. Минерализация и концентрации практически всех макрокомпонентов (HCO_3^-, Na^+, Mg^{2+}, K^+) увеличиваются с востока на северо-запад. Поэтому на территории Тутуясского и Ольжерасского бассейнов установлены наименьшие концентрации, резко отличающиеся от концентраций, установленных на территории Абашевского бассейна. Таким образом, чем более длительное время происходит взаимодействие этих вод с горными породами и более длинный путь они совершают, тем значительнее увеличение в них содержаний макрокомпонентов и значений pH [8].

Что касается подземных вод Тутуясской площади, то по химическому составу это основном HCO_3-Ca, Ca-Na и Na-Ca, относящиеся к зоне активного водообмена. Содержание HCO_3^- изменяется от 39 до 360 мг/л, Ca^{2+} от 5 до 56 мг/л, Na^+ в среднем составляет 49 мг/л. Содержание Cl^- с глубиной увеличивается, но значения его не значительны и составляют чаще всего от 0,5 до 1,2 мг/л, максимально 2,6 мг/л. В целом же с глубиной минерализация подземных вод закономерно увеличивается до 508 мг/л. Одновременно с ростом минерализации растет и значение pH. Подземные воды в основном слабощелочные, реже нейтральные и щелочные. На рассматриваемой площади наиболее характерны средние значения pH от 8,0 до 8,2. Количество Na в составе вод увеличивается с глубиной и в основном с порядка 200 м воды становятся HCO_3 Ca-Naи Na-Ca состава. В связи с этим незначительно, но все-таки меняется тип подземных вод с HCO_3 Ca на HCO_3 Na-Ca и HCO_3 Ca-Na.

Для понимания механизмов формирования состава подземных вод очень важно выявить характер их равновесия с минералами вмещающих пород, т. к. состав вод определяется разностью между растворяемыми горными породами и образующимися вторичными минералами [9]. Для расчета активности химических элементов и построения диаграмм равновесия вод в состав твердой фазы были выбраны минералы, которые наиболее часто встречаются во вмещающих отложениях. Это в основном силикатные и алюмосиликатные (кварц, полевые шпаты, глины и др.), единично карбонатные (кальцит, магнезит, доломит, сидерит), а также сульфатные и хлоридные минералы.

Результаты расчетов удобно представить графически с помощью диаграмм степени насыщения. Если фигуративные точки (квотант) располагаются выше линии насыщения (константы), то воды насыщены относительно этих минералов (рис. 1).

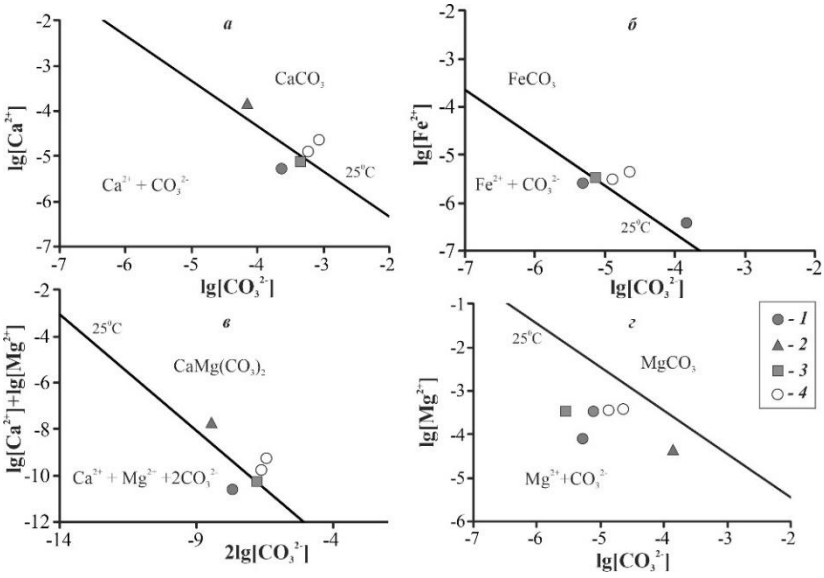


Рис. 1. Равновесия подземных вод с карбонатными минералами с нанесением данных по типу вод. Типы вод по химическому составу: 1 – HCO_3 Ca, 2 – HCO_3 Na, 3 – HCO_3 Ca-Na, 4 – HCO_3 Na-Ca

Анализ диаграмм показал, что пресные подземные воды не насыщены к кальциту, кроме этого, часть точек расположилась близко к границе насыщения или по обе стороны от нее. В целом же более минерализованные воды HCO_3 Na состава (содовые воды), развитые преимущественно в зоне замедленного водообмена, наоборот, насыщены к нему. Из диаграмм видно, что при переходе из одного состояния в другое меняется и химический тип подземных вод. Воды более натриевого состава пересыщены практически все относительно кальцита и сидерита, большая часть относительно доломита и близки к насыщению относительно магнезита.

Формирование на протяжении всего времени карбонатных минералов носит закономерный характер, который определяется такими параметрами гидрогеологической среды, как pH, температура и минерализация подземных вод. Все эти параметры закономерно изменяются с глубиной. При этом важно отметить, что одним из ведущих факторов непрерывного вторичного карбонатообразования является неравновесное состояние вод с первичными алюмосиликатными минералами (рис. 2) [8].

На основе анализа полученных автором данных, воды в системе HCl- H_2O -Al_2O_3- CaO- CO_2- SiO_2 (рис. 2а) достаточно однородны по содержанию кальция и кремнекислоты, поэтому область нанесенных данных в виде точек достаточно ограничена. Такое распределение их объясняется тем, что при не высоких значениях pH (что характерно для вод зоны активного водообмена) растворимость кремнекислоты не высокая, что и способствует их сосредоточению в поле устойчивости каолинита. Если бы опробованные воды имели выраженный содовый состав, то они располагались бы в поле насыщения монтмориллонитом или ближе к нему, так как этот процесс является более затратным при минералообразовании в отношении кремния.

На рисунке 2б приведена диаграмма полей устойчивости минералов в зависимости от активностей в воде ионов магния, кремнекислоты и pH. Все опробованные воды находятся в области устойчивости с каолинитом и не устойчивы по отношению к остальным, так как пресные воды зоны активного водообмена имеют менее высокие активности этих ионов по сравнению, например, с содовыми водами (зона замедленного водообмена).

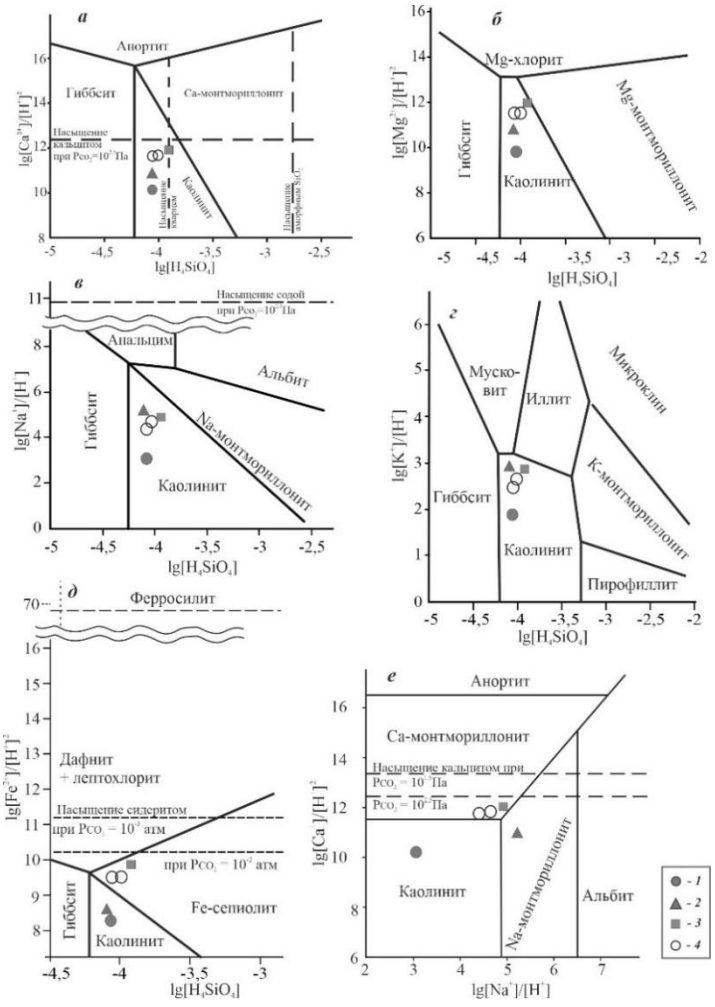


Рис. 2. Равновесия подземных вод с алюмосиликатными минералами. Типы вод по химическому составу: 1 – HCO_3 Ca, 2 – HCO_3 Na, 3 – HCO_3 Ca-Na, 4 – HCO_3 Na-Ca

Диаграммы соотношения полей устойчивости минералов в системе SiO_2-Al_2O_3-Na_2O-CO_2-H_2O, приведены на рисунке 2в. Степень насыщения подземных вод относительно натриевых минералов устанавливается по фазовым равновесиям между альбитом, каолинитом, гиббситом и Na-монтмориллонитом. В этой системе также наблюдается, что все точки располагаются в области равновесия с каолинитом и ни одна точка не попадает в области равновесия с другими минералами (Na-монтмориллонитом, альбитом, гиббситом). Надо отметить, что все точки далеки от насыщения содой (рис. 2в), т.е. воды района будут и дальше эволюционировать в сторону формирования содовых вод, поскольку этому не препятствует ни один геохимический барьер.

Равновесие подземных вод с калиевыми алюмосиликатами в системе SiO_2-Al_2O_3-K_2O-CO_2-H_2O (рис. 2г) свидетельствует о том, что в данных гидрогеохимических условиях воды формируют преимущественно каолинит, формирование же гидрослюд на данном этапе невозможно, так как это характерно для вод хлоридного состава, а это воды, уже относящиеся к зоне весьма замедленного водообмена. Гидрослюда устойчива в более щелочных или в более богатых калием растворах. Образованию К-монтмориллонита здесь препятствует низкая активность кремнекислоты, а относительно гиббсита и первичных алюмосиликатов (мусковита и микроклина) воды сильно недонасыщены.

Диаграмма насыщения относительно вторичных железистых алюмосиликатов (рис. 2д) показывает, что часть вод насыщена относительно Fe-сепиолита, но все они не равновесны с дафнитом и, тем более – ферросилитом, поля которого расположены значительно выше. Таким образом, активно растворяются первичные алюмосиликаты (полевые шпаты, пироксены, роговые обманки), которые не устойчивы в этих условиях и выступают источником Ca, Mg, Na, Fe, K, Si, Al и др.

Результаты взаимодействия подземных вод в системе HCl-H_2O-Al_2O_3-CaO_2-Na_2O-CO_2-SiO_2 при температуре 25^0C представлены на рисунке 2е. На диаграмме

прослеживается практически для всех точек, прямо пропорциональная зависимость содержаний Ca и Na в подземных водах относительно значений pH. Такая зависимость между катионами объясняется законом действия масс, в соответствии с которым воды, содержащие много натрия, уравновешенного анионом HCO_3 (или CO_3^{2-}), не могут содержать много кальция.

Результаты расчетов термодинамического равновесия показали, что воды всего геологического разреза не равновесны с первичными алюмосиликатными минералами. Менее минерализованные подземные воды зоны активного водообмена, в большей степени недонасыщены относительно исходных алюмосиликатных минералов, благодаря низким значениям общей минерализации и pH. Следовательно, в этих условиях данные минералы активно растворяются и переводят в раствор породообразующие элементы: Ca, Mg, Na, Fe, K, Si, Al. Часть элементов, поступивших в раствор, сразу уходит из раствора во вторичные отложения: окислы и гидроокислы Fe, Mn и Al, глины (каолинит и различные монтмориллониты, кроме калиевых), карбонаты (кальцит, доломит, частично сидерит), которые в этих условиях не растворяются, а образуются.

Основной причиной равновесно-неравновесного состояния является то, что взаимодействие воды с первичными алюмосиликатами (с которыми подземные воды не равновесны) формирует вторичные продукты, с которыми в данный момент подземные воды равновесны. Вторая причина равновесно-неравновесного состояния, это обилие в водовмещающих отложениях продуктов разложения органического вещества и постоянное обогащение подземных вод растворенной CO_2, которая нейтрализует высокие значения щелочности среды, образующейся при реакциях гидролиза.

Анализируя полученные результаты гидрогеохимического опробования поверхностных вод, очевидно, что на данной территории складываются благоприятные гидрогеологические условия, которые отражаются в повышении их минерализации от истоков к устью. Подобная картина в распределении носит естественный характер.

Следует отметить, что, кроме этого, одним из основных факторов изменения минерализации, значений pH, а, следовательно, и типа вод является техногенный фактор, характерный для Кузбасса. Влияние этого фактора отмечалось авторами не только в литературе, но и при проведении площадного опробования на ранее изученных сотрудниками ТФ ИНГГ СО РАН площадях (Талдинская, Нарыкско–Осташкинская) [1, 2]. В настоящее время на территории Тутуясской площади не располагаются угледобывающие и перерабатывающие предприятия, а лишь находятся по соседству, поэтому и их воздействие на данный момент минимально или отсутствует.

Исследование выполнено при поддержке Программы фундаментальных научных исследований Российской академии наук (ФНИ РАН) № 0266-2022-0016.

Список литературы

1. Домрочева Е.В., Лепокурова О.Е., Сизиков Д.А. Геохимическая характеристика подземных вод Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2014. Т. 25. № 1. С. 94–101.

2. С.Л. Шварцев В.Т. Хрюкин, Е.В. Домрочева К.И. Кузеванов, Т.С. Попова, О.Е. Петрова, Е.В. Швачко Гидрогеология Ерунаковского района Кузбасса в связи с проблемой добычи угольного метана // Геология и геофизика. 2006. Вып. 47. № 7. С. 878–889.

3. Букаты М.Б. Рекламно-техническое описание программного комплекса HydroGeo. Номер гос. регистрации алгоритмов и программ во Всероссийском научно-техническом информационном центре (ВНТИЦ) № 50200500605. М.: ВНТИЦ, 2005. 7 с.

4. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. / М.: Изд-во ЦентрЛифтНефтеГаз, 2012. 672 с.

5. Гаррельс Р.М. Растворы, минералы, равновесия. М.: Изд-во Мир, 1968. 368 с.

6. Helgeson H.C. Kinetics of mass among silicates and aqueous solutions // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1971. № 5. pp. 421–469.

7. Anderson G.M. Thermodynamics of natural systems. New York: Cambridge University Press, 2017. 428 p.
8. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.
9. Шварцев С.Л., Домрочева Е.В., Рассказов Н.М. Геохимия и формирование содовых вод Кузбасса // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318. № 1. С. 128–134.
10. Гидрогеология СССР. Т. XVII. Кемеровская область и Алтайский край. М.: Недра, 1972. 399 с.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛЯНО-КИСЛОТНЫХ ОБРАБОТОК ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРОД С ЦЕЛЬЮ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЗАКАЧКИ ДРЕНАЖНЫХ ВОД

Ильин А.В.[1], Лагунов И.К.[1]
[1] АК «АЛРОСА» (ПАО) Вилюйская ГРЭ, Новосибирск, IlinAV@alrosa.ru
[1] АК «АЛРОСА» (ПАО) Вилюйская ГРЭ, Новосибирск, LagunovIK@alrosa.ru

Аннотация. Представлен положительный опыт использования соляно-кислотных обработок в карбонатных породах кембрийских отложений с целью увеличения приемистости скважин на участках закачки дренажных и шахтных вод. Работы проводились в условиях распространения многолетнемерзлых пород на объектах АК «АЛРОСА» (ПАО).
Ключевые слова: *соляно-кислотная обработка, приемистость скважин, многолетнемерзлые породы, минерализованные воды.*

Abstract.
Positive experience of using hydrochloric acid treatments in carbonate rocks of Cambrian deposits is presented in order to increase the injectivity of wells in areas of injection of drainage and mine waters. The work was carried out in conditions of the spread of permafrost at the facilities of PJSC ALROSA (PJSC).
Key words: *hydrochloric acid treatment, well injectivity, permafrost, mineralized waters.*

Введение

Соляно-кислотные обработки (СКО) активно применяются в нефтяной и газовой промышленности в основном для очистки забойной и призабойной зон эксплуатационных скважин от парафинисто-смолистых отложений, а также для повышения нефтеотдачи путем увеличения проницаемости эксплуатируемого горизонта за счет растворения карбонатных пород (увеличение каверн, трещин, пор).

Специалисты Компании «АЛРОСА» используют полученный опыт и применяют методику соляно-кислотной обработки с целью восстановления и увеличения первоначальной приемистости в эксплуатационных скважинах на действующих участках закачки шахтных и дренажных вод.

Характеристика района работ

Представленные материалы территориально относятся к северной части западной Якутии в Мирнинском районе. Отработка месторождений Компанией, как открытым, так и подземным способами, осложнена притоком в горные выработки природных высококонцентрированных хлоридных вод. Для исключения экологических рисков применяется метод отведения подземных рассолов в массив многолетнемерзлых пород (ММП), в результате чего формируется техногенный горизонт. Природные межмерзлотные коллекторы представляют собой криогенные геологические структуры с определенной, в основном, тектонической нарушенностью и пластово-поровой и карстовой пустотностью ММП. Закачка осуществляется в карбонатные структуры верхнекембрийских отложений – мархинская свита.

ММП расположены выше верхнекембрийского водоносного комплекса. Их разделяет толща морозных безльдистых пород, мощностью 10-50 м. ММП представлены карбонатно-глинистыми отложениями моркокинской, реже мархинской свит. Мощность многолетнемерзлых пород изменяется от 90-180 м (в долинах рек) до 600-650 м (на трапповом плато). Мощность водовмещающих коллекторов не превышает 2–6 м.

ММП являются кровлей верхнекембрийского водоносного комплекса (ВВК), залегающие на глубинах с абсолютными отметками +100 м до +180 м, а подошва ВВК проходит по карбонатно-глинистым породам первой пачки мархинской свиты (от –175 до –240 м абс.). Мощность комплекса водовмещающих пород составляет в среднем 370 м, суммарная эффективная мощность пластов-коллекторов достигает 52,0 м, что составляет около 10-15% мощности свиты и характеризуются значениями притоков от 0,01 до 0,03 л/с, с пластовыми давлениями 1,5–3,2 МПа, которые увеличиваются от кровли водоносного комплекса к подошве. Водонасыщенные породы имеют мощность пластов от 0,2 до 2,2 м. Характерной отличительной особенностью первых двух водоносных горизонтов ВВК является их малая водообильность и весьма низкие фильтрационные параметры: водопроводимость изменяется от 0,0003 до 0,03 $м^2$/сут., проницаемость 0,01-1,5 мД, а открытая пористость пород в среднем не превышает 7-14%.

Подземные воды верхнекембрийского комплекса обладают незначительными напорами над кровлей (20-54 м), а естественный пьезометрический уровень устанавливается на глубинах от +169,0 до +207,5 м абс.

Подземные воды комплекса представлены преимущественно хлоридными рассолами смешанного катионного состава с минерализацией от 22 до 272 г/л, которая нарастает с глубиной.

В стратиграфическом плане участки представлены отложениями онхойюряхской, моркокинской и мархинской свитами, сложенными в основном известняками, доломитами и мергелями [1].

Причины, способы и результаты применения СКО

Подведение шахтных и дренажных вод к участкам работ, в основном, осуществляется по технологическому водоводу. Исследования проб рассола, методом рентгенофазового анализа, взятого непосредственно из поверхностного магистрального (технологического) водовода, показали наличие в составе рассола механических полидисперсных примесей. Определение дисперсного состава механических примесей показало полидисперсность содержащейся в рассоле твёрдой фазы. Наличие взвесей, в процессе эксплуатации участков закачки приводит к кольматации трещинно-кавернозных коллекторов, что негативно отражается на приемистости скважин.

В основном взвешенные частицы представлены карбонатами (Табл. 1).

Таблица 1. Вещественный состав взвесей

Минерал	**Состав взвесей, %**	**Растворение в HCl**
Доломит	58%	+
Кварц	24%	-
Кальцит	9%	+
Слюда	4%	-
Полевые шпаты	3%	-
Серпентин	2%	+

Химический анализ показал, что нерастворимые в воде механические примеси на 70% растворяются в соляной кислоте.

В гранулометрическом отношении состав взвесей в фракционном отношении выглядит следующим образом: >1,2 мм – 1%; 1,2-0,16 мм – 13%; 0,07-0,025 мм – 82% и < 0,025 мм – 4%.

Основываясь на полученных результатах и учитывая, что структура под закачку представлена карбонатными отложениями были выполнены опытные работы по увеличению приемистости с применением СКО призабойной зоны эксплуатационных (закачных) скважин.

Перед СКО скважина прорабатывается до забоя и прокачивается для удаления продуктов разрушения в процессе проработки ствола скважины. Из технической 33-35% соляной кислоты (HCl) готовится соляно-кислотный раствор 13-15% концентрации. Затем через буровой снаряд (конец которого располагается в нижней части предполагаемого коллектора) подается соляно-кислотный раствор в объеме, необходимом для заполнения исследуемого интервала. После чего снаряд поднимается до 150 м (в обсадную колонну) и соляно-кислотный раствор продавливается водой (раствором) в объеме 2-3 м3. Далее снаряд полностью поднимается из скважины и сверху в скважину ещё подается вода (раствор) в таком же объёме. Нагнетание кислоты в пласт осуществляется с максимально возможными скоростями, чтобы кислота проникала на большие расстояния от ствола скважины. После продавливания кислотного раствора скважину оставляют на 12 часов в состоянии покоя для полной реакции кислоты с породой. По завершению СКО выполняется прокачка штанговым насосом перед экспресс наливом для фиксации полученного результата (табл. 2, рис. 2).

Таблица 2. Дебиты при наливах в закачные скважины на участке

№ п/п		№ скважин								Всего	Примечание
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**		
1	Q, м^3/ч	6,5	14,05	8,3	6,8	0,9	3,4	6,4	2,15	48,5	Без СКО. До запуска участка. 2021 г.
2	Q, м^3/ч	12,0	14,0	6,5	1,5	1,0	4,5	6,0	1,6	45,6	СКО (1 этап). 2022 г.
3	Q, м^3/ч	37,0	29,0	17,0	2,0	2,0	12,0	20,0	11,0	130	СКО (2 этап). 2023 г.

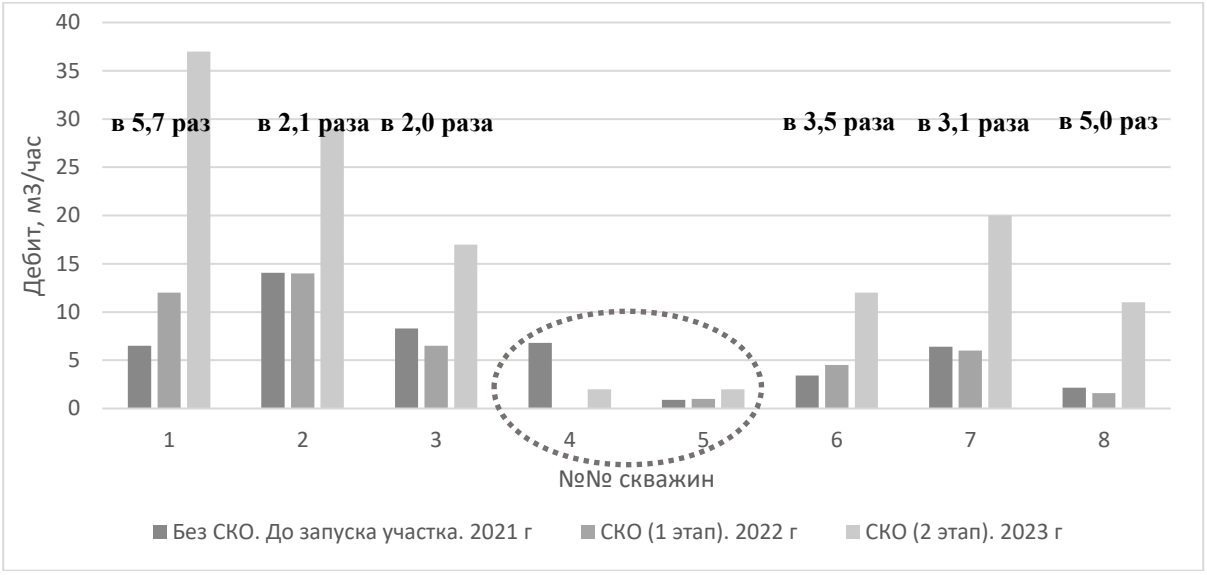


Рис. 2. Динамика изменения дебита по закачным скважинам

Выводы

В результате выполненных работ по соляно-кислотной обработке эксплуатационных скважин было достигнуто увеличение производительности до 5 раз

(с 6,5 м^3/час до 37 м^3/час) по отдельным скважинам участка. Опытным путем была подтверждена эффективность метода по увеличению приемистости в условиях распространения многолетнемерзлых пород и рассолов. Полученный положительный опыт позволяет применять СКО на аналогичные объекты Компании.

Учитывая наличие взвешенных частиц, содержащихся в природных минерализованных водах, следует на постоянной основе прибегать к обработке призабойной зоны соляно-кислотными растворами, до выработки альтернативных вариантов.

Список литературы

1. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. – Иркутск, Изд-во ИГТУ, 2008.

ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ИРЕНСКОГО КАРСТОВОГО РАЙОНА ПРЕДУРАЛЬЯ

Килин Ю.А., Минькевич И.И.
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, ул. Букирева, 15, iks-org@mail.ru

Аннотация. Исследуемая территория приурочена к Иренскому карстовому району преимущественно гипсового и карбонатно-гипсового карста. Территория Иренского карстового района сложена сульфатно-карбонатными и терригенными породами палеозоя. На западе иренский горизонт погружается под соликамские отложения. Иренский горизонт согласно залегает на филипповских доломитах. С поверхности палеозойские отложения перекрыты чехлом четвертичных и неоген-четвертичных образований. Нижнепермские отложения представлены кунгурским ярусом (P_1kg), который состоит из филипповского и иренского горизонтов и уфимским ярусом (P_1u), включающим соликамский горизонт. Исследованиями по карстовым водам Иренского района сотрудниками кафедры динамической геологии и гидрогеологии Пермского университета занимаются с пятидесятых годов прошлого столетия. В данной работе использованы материалы экспедиций за последние пять лет.

Ключевые слова: *Иренский карстовый район, гипсоангидриты, карбонаты, химический состав подземных вод, сульфатредукция.*

Abstract. The study area is confined to the Irene karst region of predominantly gypsum and carbonate-gypsum karst. The territory of the Irensky karst region is composed of sulfate-carbonate and terrigenous rocks of the Paleozoic. In the west, the Irenian horizon plunges under the Solikamsk deposits. The Iren horizon lies conformably on the Filippov dolomites. From the surface, Paleozoic deposits are covered by a cover of Quaternary and Neogene-Quaternary formations. The Lower Permian deposits are represented by the Kungurian stage (P_1kg), which consists of the Filippovsky and Irensky horizons, and the Ufa stage (P_1u), which includes the Solikamsky horizon. Employees of the Department of Dynamic Geology and Hydrogeology of Perm University have been conducting research on the karst waters of the Irensky district since the fifties of the last century. This work uses materials from expeditions over the past five years.

Key words: *Irensky karst region, gypsum anhydrite, carbonates, chemical composition of groundwater, sulfate reduction.*

Целью работы является исследование формирования подземных вод и их химического состава в сульфатных гипсоангидритовых толщах. Задачами исследования явилось выявление особенностей литолого-геологического строения и типов гидрогеологических разрезов. Химический состав подземных вод определяется: литологией – наличием в гипсоангидритах пачек карбонатных пород; структурно-морфологическими условиями – положением кровли карстующихся пород относительно современных и древних эрозионных врезов; мощностью и составом покровных

отложений; тектонической активностью и характером трещиноватости; геологической историей данного района.

В сульфатно-карбонатных отложениях кунгурского яруса нижней перми (P_1kg) формируются ненапорные трещинно-карстовые или жильные карстовые воды. В западной части, в гипсоангидритовой толще, которая погружается в перекрывающие уфимские отложения, формируются трещинно-карстовые напорные воды.

На исследуемой территории выделяются: водоносный локально-слабоводоносный четвертичный аллювиальный горизонт (alQ). Горизонт включает аллювиальные четвертичные отложения, которые распространены на исследуемой территории по долине реки Ирень. Аллювиальный горизонт относится к грунтовому типу и характеризуется отсутствием напора. Напор наблюдается только на тех участках, где водоносные пески или галечники перекрыты глинами и суглинками. Величина напора на таких участках составляет 1,0-5,0 м. По химическому составу вода сульфатная кальциевая с минерализацией 2,1 г/л. Повышенная минерализация и сульфатный состав подземных вод связан с разгрузкой в аллювиальный горизонт сульфатных вод иренской карбонатно-сульфатной серии (рис. 1). Основным источником питания горизонта являются атмосферные осадки, поверхностные воды и воды коренных отложений.

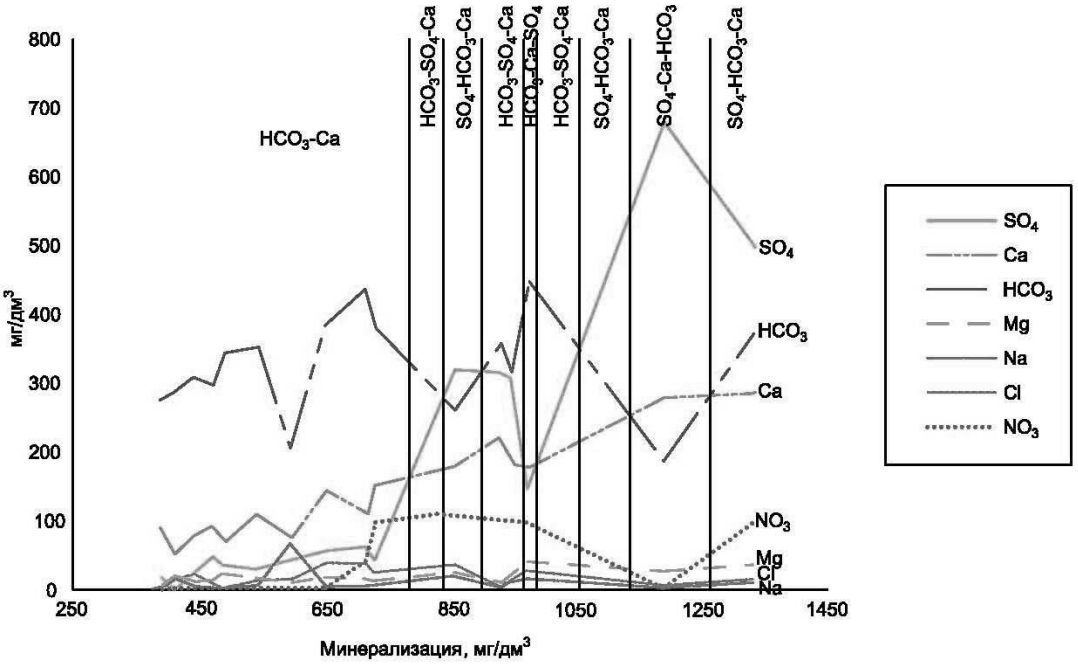


Рис. 1. График изменения гидрохимической фации подземных вод в аллювиальных четвертичных отложениях в зависимости от минерализации

Водоносная соликамская терригенно-карбонатная свита (P_1sl). Соликамская терригенно-карбонатная свита является водообильной. Распространена по левобережью р. Ирень. Она характеризуется высокодебитными родниками и скважинами. Дебиты родников изменяются от 0,01 до 328 л/с. Преобладающее количество родников (55 %) имеют дебиты в пределах 1,0–15,5 л/с. На водообильность пород большое влияние оказывают структурно-тектонические и геоморфологические условия, в частности, удалённость от основных дрен в сторону водоразделов. Подземные воды верхней части свиты $HCO_3 - Mg - Cl.$ Реже $HCO_3 - Ca - Mg$ и $Cl - HCO_3 - Mg - Ca$ с минерализацией до 0,54 г/дм^3. Ниже эрозионного вреза до глубины 50-100 м (редко более) преобладают пресные HCO_3воды $Mg - Ca$, $Ca - Na$, Na с минерализацией до 0,5 г/дм^3. Основным источником питания подземных вод свиты служат атмосферные осадки. Водоупорными отложениями являются аргиллиты, глинистые алевролиты. Мощность

водоносных прослоев и линз, по данным расходометрии скважин, не превышает 1–2 м. Наибольшая их частота отмечается до глубины 60–80 м. Ниже, в связи с затуханием экзогенной трещиноватости, частота водопритоков резко уменьшается. Дебиты родников варьируют от 0,01 до 28,8 л/с, дебиты скважин - 0,015 – 10-15 л/с. Трещинно-грунтовые воды обычно безнапорные, реже обладают местным напором, обусловленным литолого-фациальной неоднородностью пород. Глубина залегания трещинно-грунтовых вод зависит от расчлененности рельефа и колеблется от 0 до 65 м.В западном направлении она погружается под шешминский терригенный комплекс, а восточнее, на правобережье, свита становится водопроницаемой локально-водоносной. Последнее связано с ее незначительной мощностью, изрезанностью логами и суходолами, а также нарушенностью карстовыми процессами в нижележащей лунежской пачке.

Водопроницаемая локально-водоносная иренская карбонатно-сульфатная серия (P_1ir) распространена на поверхности полосой меридионального простирания к востоку от водоносной иренской серии. Водоносная иренская серия имеет площадное распространение на правобережье в виде узкой полосы по левому берегу р. Ирень. Иренская толща находится здесь в зоне вклинивания и имеет незначительную мощность. Она сильно закарстована и участками полностью сдренирована подстилающей нижнепермской карбонатной серией. На обводненных участках карстовые и трещинно-карстовые воды связаны с гипсами и доломитами нижних пачек иренского горизонта. По водообильности рассматриваемая водоносная серия и, как и вышеописанная, неоднородна. Дебит родников от десятых долей до десятков литров в секунду. По химическому составу подземные воды сульфатные кальциевые с минерализацией 1–3 г/дм^3, редко гидрокарбонатные с минерализацией менее 1 г/дм^3. Последнее наблюдается на участках, где подземные воды связаны с карбонатными пачками [Бобров, 1965]. Питание свиты осуществляется за счет атмосферных осадков. Движение подземных вод вертикальное нисходящее в нижележащие гидрогеологические подразделения, дренирующие свиту, и латеральное - к местным дренам.

Благодаря высокой скорости насыщения сульфатом кальция, растворяющая способность подземных вод утрачивается на малой глубине. Гидрохимическое изучение родниковых вод, выходящих на склонах речных долин в бассейне р. Ирени, показало, что они до предела насыщены сульфатом кальция. Поэтому, несмотря на большую плотность карстовых воронок, интенсивность поглощения талых вод здесь ограничена сравнительно малой емкостью подземных полостей выше поверхностного эрозионного вреза [2].

Химический состав подземных вод иренского горизонта характеризуется однообразием – воды $SO_4 - HCO_3 - Ca$ состава, что обусловлено влиянием литологии водовмещающих пород. Минерализация вод от 1,5 до 3,5 г/дм^3. Так же данные воды характеризуются высокими показателями общей жесткости 21–42°.

Рассмотрим зависимость концентрации кальция, магния, натрия от концентрации сульфат–ионов. При низкой минерализации рост сульфатов происходит одновременно с увеличением концентрации ионов кальция. Формирующиеся при этом воды имеют типичный состав вод, образующихся при растворении гипса. Минерализация достигает 1,5 мг/дм^3, в анионном составе преобладает сульфат-ион, а в катионном - кальций резко преобладает над магнием и натрием (рис. 2). Дальнейший рост концентраций сульфат–иона происходит на фоне снижающихся концентраций ионов кальция и возрастающих ионов натрия. Воды этой группы имеют минерализацию свыше 1,5 г/дм^3. В их химическом составе из анионов также преобладает сульфат-ион, а в катионном составе кальций и магний резко преобладают над натрием. При больших глубинах эти воды сменяются сульфатно–хлоридными. В формировании химического состава этого типа вод, наряду с растворением гипса, важную роль играет процесс ионного обмена.

Сульфат-ион является промежуточным компонентом до минерализации 3–4 г/дм^3. Его содержание в водах увеличивается, затем резко уменьшается. В крепких рассолах он

практически отсутствует, что связано с содержанием Ca, с которым сульфат-ион образует слаборастворимую соль $CaSO_4$ (ангидрит). В анаэробных условиях без доступа кислорода SO_4 частично восстанавливается до сероводорода. Этому могут способствовать сульфатредуцирующие бактерии [1]. Рекция присходит с образованием самородной серы по следующей схеме:

$$SO_3^{-2} + C_nH_{2n+2} + \text{Сульфатредуцирующие бактерии} \rightarrow H_2S + CO_2 + H_2O$$

На участках месторождений нефти в данном районе наблюдается нефтяное загрязнение и происходит непосредственно реакция между сульфатами в растворенном виде и углеводородами при участии сульфатредукцирующих бактерий. При участии тионовых бактерий и кислорода образуется самородная сера.

$$H_2S + O_2 + \text{тиобактерии} \rightarrow H_2 + S\downarrow$$

В этом процессе сера меняет свою валентоность дважды: $S^{+6} \rightarrow S^{-2}$; $S^{-2} \rightarrow S^0$

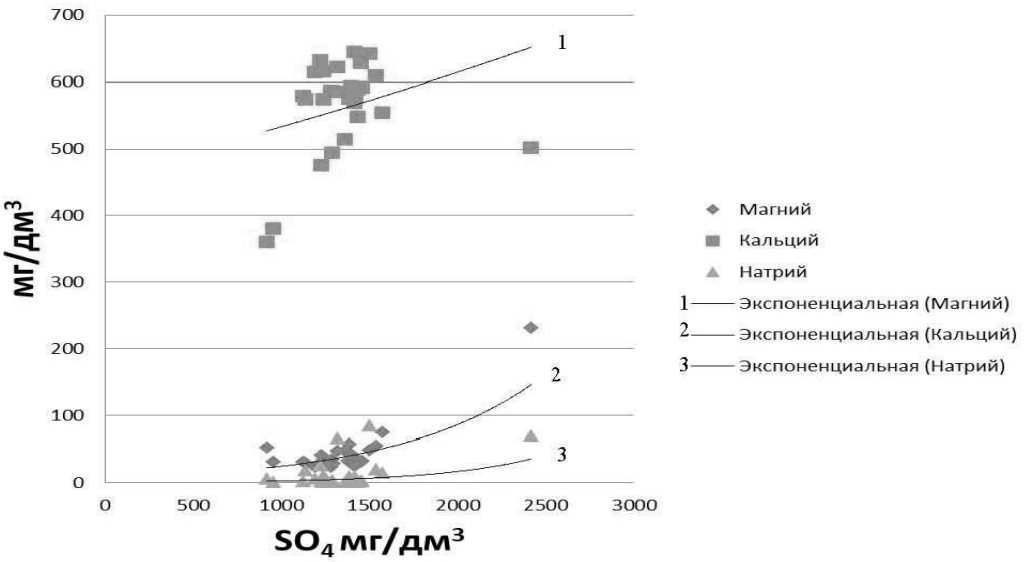


Рис. 2. Зависимость концентрации кальция, магния и натрия от концентрации сульфат-иона

Примером данного явления служит сероводородный источник у д. Самарово. Пластовый выход на правом берегу р. Ирень наблюдается в виде 3-х источников на участке шириной 10 м, в 0,5 м от уреза реки. Минерализация вод данного родника 3,5 г/дм3, содержание сульфат иона составляет 2419 мг/дм3, гидрокарбонат-иона – 197,4 мг/дм3, магния 232 мг/дм3, натрия 70 мг/дм3, кальция 502 мг/дм3. У источника наблюдается сильный сероводородный запах и светлый налет серы на обломочных породах.

Выводы

Исследования подземных вод Иренского карстового района осуществилось экспедицией кафедры динамической геологии и гидрогеологии ПГНИУ во время учебных гидрогеологических практик.

По результатам проведенных работ выявлено:

1. Исследуемый район является территорией активного сульфатно-карбонатного карста. Карстующимися породами являются гипсы, ангидриты, известняки иренской свиты нижней перми мощностью от 120 до 180 м.

2. В сульфатно-карбонатных отложениях кунгурского яруса нижней перми **(P_1kg)** формируются ненапорные трещинно-карстовые или жильные карстовые воды.

3. Химический состав подземных вод зависит от наличия хорошо растворимых сульфатов (гипсов, ангидритов). Воды по составу сульфатно-кальциевые с минерализацией от 2,1 до 4 г/дм^3.

4. Водопроницаемая локально-водоносная иренская карбонатно-сульфатная серия (P_1ir) распространена на поверхности полосой меридионального простирания к востоку от водоносной иренской серии. Иренская толща находится здесь в зоне выклинивания и имеет незначительную мощность. Она сильно закарстована и участками полностью сдренирована.

5. Сульфат-ион является промежуточным компонентом до минерализации 3-4 г/дм^3. Его содержание в водах увеличивается, затем резко уменьшается. В анаэробных условиях без доступа кислорода SO_4 частично восстанавливается до сероводорода. Этому могут способствовать сульфатредуцирующие бактерии.

6. На участках месторождений нефти в данном районе присходит поступление нефяного загрязнения и происхдит непосредственно реакция между сульфатами в растворенном виде и углеводородами при участии сульфатредукцирующих бактерий с образованием серы.

Список литературы

1. Максимович Г.А., Минькевич И.И. Самородная сера карстовых полостей. Гидрогеология и карстоведени. Вып.7 /Перм. гос.ун-т,.-Пермь-1975. С.29-46.

2. Минькевич И.И., Килин Ю.А. Экологическая гидрогеология и гидрогеохимия: учеб. пособие / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017.– 232 с.

ОЦЕНКА РИСКОВ ПРИ УПОТРЕБЛЕНИИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ВОД ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

Колубаева Ю.В.[1], Иванова И.С.[1,2], Мухортина Н.А.[1]

[1]Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, kolubaeva@inbox.ru

[2]Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

Аннотация. В работе приведены результаты исследований химического состава природных вод (подземных, речных, озерных) Ямало-Ненецкого автономного округа. Специфической особенностью вод данной территории является наличие в них в высоких концентрациях железа, являющегося приоритетным загрязнителем питьевой воды, подаваемой населению. Данные по содержанию в водах железа использовались для оценки неканцерогенного риска для детской (до 6 лет) и взрослой возрастных групп, при этом рассматривался только пероральный путь поступления химических веществ в организм с питьевой водой. Результаты расчетов показали, что при употреблении железосодержащих вод территории исследований в питьевых целях существует риск возникновения заболеваний неинфекционного характера.

Ключевые слова: *природные воды, химический состав, общее железо, здоровье населения, неканцерогенный риск.*

Abstract. In the article are presented the results of studies of the chemical composition of natural waters (ground, river, lake) of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. The specific feature of waters of this territory is the presence of iron in high concentrations, which is the main pollutant of drinking water. Data on iron concentrations in water were used to assess the non-carcinogenic risk for children (under 6 years of age) and adult groups, considering only the oral route of chemical ingestion with drinking water. The results of the calculations showed that there is a risk of non-communicable diseases when drinking iron-containing waters for drinking purpose.

Key words: *natural waters, chemical composition, total iron, population health, non-carcinogenic risk.*

Как известно, одним из факторов, определяющих здоровье людей, является качество вод, употребляемых населением в питьевых целях. Проблема «чистой воды» не теряет своей актуальности и в настоящее время, связано это, главным образом, с увеличивающейся с каждым годом антропогенной нагрузкой в особенности в условиях арктических территорий Западной Сибири, где ведется активная добыча углеводородного сырья. На территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) около 20% населения использует для хозяйственно-питьевых нужд воду, не отвечающую санитарным нормам. При этом по данным экспертов ВОЗ 80 % заболеваний населения прямо или косвенно связаны с особенностями водного фактора территории, на которой оно проживает. Активная добыча углеводородов, заболоченность, климатические изменения, наличие многолетнемерзлых пород (осложняющих доступ к питьевым пресным подземным водам) – все это, несомненно, оказывает влияние на химический состав природных вод данной зоны. Следует также отметить, что коренное население Арктики ведет кочевой образ жизни и употребляет «сырую» воду (без какой-либо водоподготовки) непосредственно из рек и водоёмов [1]. Таким образом, наряду со всем вышесказанным, а также специфической особенность химического состава вод исследуемого региона, выражающуюся в повышенных концентрациях в них железа, изучение химического состава вод территории исследований и проверка данных на соответствие нормативам качества с последующей оценкой риска для здоровья местного населения приобретают особую актуальность.

В основу данной работы положены материалы гидрогеохимических исследований, проводимых в 2020-2022 гг. сотрудниками ТФ ИНГГ СО РАН на территории ЯНАО. В результате проведенных экспедиционных работ из водозаборных скважин глубиной от 5 до 244 м было отобрано 25 проб подземных вод, в качестве возможных источников питьевых вод дополнительно были отобраны пробы из 13 рек и 6 крупных озер, а также 5 проб воды из водопроводной сети (рис.).

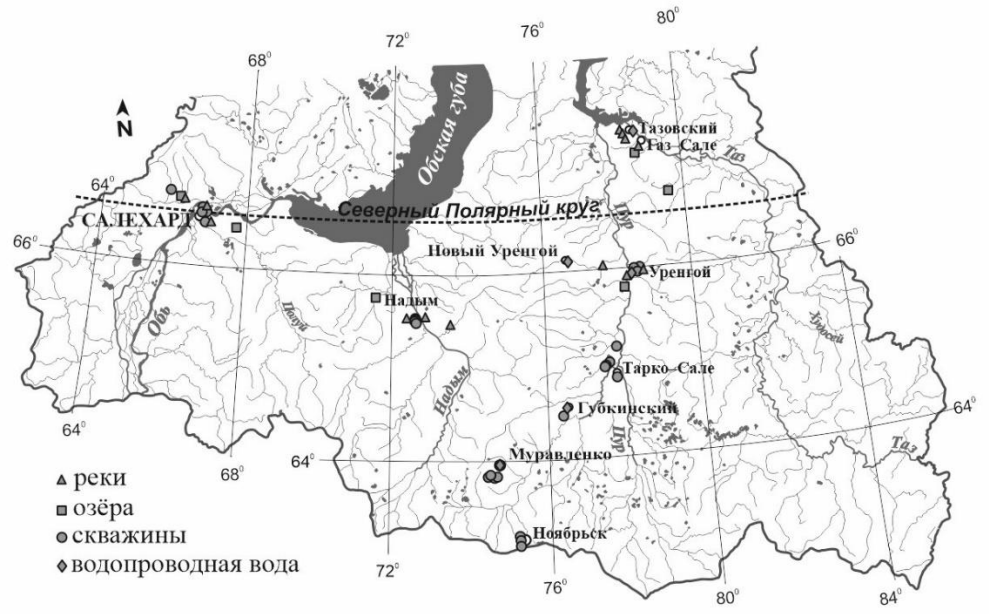


Рис. Схема отбора проб природных вод на территории ЯНАО

В каждой точке опробования проводились измерения быстроменяющихся физико-химических показателей: температуры, pH, электропроводности, окислительно-восстановительного потенциала (HI98194, HANNA Instruments). В лаборатории физико-химических исследований керна и пластовых флюидов ТФ ИНГГ СО РАН методом капиллярного электрофореза с использованием прибора «Капель-205» (Люмэкс, Россия)

были определены содержания следующих компонентов: SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, NH_4^+, NO_3^-, PO_4^{3-}; концентрации HCO_3^- определены методом титрования. Концентрации Fe общего и Mn определены методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7500 (Agilent Technologies, США); содержание растворенного органического углерода (Сорг) определено методом высокотемпературного каталитического окисления (TOC-6000, Shimadzu, Япония) (GET, г. Тулуза, Франция). Наименование химического типа воды дано с учётом содержания макрокомпонентов более 25 мг-экв% в порядке убывания их концентрации. При оценке содержания в воде железа и других компонентов использовали гигиенические нормативы, утвержденные СанПиН 1.2.3685-21 [2]. Оценку риска для здоровья от употребления воды с высоким содержанием железа (воздействующего по неканцерогенному типу) проводили на основе расчёта коэффициента опасности (HQ) по методике, разработанной Американским агентством по охране окружающей среды [3], и согласно [4] по формуле:

$$HQ = I/RfD,$$

где I – средняя суточная доза при пероральном поступлении химического вещества с питьевой водой, мг/(кг • день); RfD – референтная (безопасная) доза при хроническом пероральном поступлении химического вещества с питьевой водой, мг/(кг • день). Характеристика неканцерогенного риска проводится по результатам расчётов HQ в соответствии с принятой в [5] классификацией уровней риска.

Результаты основных физико-химических показателей опробованных вод представлены в таблице. Поверхностные воды являются ультрапресными с минерализацией от 10 до 140 мг/л. Значения pH варьируют в широком диапазоне от 4,9 до 7,9, но преимущественно характерна нейтральная и слабокислая среда. В анионном составе преобладает гидрокарбонат ион, в катионном, главным образом, кальций и магний. Озерные воды характеризуются минимальными значениями минерализации (от 10 до 28 мг/л) и pH (4,9–6,1), при этом в них отмечены максимальными концентрации органических веществ (Сорг от 8,7 до 44,2 мг/л). Кроме того, в озерных водах отмечены высокие концентрации иона аммония, содержания которого характеризуются сильной положительной корреляцией со значениями Сорг. Воды рек по сравнению с озерными водами более минерализованные (до140 мг/л), с более высоким показателем pH: воды ручьев и малых рек являются слабокислыми (5,5–6,0), воды крупных рек – слабощелочными (до 7,9), концентрации Сорг снижаются и изменяются в пределах от 1,3 до 21,3 мг/л.

Опробованные подземные воды приурочены к двум водоносным комплексам (ВК): четвертичному и эоцен-олигоценовому, которые являются основными источниками водоснабжения на территории исследований. Четвертичный ВК, имеющий повсеместное распространение на территории ЯНАО, в качестве источника водоснабжения используется в основном в г. Салехарде. Среднее значение величины pH вод составляет 6,2, варьируя в пределах от 5,5 до 7,9. Воды являются ультрапресными с минерализацией от 28 до 287 мг/л, низкие содержания солеобразующих элементов Ca^{2+} и Mg^{2+} характеризуют воды как очень мягкие. Эоцен-олигоценовый ВК пользуется широким распространением в центральной части ЯНАО и является основным источником водоснабжения в гг. Ноябрьск, Муравленко, Тарко-Сале, и пос. Уренгой (рис.). Воды данного ВК являются нейтральными, ультрапресными с минерализацией от 41 до 357 мг/л, очень мягкими. По химическому типу воды эоцен-олигоценового ВК так же, как и воды четвертичного ВК, как правило, являются гидрокарбонатными кальциево-магниевыми. При сравнении с озерными и речными водами исследуемой территории, подземные воды характеризуются минимальными содержаниями растворенных органических веществ, максимальные концентрации которых достигают 12,7 мг/л (по Сорг) в неглубоко залегающих водах четвертичного ВК, ниже с глубиной концентрации Сорг снижаются.

Таблица. Основные физико-химические показатели состава природных вод

Компонент, ед. изм.	Поверхностные воды		Подземные воды		ВВ	ПДК [2]
	Озерные	Речные	Четвертичный ВК	Эоцен-олигоценовый ВК		
pH	4,9–6,1 (5,7)	5,5–7,9 (6,8)	5,5–7,9 (6,2)	5,6–7,4 (6,8)	6,1–7,0	6-9
Минерали-зация, мг/л	10–28 (17)	14–140 (55)	28–287 (115)	41–357 (131)	47–245	1000
$C_{орг}$, мг/л	8,7–44,2 (20,8)	1,3–21,3 (10)	0,4–12,7 (2,1)	0,6–9,5 (4,1)	–	5
HCO_3^-, мг/л	4,3–22 (11)	4,8–88 (36)	17,7–210 (72)	26,8–204 (94)	14,0 – 75,0	
SO_4^{2-}, мг/л	1,0–2,1 (1,8)	0,9–10,8 (3,8)	< 0,5–25,7 (8,3)	< 0,5–4,2 (1,3)	0,9-3,0	500
Cl^-, мг/л	0,1–0,6 (0,3)	0,1–15 (2,7)	< 0,5–18,0 (2,7)	< 0,5–86,7 (1,3)	< 0,5–85,6	350
Ca^{2+}, мг/л	0,4–3,0 (1,3)	1,3–15,2 (6,3)	2,6–30,7 (14,1)	1,8–32,9 (11,3)	3,9–12,3	
Mg^{2+}, мг/л	0,1–1,3 (0,6)	0,9–6,2 (2,4)	0,6–26,5 (4,2)	1,2–16,1 (4,9)	1,6–3,5	50
Na^+, мг/л	0,3–2,1 (0,8)	0,3–16,6 (3,5)	1,2–13,4 (2,6)	2,1–83,8 (4,7)	3,1–71,0	200
K^+, мг/л	< 0,5–2,0 (0,4)	< 0,5–1,8 (0,5)	0,5–4,0 (0,7)	< 0,5–3,0 (1,5)	0,5–2,1	
NH_4^+, мг/л	< 0,5–2,1 (0,7)	< 0,5–1,5 (0,4)	< 0,5–1,7 (0,8)	< 0,5–4,6 (0,8)	< 0,5	1,5
NO_3^-, мг/л	< 0,2–1,7 (0,87)	< 0,2–0,7 (0,2)	0,34–24,1 (1,1)	< 0,2–0,5 (0,25)	< 0,2–1,0	45
PO_4^{3-}, мг/л	< 0,25	< 0,2–0,9 (0,2)	< 0,25–2,8 (–)	< 0,25–4,4 (0,7)	< 0,25	3,5
Fe общ, мг/л	0,2–1,4 (0,6)	0–1,8 (0,8)	0,01–14,8 (2,4)	1,4–9,1 (3,6)	0,01 – 0,09	0,3
Mn, мкг/л	0–90,1 (18)	0–59,9 (14)	1,1–1394,7 (454)	154,7–918,7 (364)	5,8–172,5	100

Примечание: 4,9–6,1 (5,7) – минимум–максимум (среднее); ВК – водоносный комплекс; ВВ – водопроводная вода; ПДК – предельно-допустимая концентрация компонента.

В целом же анализ результатов химического состава природных вод на несоответствие гигиеническим нормативам показал, что по элементам макрокомпонентного состава, а также по обобщенным показателям качества вод, как правило, превышений относительно ПДК не обнаружено. Лишь в единичных случаях встречаются незначительные превышения по NH_4^+ и PO_4^{3-}. Стоит отметить, что высокие концентрации органического углерода характерны не только для поверхностных вод (озер и малых рек), источниками которого, в основном, является торф и нефтяные углеводороды, но и в некоторых пробах подземных вод его содержание превышает норматив (5 мг/л) в несколько раз, что может свидетельствовать о наличии гидравлической связи как с поверхностными водами, так и с нижележащими пластовыми водами.

Среди элементов микрокомпонентного состава в поверхностных водах наблюдается повсеместное превышение относительно установленных нормативов [2] для Fe общ (табл.), в подземных водах – для железа и марганца, причем максимальные

концентрации характерны для неглубоких (5 м) вод, отобранных вблизи г. Надыма, относящихся к четвертичному ВК, что, вероятнее всего, обусловлено наличием торфов, проницаемых песчаных отложений, и заболоченных территорий, способствующих обогащению вод растворенным органическим веществом и накоплению данных элементов.

Что касается вод, отобранных из водопроводной распределительной сети, то анализ данных показал, что хлорид-ион, а также натрий отмечаются в количествах не свойственных для данных вод, их повышенные содержания (табл.) вносят значительный вклад в изменение солености воды, которая закономерно имеет наивысшие значения в тех водах, где концентрации Cl^- и Na^+ достигают своих максимумов. При этом превышений относительно установленных для этих элементов нормативов не обнаружено. В отличие от макрокомпонентов среди элементов микрокомпонентного состава наблюдается превышение относительно ПДК содержаний Mn в водопроводной воде. Разброс значений проанализированных показателей химического состава питьевых вод, вероятнее всего, указывает на возможность их загрязнения. Так, по данным [6, 7], на территории ЯНАО существует проблема вторичного загрязнения питьевой воды ввиду неудовлетворительного санитарно-технического состояния распределительных сетей, в связи с чем, в частности, вероятен риск фиксирования повышенных концентраций и железа в воде, что также подтверждается данными исследований других авторов [6]. При этом к основным причинам вторичного загрязнения, способствующих ухудшению качества питьевой воды, можно отнести: коррозию трубопроводов, высокий процент износа водопроводных сетей, возникновение аварийных ситуаций и несвоевременное их устранение, некачественное проведение работ аварийными службами, а также проводящееся не в полном объеме обеззараживание аварийных участков водопроводных сетей после ремонтных работ [7]. Таким образом, даже вода из централизованной распределительной сети, дойдя до конечного потребителя, не всегда соответствует нормативным требованиям.

В связи со всем вышеизложенным наряду с изучением химического состава воды на соответствие нормативам, предъявляемым для питьевых вод, важным аспектом является оценка возникновения возможных рисков для здоровья населения от употребления вод некондиционного качества на отдаленную перспективу. Оценка рисков для здоровья проводилась для загрязнителей питьевой воды, являющихся приоритетными для территории исследований: для Fe общ и Mn. На основе данных о содержании в водах этих компонентов и стандартных значений факторов экспозиции были рассчитаны средние суточные дозы веществ при пероральном поступлении с питьевой водой для детской и взрослой возрастных групп. Полученные результаты и значение референтной дозы (RfD) использовали для расчёта коэффициента опасности (HQ).

По результатам проведенных расчетов было установлено, что максимальные значения коэффициента опасности для марганца не превышают единицы (максимум 0,64), а для железа – варьируют в широком диапазоне, достигая 1,35 и 3,16 для взрослой и детской возрастных категорий соответственно [8]. Различие значений максимальных величин HQ для детской и взрослой возрастных групп объясняется большей дозой токсического вещества, поступающей в организм, на единицу массы тела ребенка по сравнению со взрослым человеком.

По результатам расчётов HQ в соответствии с классификацией, приведённой в руководстве по комплексной профилактике экологически обусловленных заболеваний на основе оценки риска [5], установлено, что ситуация по марганцу не вызывает опасения, так как значения коэффициента опасности для данного компонента укладываются в диапазон минимального и допустимого уровней риска для обеих возрастных групп. В отличие от марганца для железа небольшой процент проб попадает в настораживающий уровень риска (отмечено только для подземных вод), а для детской возрастной группы –

даже в высокий уровень риска, однако такая ситуация отмечается в единичном случае – около г. Надым (пункт опробования 2209, частная скважина глубиной 5 м, четвертичный ВК). Для речных и озерных вод коэффициент опасности для обеих возрастных групп находится в диапазоне допустимого уровня риска [8].

Таким образом, по результатам проведенных исследований установлено, что специфической особенностью природных вод территории исследований являются солевой состав (маломинерализованные ультрапресные воды с низкой жесткостью) и повышенные содержания таких металлов, как железо и марганец (нередко со значительным превышением нормативных показателей). Вариабельность содержаний элементов макрокомпонентного состава вод указывает на вероятность их антропогенного загрязнения. В целом же уровни концентраций компонентов находятся в пределах установленных нормативов. Основным элементом, содержание которого повсеместно превышает нормы ПДК, является железо, высокие содержания которого объясняются как природными условиями формирования химического состава вод, так и особенностями водоподготовки на водозаборных станциях, а также вторичным загрязнением самих водопроводных систем. Этот компонент создает основной неканцерогенный риск для здоровья населения ЯНАО. При этом для выбранной детской возрастной группы риск значительно выше, чем для взрослой. При хроническом употреблении в питьевых целях вод с высоким содержанием в них железа существует опасность возникновения патологий неинфекционного характера. В частности, речь идет о таких заболеваниях, как: болезни кожи и подкожной клетчатки, болезни мочеполовой системы, болезни крови и кроветворных органов [9], органов пищеварения (гастрит, дуоденит, колит) [9, 10], болезни эндокринной и костно-мышечной систем [9, 11], нейродегенеративные заболевания (болезнь Альцгеймера) [11] и некоторые другие.

Исследование выполнено за счет проекта фундаментальных научных исследования Российской академии наук №0266-2022-0016

Список литературы

1. Bogdanova E. Challenges of Changing Water Sources for Human Wellbeing in the Arctic Zone of Western Siberia / E. Bogdanova, A. Lobanov, S.V. Andronov, A. Soromotin, A. Popov, A.V. Skalny, O. Shaduyko, T.V. Callaghan // Water. – 2023. – Vol. 15. – Is. 8. – P. 1577.

2. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации (постановление от 28.01.2021 г. № 2, зарегистрировано в Минюсте России 29 января 2021 г. № 2296) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/573500115.

3. US EPA. Exposure Factors Handbook. (EPA/600/R-09/052F). – Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2011. – 1466 p.

4. Р 2.1.10.1920–04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.

5. Руководство по комплексной профилактике экологически обусловленных заболеваний на основе оценки риска. – М., 2017. – 68 с.

6. Лапенко В.В. Эколого-физиологическая оценка химического состава водопроводной воды городов Ханты-Мансийск и Салехард / В.В. Лапенко, Л.Н. Бикбулатова, Е.М. Терникова // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2020. – № 3. – С. 159–167.

7. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Ямало-Ненецком автономном округе в 2022 году: Доклад. – Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека в Ямало-Ненецком автономном округе», ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Ямало-Ненецком автономном округе», 2023. – 209 с.

8. Колубаева, Ю.В. Особенности химического состава природных вод и их влияние на здоровье населения севера Западной Сибири / Ю.В. Колубаева, И.С. Иванова, Л.С. Широкова // Успехи современного естествознания. – 2023. – № 11. – С. 61–68.

9. Егорова Н.А. Влияние железа в питьевой воде на заболеваемость населения г. Орла / Н.А. Егорова, Н.В. Канатникова // Гигиена и санитария. – 2017. – № 11. – С. 1049-1053.

10. Aamodt, G. The association between water supply and inflammatory bowel disease based on a 1990-

1993 cohort study in southeastern Norway / G. Aamodt, G. Bukholm, J. Jahnsen, B. Moum, M.H. Vatn // American Journal of Epidemiology. – 2008. – Vol. 168. – Is. 9. – P. 1065–1072.

11. Brewer G.J. Risks of copper and iron toxicity during aging in humans / G.J. Brewer // Chemical Research in Toxicology. – 2010. – Vol. 23. – Is. 2. – P. 319–326.

ПРИДОННОЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ АНГАРСКОГО КАСКАДА

Кряжев А.А., Малков Д.С., Литвинова И.В., Хилько И.А.

Аннотация. В статье рассмотрены примеры восходящей глубинной разгрузки, современных внутрипластовых и поверхностных гидрогеохимических аномалий на юге Лено-Тунгусской НГП (Иркутская область). Обсуждаются результаты гидрогеохимического опробования, выполненного авторами при проведении опорных гидрогеологических маршрутов вдоль зон тектонического ограничения Присаяно-Енисейской синеклизы и ее внутренних контрастных структур. Представлена схема проявлений восходящей разгрузки. Рассмотренный материал и схема размещения гидрогеологических аномалий подтверждают широкое распространение процессов восходящей разгрузки на территории юга Сибирской платформы.

Ключевые слова: *Придонное опробование, активные разломы, минерализованные воды*

Abstract. The article considers examples of ascending deep discharge, modern intraplastic and surface hydrogeochemical anomalies in the south of the Leno-Tunguska State Civil Police (Irkutsk region). The results of hydrogeochemical testing performed by the authors during the baseline hydrogeological routes along the tectonic limitation zones of the Prisovano-Yenisei syneclise and its internal contrast structures are discussed. The scheme of ascending discharge is presented. The material considered and the arrangement of hydrogeological anomalies confirm the wide spread of the processes of ascending unloading in the south of the Siberian platform.

Keywords: *Bottom testing, active faults, mineralized waters*

Введение

Гидрогеохимическое опробование является одним из важных геохимических методов, применяемых при поисках месторождений нефти и газа. В 2013 году было проведено гидрогеохимическое опробование и картирование зон и очагов глубинной разгрузки на восточном борту Присаяно-Енисейской синеклизы вдоль зон влияния Окино-Вихоревского и Заярского глубинных разломов (рис. 1).

Задача поставленных работ – выявить и закартировать современные гидрогеохимические аномалии в ландшафте. Эта задача решалась на основе систематизации и анализа накопленного ранее гидрогеохимического материала, подкрепленного целевым опробованием в ходе заверочных / поисковых гидрогеохимических маршрутов вдоль зон тектонического ограничения Присаяно-Енисейской синеклизы и ее внутренних контрастных структур [Сурнин и др., 2018].

Подготовительный период

Известно, что заложение долин крупных рек контролируется долгоживущими глубинными разломами Земной коры. Разгрузка на дне рек является оптимальным путем выхода глубинных вод, поэтому русла крупных рек можно рассматривать, как дрены для поступающих снизу соленых и рассольных вод. Наиболее интенсивный подток наблюдается в районе поселков Верхнемарково и Жигалово на р. Лене, с. Усолье-Сибирское на реке Ангара, в устье р. Чадобец, а также на реках: Киренга, Кута, Ичера, Непа, Илим, Бирюса, Усолка и др.

При сборе материала большое внимание уделялось материалам гидрогеологических исследований при поисках полезных ископаемых, описанию

восходящих источников подземных вод. Важной задачей при сборе информации был поиск фондовых данных об исходном гидрохимическом фоне территорий, которые впоследствии были затоплены при заполнении водохранилищ Ангарского каскада: Иркутским, Братским, Усть-Илимским, Богучанским.

Поверхностные гидрогеохимические аномалии проявляются источниками минерализованных вод в различной степени разбавления. В процессе восходящей разгрузки подземные рассолы разубоживаются. Вблизи дневной поверхности минерализация их может резко снизиться, но преобладающим анионом-индикатором все равно остается хлор. Наиболее минерализованные опробованы в Каймоновской сдвиговой зоне на р. Кута (23 г/л ClNa); в Заярской сдвиговой зоне в пойме р. Видим (46 г/л ClNa); в зоне Присаянского разлома на р. Туманшет (27.9 г/л ClNa состава); Чадобецкий источник в зоне Нижнеангарского разлома и др.

Методика полевых работ

В 2013 году был выполнен гидрогеологический маршрут с придонным гидрогеохимическим опробованием по рекам Ока, Ангара и над затопленным руслом этих рек в акватории Братского и Усть-Илимкого водохранилищ. Маршрут был проложен так, чтобы проследить в ландшафте проявления (или отсутствие) признаков восходящей разгрузки по комплексу гидрогеохимических показателей вдоль зоны Окино-Вихоревского регионального глубинного разлома [Замараев, Кузнецов, 1961], трассирующего Ковинскую флексуру и западное плечо Братского выступа (Рис. 1).

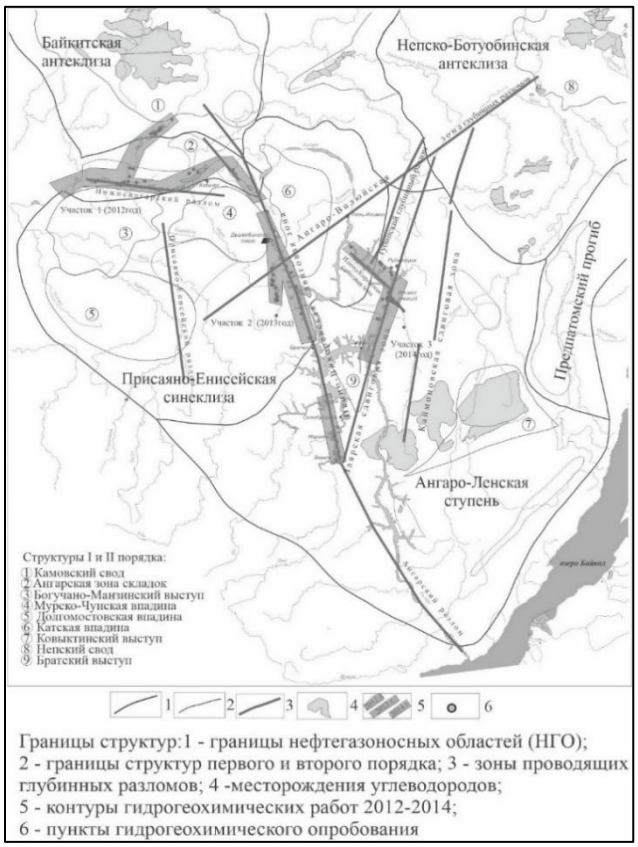


Рис. 1. Маршруты гидрогеохимического опробования

Начало маршрута на р.Ока от д. Заваль – зона пересечения с Заярским глубинным разломом [Мигурский, 2000] и далее вдоль направления ССЗ течения через устье р. Када.

Маршрут следует по Ковинской гряде и заканчивается на ЮВ окончании Ковинской антиклинали Ангарской зоны складок.

Общая протяженность гидрогеологических маршрутов. составила ~780 км. Описаны пункты опробования с полевыми измерениями гидрогеохимических параметров природных вод портативным анализатором HQ-40D фирмы Hach Lange (pH, Eh, температура, удельная электропроводность/минерализация). Выполнен отбор гидрогеохимических и газовых проб для лабораторного изучения, в том числе пробы на водорастворенный гелий с помощью полевого индикатора ИНГЕМ-1. Всего в ходе полевых работ отобрано в общей сложности 400 проб в том числе: пробы воды на полный химический анализ методом жидкостной хроматографии; пробы воды на определение микрокомпонентов методом ICP-MS; пробы воды на анализ ароматических УВ (бензол, толуол); пробы водорастворенного газа для газовой хроматографии.

На глубоководных участках Братского, Усть-Илимского водохранилищ для измерения гидрохимических параметров придонных вод использовали 30-метровую

«косу» с датчиками Hach Lange, с помощью которых производили замер параметров непосредственно на глубине. Отбор глубинных проб осуществляли батометром Молчанова (ГР-18).

Для позиционирования точек опробования над фарватером затопленных рек, использовались лоции, спутниковые навигаторы. Глубина взятия проб, характер и рельеф речного дна, контролировались при помощи эхолота. Все пункты наблюдения привязаны посредством системы спутникового позиционирования GPS.

Результаты полевых и лабораторных исследований

Полевые измерения с помощью анализаторов позволяют фиксировать в ландшафте проявления глубинной разгрузки, используя положительные аномалии удельной электропроводности вод и надфоновые содержания водорастворенного гелия.

Удельная электропроводность воды (УЭП) ассоциируется с общей минерализацией воды. По этому показателю в общем массиве выделяются Братско-Вихоревский и Ковинский участки опробования: здесь средние значения УЭП в 2÷2,5 раза выше, чем на других участках (табл.1). Наибольшая минерализация характерна для р.Вихоревка (> 700 mkCm/cm), русло которой трассирует одноименный глубинный разлом. Повышенные значения (200÷250 mkCm/cm) наблюдаются на СВ продолжении Вихоревского разлома, по р. Кова, на разломах ограничивающих Дешембинское озеро.

Таблица 1. Полевые измерения гидрогеохимических параметров

Рабочий участок	Окинский	Братско-Вихоревский	Всего
T, °C	$\frac{3,9-19,2}{11,8}$	$\frac{3,7-25,2}{13,1}$	$\frac{1,9-25,2}{13,7}$
pH	$\frac{6,58-8,78}{7,90}$	$\frac{6,34-8,87}{7,92}$	$\frac{6,34-9,00}{8,05}$
Eh	$\frac{166,6-291,3}{236,8}$	$\frac{171,2-315,1}{250,0}$	$\frac{-190,0-315,1}{224,4}$
O^2	$\frac{0,13-12,38}{7,74}$	$\frac{1,71-12,74}{8,54}$	$\frac{0,08-14,39}{8,87}$
mkCm/cm	$\frac{39,9-462,0}{111,9}$	$\frac{22,4-762,0}{259,0}$	$\frac{22,4-762,0}{202,1}$
Выборка	38	39	192

Примечание: в числителе – минимальное и максимальное содержание, в знаменателе – среднее значение.

Заметных контрастных аномалий содержания гелия на всей изученной территории не обнаружено, что объясняется её существенной геологической закрытостью. Тем более важно обнаружение пунктов просто с проявлениями гелия в содержаниях, превышающих атмосферный фон. Эти проявления приурочены также к долине р. Вихоревка и отрезку нижнего течения р. Кова, которые трассируют Окино-Вихоревский глубинный разлом.

В целом, первые полевые данные показали ожидаемое размещение площадей восходящей разгрузки флюидов в зонах высокого траппового насыщения, контрастной блоковой тектоники – геологических обоснованиях наличия долгоживущего глубинного разлома.

Положение площадей предполагаемой разгрузки и общее представление о территории прохождения гидрогеологического маршрута, ключевых участках и объемах опробования дает Карта фактического материала на Окинском и Братско-Вихоревском участках (рис. 2).

На *Окинском участке* Братского водохранилища выполнено глубинное придонное опробование с помощью батометра. Протяженность маршрута на этом участке составила около 165 км, изучено и опробовано 38 пунктов наблюдения (Рис. 2).

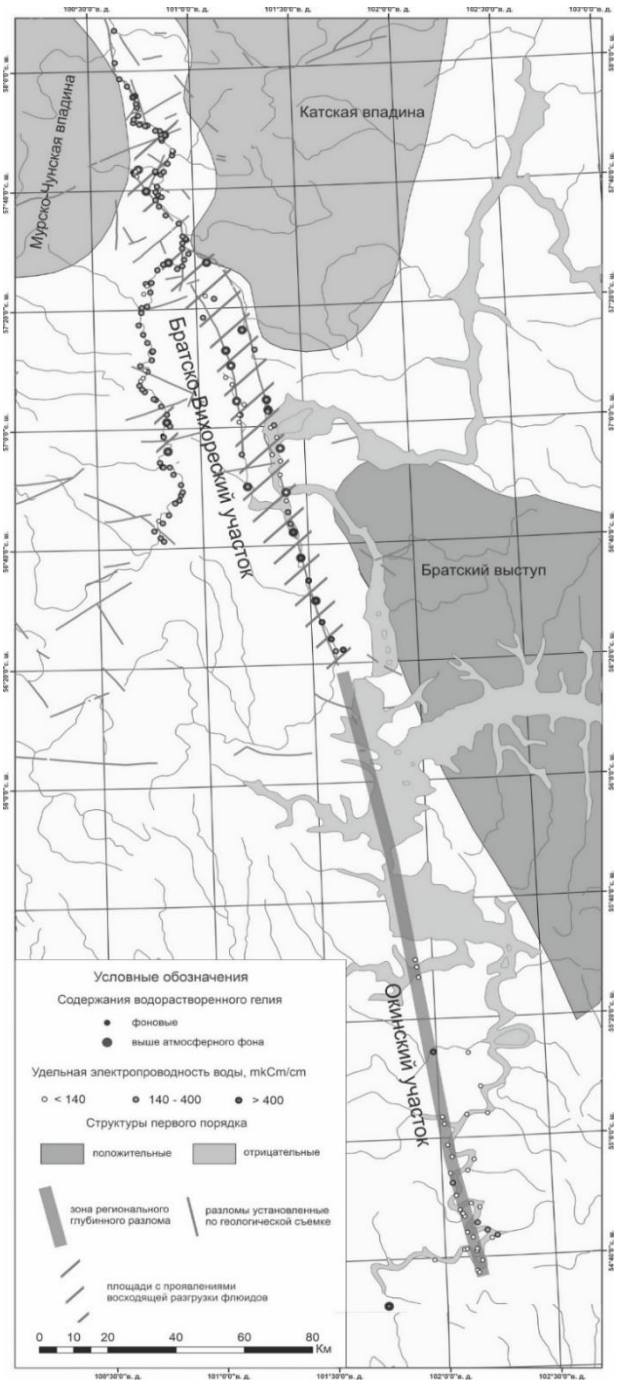


Рис. 2 Схема проявлений восходящей разгрузки в зоне Окино-Вихоревского глубинного разлома

На *Братско-Вихоревском участке* выполнялось глубинное опробование с помощью батометра по Усть-Илимскому водохранилищу, а по малым рекам бассейна р.Вихоревка традиционное гидогеохимическое опробование. Общая протяженность маршрутов составила приблизительно 210 км, изучено 38 пунктов наблюдения (Рис. 2).

Фондовые гидрогеохимические данные дополнены материалами собственных наблюдений и опробования, полученными при выполнении опорных гидрогеологических маршрутов по зонам тектонического ограничения Присаяно-Енисейской синеклизы: на восточном борту Присаяно-Енисейской синеклизы в районе Окино-Вихоревского и Заярского глубинных разломов.

По результатам придонного гидрогеохимического опробования в Окинском заливе Братского водохранилища установлены аномальные содержания водорастворенных ароматических УВ: в зоне Окино-Вихоревского и Заярского глубинных разломов сумма бензола и толуола достигает значения 0,65 мг/л. На этом же отрезке установлены аномальные содержания металлов (Ti, Cr, Mn, Co, Zn, Mo, Ba, Pb, лантаноиды).

На Кова-Вихоревском участке наиболее контрастные аномалии фиксируются непосредственно в р. Вихоревка, которая протекает на этом отрезке течения по глубинному разлому. Состав вод здесь резко отличается от "обычных" пресных гидрокарбонатных кальциевых и магниево-кальциевых вод становится хлоридным натриевым. Повышенные содержания хлоридов, наблюдаются и ниже по течению р. Вихорева - в Вихоревском заливе водохранилища на глубине 25÷30 м: до 19 %-экв. Cl^- и до 31%-экв. Na^+. Высокая доля хлора в воде сохраняется и в долине р. Ангара, которая на этом участке также трассирует разломную зону. На удалении более 25 км от устья р. Вихорева, содержания ионов Cl^-, и Na^+ в глубинных пробах из р. Ангара остаются повышенными (до 8 и 14 %-эквивалентов, соответственно).

Таблица 2. Результаты лабораторных определений

Элементы показатели	Окино-Вихоревская	Заярский
Бензол [1]	$\frac{0{,}001-0{,}65}{0{,}011}$	$\frac{0{,}001-0{,}06}{0{,}01}$
(Cl)[2]	$\frac{0{,}06-56{,}8}{4{,}1}$	$\frac{1{,}0-76{,}5}{21{,}8}$
(Ti)[3]	$\frac{0{,}002-0{,}028}{0{,}005}$	$\frac{0{,}002-0{,}022}{0{,}0057}$
(Cr)[3]	$\frac{0{,}002-0{,}033}{0{,}006}$	$\frac{0{,}0022-0{,}011}{0{,}0042}$
(Mn)[3]	$\frac{0{,}0025-1{,}25}{0{,}14}$	$\frac{0{,}004-0{,}37}{0{,}07}$
(Co)[3]	$\frac{0{,}0001-0{,}0011}{0{,}0003}$	$\frac{0{,}0001-0{,}0036}{0{,}0003}$
(Zn)[3]	$\frac{0{,}002-0{,}19}{0{,}009}$	$\frac{0{,}0023-0{,}11}{0{,}016}$
(Mo)[3]	$\frac{0{,}0002-0{,}072}{0{,}0007}$	$\frac{0{,}0002-0{,}003}{0{,}0008}$
(Ba)[3]	$\frac{0{,}008-0{,}11}{0{,}036}$	$\frac{0{,}002-0{,}32}{0{,}09}$
(Pb)[3]	$\frac{0{,}0002-0{,}02}{0{,}002}$	$\frac{0{,}0002-0{,}005}{0{,}0009}$
Σ лантаноиды[3]	$\frac{0{,}0001-0{,}0012}{0{,}00022}$	$\frac{0{,}00009-0{,}0023}{0{,}00027}$

Примечание: в числителе – минимальное и максимальное содержание, в знаменателе – среднее значение. Лаборатории и виды анализа: 1 – бензол-толуол (СЭС, г.Новосибирск); 2 -жидкостная хроматография УНПЦ «Вода» г. Томск, 3 - ICP-MS (центр «Плазма» г. Томск)

Выводы. Рассмотренные материалы приводят к выводу о том, что восходящая разгрузка носит региональный характер и представляет основной вид разгрузки. Перемещение рассолов происходит по локальным проницаемым зонам, поэтому в одних и тех же литологических массивах наряду с водообильными блоками могут существовать и блоки безводные [Силин-Бикчурин, 1959].

Список литературы

1. Замараев С.М., Г.А.Кузнецов. О крупнейшей флексуре юга Сибирской платформы. Материалы по геологии и полезным ископаемым Красноярского края. Выпуск 2, 1961 г., с.151-157.

2. Мигурский А.В., Старосельцев В.С. Дизъюнктивная тектоника и нефтегазоносность юга Сибирской платформы // Состояние и перспективы развития сырьевой базы углеводородов России. - С.-П.: ВНИГРИ, 2000. - С. 159-168.

3. Сурнин А.И., И.В. Литвинова, Д.С. Малков,.Шаманова А.А, Кряжев А.А. // Картирование зон и очагов глубинной разгрузки южной части Сибирской платформы.

4. Силин-Бекчурин А.И. Движение глубоких подземных вод. В сб.: Геохимические методы

поисков нефтяных и газовых месторождений: тр. совещания по геохимическим методам (Москва, апр. 1958 г.) / Институт геологии и разработки горючих ископаемых (М.), Академия наук СССР; ред. В. А. Соколов. - М.: Изд-во АН СССР, 1959.

РОЛЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ЭЛЮВИАЛЬНЫХ ГРУНТАХ СРЕДНЕГО УРАЛА

Овечкина О.Н.[1], Гуман О.М.[2], Нечаева Н.Н.[2], Жабко А.В.[3]
[1]ООО НИЦ «СтройГеоСреда», Екатеринбург, oon53165@mail.ru.
[2]ООО «Уралгеопроект», Екатеринбург, guman2007@mail.ru.
[3]Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, zhabkoav@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрен вопрос влияния подземных вод на элювиальные грунты, являющиеся в большинстве случаев основанием проектируемых зданий и сооружений в Уральском регионе. Приведены примеры изменения физико-механических свойств элювиальных грунтов при взаимодействии с подземными водами. Описаны процессы и явления, развивающиеся на элювиальных грунтах при строительном водопонижении и подтоплении зданий и сооружений.

***Ключевые слова**: кора выветривания, элювиальные грунты, подземные воды, подтопление, суффозия, водопонижение, барражный эффект.*

Abstract. The paper considers the issue of the influence of groundwater on eluvial soils, which in most cases are the basis of projected buildings and structures in the Ural region. Examples of changes in the physical and mechanical properties of eluvial soils during interaction with groundwater are given. The processes and phenomena developing on eluvial soils during construction water supply and flooding of buildings and structures are described.

***Keywords**: weathering crust, eluvial soils, groundwater, flooding, suffusion, water loss, barrage effect.*

В крупнейших промышленных центрах Урала (Свердловск, Челябинск, Нижний Тагил, Магнитогорск и др.) с каждым годом растут объем, и сложность инженерных объектов, появляются новые высотные конструкции зданий и сооружений, активно осваивается подземное пространство. Основанием сооружений служат в большинстве случаев, элювиальные грунты.

Коры выветривания Урала формируются в сложных тектонических и разнообразных климатических условиях. Границей распространения процессов выветривания следует считать уровень подземных вод. Здесь преобладают процессы гидратации, восстановления и цементации. Выше уровня грунтовых вод (зона аэрации и колебания уровня грунтовых вод) воды, обогащенные кислородом, углекислотой, азотом, органическими кислотами, находятся в непрерывном движении: нисходящем во влажные периоды, восходящем к поверхности — в сухие. Активный водообмен и высокая химическая реакционная способность вод определяет изменение пород субстрата и возникновение новых минеральных образований. Граница области выветривания не является стабильной, так как уровень грунтовых вод подвержен сезонным и вековым колебаниям.

На территории Уральского региона широко распространены так называемые смешанослойные минералы, образующиеся в результате упорядоченного или неупорядоченного чередования набухающих и ненабухающих структурных слоев (монтмориллонит-гидрослюда, монтмориллонит-хлорит). Элювиальные грунты каолинит – монтмориллонитовые и монтмориллонитовые, а также с примесью бентонита и галлуазита обладают способностью к набуханию, что необходимо учитывать при

строительстве зданий и сооружений на них. При увлажнении частички гидрогаллуазита, имеющие форму трубочки, сначала увеличиваются в диаметре, а затем при полном насыщении «раскрываются» как бумажный лист. В связи с этим грунты, в которых содержится гидрогаллуазит, при их водонасыщении дают неравномерную просадку [1].

Важным элементом при строительстве на элювиальных грунтах являются подземные воды. В пределах области взаимодействия изученных оснований высотных зданий подземные воды широко распространены как по площади, так и по глубине. Они приурочены к отложениям четвертичного, мезозойского, палеозойского возраста, образуют комплексы поровых, трещинных безнапорных вод (ЖК «Адмиральский», Высоцкий, Пассаж, Редиссон) [2].

Обводнение котлованов, обусловлено распространением трещинных и поровых вод. Формирование этих вод происходит благодаря трещиноватости массивов тектонического и экзогенного происхождения.

Большое влияние на обводненность котлованов оказывает геологическое строение. Примером является «Антей», где водоносный комплекс вулканогенно-осадочных пород палеозойского возраста и метаморфических образований приурочен к сложной переслаивающейся толще зеленокаменных формаций. Водовмещающими породами являются различного рода сланцы. По степени водообильности этот водоносный комплекс характеризуется незначительной трещинной зоной, простирающейся на глубину в среднем до 50 м, и слабой водопроводимостью от 30 до 100 $м^2$/сутки [3]. Жилы кварца и дайки гранит-порфиров являются трещинно-жильными коллекторами подземных вод с коэффициентом фильтрации 10-20 м/сут, что почти на два порядка выше слабоводопроницаемых блоков [4].

При строительстве сооружений на элювиальных грунтах следует учитывать возможное повышение их влажности за счет замачивания грунтов сверху из внешних источников или снизу при подъеме уровня подземных вод, что может привести к проявлению процессов суффозии, набухания и просадки, процессам пучения, снижению прочностных и деформационных свойств.

Впервые с явлением суффозионного выноса нас познакомил главный инженер ЗАО «УралТИСИЗ» Чайкин А.А, при разрушении 5-этажного дома по ул. Лыжников в 1998 г. Внешнее проявление суффозионного выноса было выражено в деформации грунтов под отмосткой здания в виде «стиральной доски», а в самом здании появилась 10-ти сантиметровая трещина (рис. 1).



Деформации грунтов под отмосткой здания



Деформации поверхности автопарковки

Рис. 1. Внешние проявления суффозионного выноса грунтов

Примерами проявления суффозионных явлений служат здания общежитий УГГУ на ул. 8 Марта, здание Цирка, магазин Гринвич, 5-этажное здание по ул. Лыжников-

Щербакова, здание МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО», здание Администрации при строительстве торгового центра «Пассаж» и др.

Немаловажное значение при строительстве имеет барражный эффект, когда на пути фильтрационного потока появляется преграда, например, подземные парковки, горные выработки или фундаменты глубокого заложения под высотные здания (10-18 м) и как следствие происходит полное или частичное перекрытия водоносного горизонта подземным сооружением. В Ботаническом районе г. Екатеринбурга при повышении уровня подземных вод, связанного с утечками из водопровода, в высотном жилом доме произошло подтопление приямка, что вызвало угрозу сохранности подземных технических сооружений и коммуникаций.

Трещиноватость скальных грунтов, неравномерная способность пород к физическому и химическому выветриванию, наличие глубоких карманов выветривания, высокая раздробленность грунтов и их водонасыщенность, являются весьма неблагоприятными факторами при проектировании и возведении сооружений. Эти факторы оказывают решающее влияние на процессы деформации земной поверхности при частичной подработке территории и сопутствующем понижении уровня подземных вод.

Проходка тоннелей Екатеринбургского метрополитена в сильно обводненных породах осложнялась большими притоками воды в выработку, сопровождающиеся многочисленными вывалами неустойчивых пород при их обнажении. Земная поверхность, зданий и сооружений, расположенных на ней, подвергаются сдвижениям и деформациям вследствие проведения работ по предварительному осушению пород, в которых предполагается проходка выработок метрополитена (например, проходка вертикальных стволов в обводненных грунтах невозможна). В результате снижения уровня грунтовых вод образовалась депрессионная воронка, которая при продолжении откачки воды постепенно развивалась. Водопонижение спровоцировало в породах изменение напряжений и как следствие, это привело к деформациям горных массивов, вызывая сдвижения земной поверхности и повреждения расположенных на ней сооружений. Размеры оседающих участков земной поверхности, соответствовали площади, развивающейся в результате снижения уровня подземных вод депрессионной воронки. В реальных условиях г. Екатеринбурга депрессионная воронка практически всегда ассиметрична, т. к. наиболее водопроницаемые и сжимаемые породы обычно залегают в виде “карманов” и “рукавов”, приуроченных к руслам и долинам ранее существовавших ручьев и речек, во врезах в выветрелые скальные породы и характеризуются большой неравномерностью распространения как по площади, так и по мощности.

Основные деформации здание цирка получило именно в период водопонижения при проходке выработок метрополитена, при этом, еще несколько зданий в этот же период претерпели подобные деформации, причем в местах расположения водопонижающих скважин. Наиболее ярким примером является жилое здание по ул. 8 Марта, 55. Необходимо отметить, что это здание также находится на рыхлых отложениях, причем очень важно, что основные деформации здание цирка получило именно из-за неравномерной мощности рыхлых отложений (часть здания с восточной стороны как бы висит над древней поймой реки Исеть) [5].

Изменение физико-механических свойств элювиальных грунтов при водонасыщении в результате техногенного подтопления наблюдались на объекте административно-жилого здания, расположенного в г. Екатеринбурге, по улице Старых Большевиков, в период с 2004 по 2018 гг. Показатели физико-механических характеристик в основании фундаментов существующего здания значительно ухудшились в процессе водонасыщения.

По физическим характеристикам наблюдалось увеличение показателя влажности на 16%, коэффициента пористости на 8,5%, степени влажности на 7% и уменьшение

плотности на 4%. Показатель текучести изменился от твердого состояния до полутвердого - мягкопластичного. Механические свойства снизились: удельное сцепление на 50%, угол внутреннего трения на 28%, модуль деформации на 33%. Ухудшение свойств привело, в свою очередь, к изменению напряженного состояния сжимаемой толщи основания и неравномерным осадкам, что повлекло за собой появление трещин в конструкциях здания.

Склонность к снижению прочности элювиальных грунтов во времени их пребывания в открытых котлованах наблюдалось при строительстве высотного жилого комплекса «Clever Parc», расположенного в центре Екатеринбурга. Основанием свай-стоек являлись скальные и полускальные грунты (плотность изменяются от 2,16 до 2,90 г/см^3, предел прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии - от 59,2 до 0,5 МПа).

Забивные сваи размером 30х30 см различной длины были забиты до проектного отказа, но после «отдыха» и их «добивки», сваи погрузились еще на 0,3-0,5 м. Дополнительное погружение свай связано:

1) с минеральным составом скальных и полускальных грунтов, в который входят: кварц – 19-30%; гидромусковит – 20-55%; Fe-монтмориллонит – 15-25%; хлорит-вермикулит – 20-25%; плагиоклаз – 7-8%; гетит – 3%; небольшая примесь хлорита;

2) с относительной потерей прочности под действием атмосферных осадков и созданием благоприятных условий для проникновения агентов выветривания при вскрытии грунтов во время разработки котлована. Выполненные исследования на аналогичных грунтах коры выветривания за период 14 дней установили, что потеря прочности составила: для пород низкой прочности 10,6 %, для малопрочных - от 15,1 до 33,3 %, для пород средней прочности - 12,9 % [2].

Повышение уровня подземных вод может активизировать просадочные процессы, привести к возникновению гидродинамического и взвешивающего давления. Подтопление, связанное с повышением уровней, может вызвать заболачивание территории, представлять угрозу сохранности подземных технических сооружений и коммуникаций, построенных в ранее сухих грунтах. Осложняющим элементом при строительстве на элювиальных грунтах являются подземные воды, которые отрицательно влияют на: изменение физико-механических свойств грунтов в основании инженерных сооружений и агрессивность грунтовых вод; надежность конструкций зданий; надежность функционирования инженерных коммуникаций, сооружений и оборудования вследствие проникания воды в подземные помещения; и сооружений; проявление суффозии и эрозии; определят устойчивость горных пород в бортах котлованов; санитарно-гигиеническое состояние территории. Подземные воды должны оцениваться с точки зрения их влияния на устойчивость и безопасность строительства.

Список литературы

1. Пшеничникова М.Г., Гуман О.М., Нечаева Н.Н. Опыт изучения пучинистых свойств элювиальных грунтов Уральского региона / Материалы XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 29 ноября –2 декабря 2022 г. с. 73-79.

2. Овечкина О.Н. Оценка и прогноз изменения состояния геологической среды при техногенном воздействии зданий высотной конструкции в пределах города Екатеринбурга: дис. конд. геол.-минерал. наук: 25.00.08 / Овечкина Ольга Николаевна. – Екатеринбург, 2013, 159 с.

3. Буданов Н.Д. Гидрогеология Урала / Н.Д. Буданов. – М.: Наука, 1964. – 304 с.

4. Скалин А.А., Скалин А.В. Инженерно-гидрогеологические изыскания для обоснования дренажа уникального объекта капитального строительства на Среднем Урале [Электронный ресурс] // Инженерные изыскания в условиях саморегулирования: матер. научно-практической конф. – Екатеринбург, 2012. – 1 электрон, опт.

6. Яровой Ю.И. Прогноз деформаций земной поверхности и защита городской застройки при строительстве метрополитенов на Урале. Екатеринбург, УрГАПС, 1999, 258 с.

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО ОСАДКА НА ВОДОПОДЪЕМНОМ ОБОРУДОВАНИИ (ЧУЛЫМО-ЕНИСЕЙСКИЙ БАССЕЙН)

Озерский А.Ю.
АО «МОНИТЭК», Красноярск, ozerski@krasgeo.ru

Аннотация. Проведено изучение минерального осадка на насосах водозаборных скважин в неглубоком (130 м) и глубинном (670 м) горизонтах Чулымо-Енисейского бассейна. В неглубоком горизонте осадок формируется в основном главными ионами подземных вод и представлен преимущественно чукановитом, макинавитом, гумбольдтином. В глубинном горизонте осадок формируется из второстепенных ионов и представлен преимущественно лепидокрокитом и самородной серой. Показана большая роль биогенных процессов в формировании осадка.

Ключевые слова. *Гидрогеохимия, минеральный осадок, чукановит, макинавит, гумбольдтин*

Abstract. A study of mineral sediment on pumps of water wells in the shallow (130 m) and deep (670 m) aquifers of the Chulym-Yenissey basin was carried out. In the shallow aquifer sediment is mainly formed by the major ions of groundwater and is represented by chukanovite, mackinawite, and humboldtine. In the deep aquifer the sediment is formed from minor ions and is represented mainly by lepidocrocite and native sulfur. The important role of biogenic processes in sediment formation is shown.

Key words. *Hydrogeochemistry, mineral sediment, chukanovite, mackinawite, humboldtine*

Введение. В практической гидрогеологии изучение минерального состава и геохимических особенностей водовмещающих пород применяется крайне редко. На практике основной объем гидрогеохимической информации получается путем прямого опробования и анализов подземных вод. Необходимость в изучении вещественного состава подземных вод как правило возникает при возникновении осложнений: некондиционном качестве воды, ее сильной загрязнении специфическими веществами, при обосновании генезиса минеральных вод и при некоторых других обстоятельствах. В подавляющем большинстве случаев запасы питьевых подземных вод утверждаются и ставятся на баланс без изучения вещественного состава водоносных пород. По этой причине многие прогнозы качества подземных вод на водозаборах не оправдываются.

Действительно, система взаимодействия «вода – породы – растворенные газы» является сложной даже стадии ее изучения, когда эта система относительно стабильна. Эксплуатация водозаборных скважин приводит к сильным нарушениям этой системы, которые проявляются не только в растворении водовмещающих пород потоком подземных вод, притекающим к скважине, но также и в процессах осаждения минерального вещества.

В 2023 году при проведении оценочных работ на одном из водозаборов, расположенном в 60 км к северу от Красноярска, представилась возможность изучения минерального состава осадка, выпавшего на погружных насосах. Это позволило взглянуть по-новому на в общем хорошо изученные гидрохимические условия юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна.

Объекты и методы исследований. Объектом исследований были две водозаборные скважины, расположенные на юго-восточной окраине Западно-Сибирской плиты, известной также как Чулымо-Енисейский бассейн. Эта структура характеризуется преимущественным распространением порово-пластовых вод в терригенных континентальных угленосных юрских отложениях, распространенных до глубины 800 м. В нижне-среднеюрской толще здесь выделено до 5 водоносных горизонтов слабых песчаников, разделенных мощными слоями слабопроницаемых алевропелитов и бурых углей. Песчаники водоносных горизонтов в основном

олигомиктовые, калишпатово-кварцевого состава. Наличие в юрской толще нескольких пластов бурого угля существенным образом влияет не геохимические условия и обусловливает восстановительные условия в глубоких частях геологического разреза.

Первая из скважин водозабора, глубиной 130 м, была пробурена несколько лет назад. Она вскрывает один из самых верхних горизонтов средней юры, приуроченных к плывунным песчаникам. Пресные подземные воды горизонта имеют сульфатно-гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав:

$$M_{0,88}\frac{HCO_3 76\ SO_4 21\ Cl 3}{Ca 56\ Na 29 Mg 14}.$$

По причине плывунного характера водоносного горизонта скважина заиливалась, часто требовала чистки и ремонта, поэтому она не могла надежно обеспечить водой потребителя.

Для организации бесперебойного водоснабжения было принято решение пробурить скважину на наиболее надежный горизонт, приуроченный к основанию средней юры и залегающий в интервале глубин 500-670 м. Бурение скважины было выполнено работниками ООО «Ремсельбурвод» (г. Красноярск), гидрогеологическое обеспечение работ осуществляли специалисты АО «МОНИТЭК». Фильтровая часть водоподъемной колонны труб в скважине была установлена в интервале 500-660 м. Для разделения эксплуатационного горизонта песчаников от верхней, угленасыщенной, части средней юры над кровлей горизонта был создан цементный мост толщиной 20 м.

Подземные воды горизонта имеют «содовый» состав, типичный для глубоких горизонтов юрской формации Чулымо-Енисейского бассейна [3, 4]:

$$M_{0,72}\frac{HCO_3 88\ CO_3 8}{Na + K 88 Ca 9}.$$

В июне 2023 года из обеих указанных скважин были извлечены насосы с целью их ремонта. Оба насоса после годичного срока работы в скважинах были покрыты пленкой выпавших минеральных солей черного цвета, толщиной в доли миллиметра (рис.).



Рис. Погружной насос, покрытый минеральным осадком

После нескольких часов нахождения на воздухе черный налет на насосе из глубокой скважины изменил цвет с черного на бурый. Из этой пленки путем соскабливания была отобрана проба на минералогический анализ под номером 670m.

Черный налет на насосе из мелкой скважины цвет не менял. Налет также был опробован путем соскабливания на минералогический анализ (проба под номером 130m).

Определение минералогического состава обеих проб было выполнено методом ренгенофазового анализа (РФА) в Лаборатории рентгеновских методов исследования и анализа Сибирского федерального университета. Съемка рентгенограмм для РФА осуществлялась на автоматизированном рентгеновском дифрактометре фирмы Shimadzu XRD-7000S, Япония (излучение CuK_{α}). Пробоподготовка для этой цели стандартная: прямая набивка с ручным прессованием порошка с помощью закалённого стекла в алюминиевую кювету с последующим срезанием излишка материала тонким лезвием. Интерпретация результатов РФА проводился с использованием информационно-поисковой системы рентгенофазовой идентификации материалов, которая интегрирует новый интерактивный метод кластерной фазовой идентификации, реализуемый с использованием баз данных рентгенофазовых стандартов фаз неорганических материалов по мультирефлексному методу «корундовых чисел-фаз». Для содержательной интерпретации были использованы в основном опубликованные источники.

Результаты и их обсуждение. В настоящей статье рассматриваются только основные минеральные виды, имеющие достаточно большие процентные доли в общем составе, по которым можно судить о геохимической обстановке в подземных водах, поступающих к скважинам (табл.).

Таблица. Содержание основных минералов, осажденных из подземных вод, %

Минералы	Химическая формула	Номера проб	
		130m	670m
Кварц	SiO_2	10,3	15,1
Лепидокрокит	$FeO(OH)$	2,2	31,9
Арагонит	$CaCO_3$	15,3	2,7
Гумбольдтин	$Fe(C_2O_4)(H_2O)_2$	6,6	–
Магнетит	Fe_3O_4	12,5	1,5
Макинавит	FeS (Fe_9S_8)	18,9	–
Чукановит	$Fe_2(CO_3)(OH)_2$	21,4	–
Сера самородная	S_8	–	28,5

Надо отметить, что минералы, выпавшие из подземных вод на водоподъемное оборудование, существенно отличаются от минерального состава водовмещающих пород. Только кварц присутствует как в водоносных горизонтах, так и в осадках из подземных вод. Общими минералами для осадков приповерхностных и глубоких вод являются кварц и магнетит, причем доля кварца довольно высока для обоих водоносных горизонтов. Осадок кварца вероятно образовался за счет прилипания к насосам коллоида ортокремниевой кислоты, выносимого подземными водами из калишпатово-кварцевых песчаников.

Для осадков из неглубоких подземных вод (проба 130m) доминирующими минералами являются карбонаты, при подчиненной роли сульфидов и оксидов. Карбонаты представлены чукановитом и арагонитом. Чукановит – редкий минерал из группы малахита, обнаруженный в продуктах выветривания метеоритного железа, среди техногенных продуктов коррозии в теплообменниках промышленных предприятий, а также на стальных трубопроводах, размещенных в песках, насыщенных углекислыми водами [6, 7]. Источником железа в чукановите, вероятно, является оксидная пленка на насосе, а анионная часть минерала формируется из подземных вод:

$$2FeO + CO_2 + H_2O \rightarrow Fe_2(CO_3)(OH)_2.$$

Вероятно, это реакция происходит не в одну стадию, а для ее реализации необходимо участие живых организмов.

Вторым по распространенности после чукановита является макинавит (сульфид железа), который типичен для восстановительной обстановки в пресных подземных водах и обычно указывает на наличие метаболических процессов и сульфат-редукции. Макинавит обладает парамагнитными свойствами, поэтому цепочки его нанокристаллов (магнитосома) используются бактериями для ориентации [8].

Арагонит является химическим аналогом кальцита, но он кристаллизуется в ромбической сингонии и обычно также свидетельствует о биогенных процессах.

Специфически и редким минералом здесь является гумбольдтин (гидрооксалат железа). Минералы оксалаты (соли щавелевой кислоты) достаточно редки. Источниками оксалатов называют продукты жизнедеятельности некоторых животных, а также бактерии, лишайники и грибы [2]. Обычно гумбольдтин находят на поверхностях трещин в угольных месторождениях, там же он может формировать налеты на различных поверхностях в выработках.

Минералы-оксиды осадка представлены кварцем и магнетитом, осаждение первого из них, по-видимому, имеет химическую природу, тогда как второй также способен к образованию магнитосомы в прокариотах и может иметь биологический генезис [8].

Таким образом, минеральный состав выпадений из подземных вод в неглубоких условиях говорит о восстановительной обстановке и большой роли биологической среды, в том числе сульфатредуцирующих бактерий, при этом минералогия выпадений соответствует гидрокарбонатному кальциевому составу неглубоких подземных вод.

Состав глубоких подземных вод, нашедших отражение в пробе 670m, проявился в осадке в минеральных видах, практически не имеющих совпадений с отложениями из неглубоких вод. Соединения кальция не характерны для минерального осадка из глубоких подземных вод, что свидетельствует о ненасыщенности подземных вод этим ионом. Преобладающим процессом в глубинных условиях является осаждение лепидокрокита (гидроксида железа (III)), что отражает высокое содержание этого элемента в подземных водах (до 5 мг/л), поступающих к фильтру скважины сверху, из угленасыщенных пластов. Почти треть выпадающих солей (31,9%) представлена этим минералом. По-видимому, цементный мост над кровлей горизонта не смог надежно изолировать его от залегающих выше угольных пластов, подземные воды в которых содержат много железа (III). Характерно, что на большой глубине степень окисления железа в минеральном осадке выше, чем в приповерхностной зоне. Это объясняется тем, что в приповерхностных условиях минералы железа образуются за счет коррозии водоподъемного оборудования с окислением его железа до FeO(II), тогда как на глубине они осаждаются из притекающей воды, в которой железо уже имеет форму Fe^{3+}.

Лепидокроките незначительно уступает доля самородной (ромбической) серы, равная 28,5%. Осаждение самородной серы на водоподъемном оборудовании связано с процессами сульфатредукции, в результате которой присутствующие в подземных водах сульфаты восстанавливаются бактериями *Sulfurovum, Sulfuricurvum, Sulfurospirillum* и *Thiothrix* до сульфидов. В условиях типичного для глубины недостатка кислорода сера сульфидов окисляется до степени окисления 0, то есть до самородной серы [1]. Процесс осаждения самородной серы достаточно хорошо известен, например, в Кузбассе измерение интенсивности сульфатредукции продемонстрировало относительно активный процесс, поставляющий при разгрузке одной из скважин до 178 г восстановленной серы ежегодно [5].

Таким образом, минеральный состав выпадений из подземных вод в глубокой скважине говорит о восстановительной обстановке, широком развитии биогенных процессов сульфатредукции и подтверждает высокое содержание железа в воде.

Заключение. Изучение техногенных осадков на водоподъемных насосах в водозаборной скважине в общем подтверждает гидрогеохимическую зональность и показывает огромную роль биогенных процессов в формировании химического состава подземных вод во всей юрской толще юго-восточной части Западно-Сибирского бассейна. В приповерхностной гидрогеохимической зоне, где распространены пресные сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые воды, главные ионы активно участвуют в образовании минерального осадка либо непосредственно (арагонит, чукановит), либо опосредованно, с участием сульфатредукции (макинавит). Активная жизнь микроорганизмов приводит к образованию щавелевой кислоты и ее минерала (гумбольдтин). С чисто химическими процессами связано осаждение кварца и, вероятно, магнетита.

В глубинной гидрогеохимической зоне, залегающей глубже 150-200 м и характеризующейся распространением гидрокарбонатных натриевых вод, главные их ионы не участвуют в образовании минерального осадка. Минеральный осадок образуют второстепенные ионы – железо и сульфаты. Растворенное в подземных водах железо (III) оседает в виде лепидокрокита при выходе воды из горизонта в скважину. Биогенная сульфатредукция ведет к осаждению самородной ромбической серы. Исходя из распространенности биогенных минералов роль метаболизма в формировании минеральных осадков в глубинных водах в 1,5-2 раза меньше, чем в приповерхностном горизонте.

Список литературы

1. Иванов М.В. Биогеохимия серы. [Текст] / М.В. Иванов. // Геохимия и минералогия серы. - М.: Наука. 1972.

2. Изатулина А.Р. Кристаллохимия оксалатов двухвалентных металлов [Текст] / А.Р. Изатулина, М.А. Кузьмина, А.В. Корнеев, В.В. Гуржий, О.В. Франк-Каменецкая // Материалы Годичного собрания РМО «Минералого-геохимические исследования для решения проблем нетро- и рудогенеза, выявления новых видов минерального сырья и их рационального использования» и Федоровской сессии 2023. - СПб. 2023. 367 с.: ил.

3. Лепокурова О.Е. Геохимия уникальных пресных щелочных вод Чулымского бассейна [Текст] / О.Е. Лепокурова // Вестник Томского государственного университета. - 2012. - № 365. - С. 181-186.

4. Озерский А. Ю. Чулымо-Енисейская провинция пресных экологически чистых подземных вод [Текст] / А.Ю. Озерский // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов. Материалы научной конференции 20-24 сентября 2005 г. – Иркутск, ИГ СО РАН, 2005. – С. 376 – 378.

5. Панова И. А. Сульфатредукция в подземных горизонтах затопленной угольной шахты в Кузбассе [Текст] / И. А. Панова, И. И. Русанов, В. В. Кадников, Е. А. Латыголец, М. Р. Авакян, М. В. Иванов, В. С. Зюсман, А. А. Ковалева, Н. В. Равин, Н. В. Пименов, О. В. Карначук // Микробиология, 2020, Т. 89, № 5, С. 547-555.

6. Чукановит. Материал из GeoWiki - открытой энциклопедии по наукам о Земле. 2023. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://wiki.web.ru/wiki/Чукановит.

7. Pandarinathan, V. Chukanovite ($Fe_2(OH)_2CO_3$) identified as a corrosion product at sand-deposited carbon steel in CO2-saturated brine [Text] / V. Pandarinathan, K. Lepková , W. van Bronswijk // Elsevier. Corrosion Science. Volume 85, 2014, Pages 26-32

8. Posfai, M. Iron sulfides from magnetotactic bacteria: Structure, composition, and phase transitions [Text] / M. Posfai, P.R. Buseck, D.A. Bazylinski, R. B. Frankel // American Mineralogist, 1998, V. 83, p. 1469-1481.

ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОКАРБОНАТНЫХ НАТРИЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПОВЫШЕННОЙ И ВЫСОКОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Павлов С.Х.
Институт земной коры СО РАН, Иркутск, spavlov@crust.irk.ru

Аннотация. С помощью физико-химического моделирования прослежены процессы формирования гидрокарбонатных натриевых (инверсионных) подземных вод глубоких горизонтов. Впервые установлено, что в зависимости от содержания $C_{орг}$ и хлора в составе взаимодействующей с водой породы могут сформироваться растворы, соответствующие по составу как низко-, так и высокоминерализованным (вплоть до рассолов) подземным водам, распространенным как в районах скопления углеводородов, так и вне их. В этих условиях формируются в высоких концентрациях углекислый газ и метан, которые присутствуют не только в растворе, но и создают газовую фазу.

Ключевые слова: *инверсионные воды; имитационное моделирование физико-химических процессов*

Abstract. The processes of formation of sodium bicarbonate groundwater of deep horizons have been traced using physico-chemical modeling. It was established for the first time that, depending on the content of organic matter and chlorine in the composition of the rock interacting with water, solutions can be formed corresponding in composition to both low- and highly mineralized (up to brines) groundwater distributed both in areas of accumulation of hydrocarbons and outside them. Under these conditions, carbon dioxide and methane are formed in high concentrations, which are present not only in solution, but also create a gas phase.

Key words*: inversion waters; simulation modeling of physical-chemical processes*

Введение в проблему. Подземные воды гидрокарбонатного натриевого состава распространены не только в зоне интенсивного водообмена, но и в глубоких горизонтах они получили достаточно широкое развитие. В работах ведущих исследователей [13, 17] критически проанализирован огромный объём отечественной и зарубежной литературы, посвященной этому вопросу. В исследовании формирования гидрокарбонатных натриевых подземных вод выделяются два направления: одно посвящено подземным водам преимущественно зоны интенсивного водообмена, другое – рассматривает различные стороны жизни гидрокарбонатных натриевых подземных вод глубоких горизонтов, которым занимаются, главным образом, представители нефтегазовой геологии.

Для зоны интенсивного водообмена в последней работе автора данного сообщения [11] на количественном уровне достаточно детально рассмотрены процессы формирования гидрокарбонатных натриевых подземных вод в системе атмосферная вода–песчаник. В ней прослежены пути и интенсивность изменения основных интегральных характеристик и индивидуальных компонентов раствора в зависимости от степени взаимодействия исходных составов породы и раствора и формирующихся вторичных минеральных образований на каждом шаге взаимодействия. Что же касается формирования гидрокарбонатных натриевых (инверсионных) подземных вод глубоких горизонтов, то объяснение этого происходит с разных позиций.

Рассматривается происхождение подземных вод, которое на основании многочисленных натурных наблюдений, лабораторных, экспериментальных и теоретических исследований свидетельствует о полигенном генезисе пресных и маломинерализованных вод в глубоких недрах нефтегазоносных бассейнов [6]. Несмотря на представительный спектр предлагаемых гипотез, большинство исследователей считают, что формирование инверсионных вод на региональном уровне связано с элизионно–дегидрационными процессами [3, 5, 10 и мн. др.]. В зонах, непосредственно прилегающих к углеводородным скоплениям, происхождение низкоминерализованных вод связывается с процессами дистилляции и конденсации водоуглеродных парогазовых смесей [7]. Что же касается происхождения

гидрокарбонатного состава вод, особенно повышенной и высокой минерализации, а также высокого или преобладающего присутствия диоксида углерода в газовой фазе, то эту особенность инверсионных вод обычно связывают с подтоком углекислоты из фундамента. Этот вывод согласуется с результатами термодинамического моделирования [8], которые показывают, что формирование инверсионных вод происходит в открытых по CO_2 гидрогеохимических системах. В исследовании, результаты которого представлены в данной работе, предпринята попытка дать определенные ответы на некоторые дискуссионные вопросы рассматриваемой проблемы.

Методика. Цель данного исследования состоит в том, чтобы на количественном уровне проследить процессы физико-химических взаимодействий в системе вода–порода–газ–органическое вещество и выяснить, формируются ли в ходе этих взаимодействий растворы гидрокарбонатного натриевого состава, в том числе, с высоким содержанием хлора, как пресные, так и повышенной минерализации, вплоть до рассолов. Поскольку именно такие воды распространены в глубоких горизонтах нефтегазоносных бассейнов на региональном уровне вблизи глинистых толщ [1, 3, 15 и др.], то исследование проведено с образцом глинистого сланца, взятым из работы [14]. В соответствии с поставленной целью, не трогая средние значения концентраций серы и фтора, в породе последовательно увеличивались содержания органического вещества ($C_{орг}$ от 1 до 5 мас. %), каждой величине которого соответствовали два значения хлора (Cl = 0.22 и 0.49 мас. %), взятые из работы [2]. В качестве растворителя была использована чистая вода, как более соответствующая возрожденным водам, так и потому, что низкие значения минерализации инверсионных вод составляют первые сотни мг/л. Глубина распространения инверсионных вод даже в пределах одного месторождения углеводородов изменяется более чем на 1500 м [1], в соответствии с этим в широком интервале изменяются температура и давление. В работе приняты величины, соответствующие их умеренным значениям (T=50 С и P=70 бар). Исследование проведено с помощью программного комплекса Селектор-W [4, 16] по степени протекания гидрогеохимического процесса, когда масса воды, равная 1 кг, остается постоянной, а количество породы последовательно увеличивается от 1×10^{-6} до $1\times10^{\circ}$кг. Рабочая модель соответствует модели, созданной в последней работе автора [11], и в ней же достаточно подробно рассмотрена методика проведения исследуемого процесса.

Полученные результаты. При взаимодействии воды с глинистым сланцем, в соответствии с увеличением массы породы, с различной интенсивностью происходит последовательное увеличение минерализации формирующихся растворов. Выяснилось, что активность этого процесса сильно увеличивается с повышением содержания органического вещества в исходном составе породы. Максимальные значения минерализации при содержании $C_{орг}$ равном 1% достигают 4.5 г/кг H_2O, в то время как при 5 % приближаются к 32 г/кг H_2O. В растворах породы с $C_{орг}$=1–2% с увеличением степени взаимодействия происходит, с некоторыми колебаниями, значительное повышение щелочности и увеличение восстановительных свойств. С увеличением в породе $C_{орг}$ до 3% отмечается значительная инверсия изменения геохимической обстановки формирующихся растворов. Кислотно-щелочные условия растворов существенно подкисляются и сильно понижаются их восстановительные свойства. Интенсивность этих изменений увеличивается с повышением в породе содержания $C_{орг}$.

В зависимости от соотношения концентрации в породе $C_{орг}$ и Cl формируется широкая гамма растворов, в которых на различных стадиях взаимодействия воды с породой, преобладают либо гидрокарбонатные, либо хлоридные ионы, которые и определяют состав воды. Несмотря на представительное присутствие в породе серы, она крайне слабо представлена в растворе в виде гидросульфидного иона. В отличие от серы в растворах хорошо развивается фтор, который достигает высоких концентраций. Азот присутствует в растворах в виде свободного азота, аммония и аммиака, среди которых

доминируют последние.

В исследуемой системе ярко и масштабно проявилось диспропорционирование и фракционирование углерода, который в продуктах взаимодействия воды с породой присутствует как в окисленной (HCO_3^-, CO_3^{2-}, CO_2°, $CO_{2(г)}$) так и в восстановленной (CH_4°, $CH_{4(г)}$) формах. Первые присутствуют в основном в растворе, но с повышением в породе $C_{орг}$ до 3 % содержание диоксида углерода заметно увеличивается, и он появляется и в газовой фазе, максимальное его содержание в которой, при $C_{орг}$=5 % достигает 1.4 моль. Что касается метана, то его количество во всех растворах значительно, и он присутствует как в растворе, так и в газовой фазе. Во всех растворах максимальное содержание CH_4° остается на одном уровне, соответствующем его растворимости (0.9 г/кг H_2O) в данных условиях. Появление такого количества CH_4° наступает задолго до конца исследуемого интервала взаимодействий и происходит увеличение $CH_{4(г)}$. С увеличением количества $C_{орг}$ в породе наступление этого момента происходит при уменьшающейся величине отношения порода/вода и значительно увеличивается количество метана в газовой фазе. Содержание $CH_{4(г)}$ при крайних значениях $C_{орг}$ в исходной породе представительно и составляет 0.3 и 1.7 моль.

Обсуждение. В таблице проводится сопоставление результатов состава модельных растворов с анализами реальных HCO_3, HCO_3–Cl и Cl–HCO_3 натриевых подземных вод, распространенных как в пределах нефтегазовых месторождений, так и вне их. Оно основано на подборе модельных растворов, минерализация и состав которых соответствуют или приближаются к природным водам. Большинство значений минерализации модельных и природных растворов близки друг другу и только для рассолов свойственны ощутимые отличия. Это связано с тем, что для получения более высоко концентрированных растворов пришлось повысить величину отношения порода/вода до 1.56x10.

При равных или близких величинах минерализации сравниваемых растворов содержания компонентов растворов изменяются в широких пределах. Для основного катиона – натрия различия нарастают с увеличением минерализации. Это связано с тем, что в модельных растворах среди катионов происходит значительное увеличение доли аммония и комплексных соединений натрия, которые в реальных растворах не определяются. Аналитическое определение содержания аммония обычно низкое. Это различие характерно для нахождения этого компонента в условиях «in situ» и его определения в условиях «in vitro». Отличия содержаний HCO_3 и Cl в реальных и модельных растворах изменяются от единичных до десятков процентов, и они не связаны с изменением минерализации. Безусловно, при геологической неоднородности, которая ярко проявляется в природе, трудно ожидать сходимости результатов на кондиционном уровне при ограниченных синтезированных исходных значениях содержания анионогенных элементов в породе. Тем не менее, интересующие нас, в первую очередь, компоненты модельных растворов не только хорошо отражают общую направленность исследуемого гидрогеохимического процесса, но и достаточно близки к реальным природным растворам. В тоже время, фтор является тем компонентом, который показывает, что его присутствие в составе исходной породы в количестве, соответствующем среднему значению, высоко избыточно, далеко от реальной ситуации и требует существенной корректировки при выборе исходного состава породы.

Процесс гидролитического диспропорционирования органического вещества (**HDOM**), в котором вода является одновременно и окислителем, и восстановителем, впервые выявленный Н.С. Хельгесоном с сотрудниками [18], именно на примере инверсионных вод, является одним из наиболее важных достижений в изучении системы углерод–вода–минералы, полученных в последнюю четверть прошлого века. Однако оно продолжает оставаться непонятым до настоящего времени. Нами на примере простой модели, в развитии концепции гидролитического диспропорционирования органического вещества была рассмотрена стадийность процессов окисления $C_{орг}$ [12] в

условиях метастабильного и полного равновесия. В данном исследовании на примере сложной модели, приближенной к природным условиям, прослежены процессы диспропорционирования и фракционирования углерода, формирующего не только основные компоненты раствора, но и его значительную газовую фазу.

Проведенные расчеты показали, что углерод является тем компонентом, который в значительной степени активизирует гидрогеохимические процессы, протекающие тем интенсивнее, чем больше его содержание в породе. В соответствии с его концентрацией в исходной породе происходит изменение геохимической обстановки в системе

вода–минералы–газ–органическое вещество, а, следовательно, и количество окисленных и восстановленных его форм в растворе и в газовой фазе. Полученные результаты также показали, что формируются не только углекислота и метан, но и в незначительных количествах присутствуют тяжелые углеводороды. Кроме того, даже в условиях полного равновесия в растворе остаются ионы и соли карбоновых кислот. Это подтверждает ранее сделанный вывод о том, что процессы гидролитического диспропорционирования $C_{орг}$ являются первичными по отношению к микробиологическому метаногенезу, поскольку микробиологические процессы могут развиваться только при наличии геохимических потоков. Эти процессы ярко проявляются также и в зоне интенсивного водообмена.

Вывод. Гидрокарбонатные натриевые (инверсионные) воды с высоким содержанием углекислоты и метана в растворе и в газовой фазе формируются внутри системы вода–порода–газ–органическое вещество без привлечения их из внешних источников как на площади месторождений углеводородов, так и вне их в результате процессов гидролитического диспропорционирования и фракционирования органического вещества (**HDOM**).

Список литературы

1. Воды нефтяных и газовых месторождений СССР [Текст]: Справочник / Ред. Л.М. Зорькин. Москва: Недра, 1989. – 382 с.

2. Гуляева Л.А. Хлор в меловых и юрских отложениях Газлинской и Каганской групп структур Западного Узбекистана [Текст] / Л.А. Гуляева, И.Ф. Лосицкая //Геохимия и гидрохимия нефтяных месторождений. Издательство АН СССР. 1963. – С. 40–56.

3. Капченко, Л.Н. Гидрогеологические основы теории нефтегазонакопления [Текст] / Л.Н. Капченко. Ленинрад: Недра, 1983. – 203 с.

4. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии [Текст]. / И.К. Карпов. Новосибирск: Наука, 1981. – 247 с.

5. Карцев А.А., Гидрогеология нефтегазоносных бассейнов [Текст] / А.А. Карцев, С.Б. Вагин, В.М. Матусевич. Москва: Недра. 1986. – 224 с.

6. Колодий В.В. Конденсационные и солюционные воды нефтяного, газоконденсатного и газовых месторождений [Текст] / В.В. Колодий. Киев: Наукова думка,1983. – 247 с.

7. Колодий В.В. Пресные и маломинерализованные воды глубоких горизонтов нефтегазоносных водонапорных бассейнов [Текст] / В.В. Колодий // Маломинерализованные воды глубоких горизонтов нефтегазоносных провинций. Киев: Наукова думка. 1985. – С. 7–25.

8. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты [Текст] / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец. Москва: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.

9. Лепокурова О.Е. Содовые подземные воды юго-востока Западной Сибири: геохимия и условия формирования [Текст]: дис. …д-ра г.-м. наук: 25.00.07 / О.Е. Лепокурова. – Томск, 2018. – 217 с.

10. Назаров А.Д. Нефтегазовая гидрогеохимия Юго-Восточной части Западно-Сибирской ненефтегазоносной провинции [Текст] / А.Д. Назаров. Москва: Идея – Пресс, 2004. – 285 с.

11. Павлов С.Х. Процессы формирования гидрокарбонатных натриевых подземных вод в системе атмосферная вода–песчаник [Текст] /С.Х. Павлов // Геодинамика и тектонофизика. – 2023. –Т. 14, № 6. 0733. doi:10.5800/GT-2023-14-6-0733.

12. Павло, С.Х., Взаимодействие углерода с водой в условиях полного и метастабильного равновесия [Текст] // С.Х. Павлов, И.К. Карпов, К.В. Чудненко // Водные ресурсы. 2008. – Т. 35, № 4, – С. 456-466.

13. Посохов Е.В. Происхождение содовых вод в природе [Текст] / Е.В. Посохов. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1969. – 153 с.

14. Ронов А.Б., Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов [Текст] / А.Б. Ронов, А.А. Ярошевский, А.А. Мигдисов. Москва: Наука, 1990. – 182 с.

15. Рудкевич М.Я., Нефтегазоносные комплексы Западно-Сибирского бассейна [Текст] / М.Я. Рудкевич, Л.С. Озеранская, Н.Ф. Чистякова, В.А. Корнев, Е.М. Максимов. – Москва: Недра, 1988. – 303 с.

16. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии [Текст]: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения / К.В. Чудненко. – Новосибирск: ГЕО, 2010. – 287 с.

17. Шварцев С.Л. Содовые воды как зеркало противоречий современной гидрогеохимии [Текст] / С.Л. Шварцев //Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода. Т. 2. Система «вода – порода» в условиях зоны гипергенеза. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2007. – С. 122–126.

18. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs? [Text] / H.C. Helgeson, A.M. Knox, C.E. Owens, E.L. Shock // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1993. – V. 57. – P. 3295–3339.

Таблица. Химический состав природных содовых вод и вариантов расчета модельных растворов глинистого сланца с различным содержанием органического углерода и хлора при T=50°C и P=70 бар

Водопункт, его номер и номер анализа или величина отношения **порода/вода**	Содержание $C_{орг}$–Cl, мас. %	Глубина или интервал опробов., м	pH	Минерализация, г/л(**кг/H_2O**)	мг/л(**кг/H_2O**)												
					K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	HS^-	SO_4^{2-}	Cl^-	F^-	$HSiO_3^-$	SiO_2	OH^-
Скв., табл.59, [1]	–	558-574	–	0.2	–	57	10	1	122	–	–	16	28	–			
Порода/вода=7∗10^{-4}	**4–0.49**	–	**8.3**	**0.2**	**6**	**51**	**1.7**	**2.3**	**107**	**1.8**	**0.03**	**0**	**30**	**2.6**	**2**	**15**	**0.2**
Скв.,со2(7), прил.1, [9]		210	8.2	0.6	1.5	190	2	1.2	366	48	–	0	32	–	–	2.3	–
Порода/вода=2∗10^{-2}	**1-0.22**	–	**9.12**	**0.6**	**1**	**168**	**0.8**	**0**	**269**	**34**	**0.3**	**0**	**44**	**8**	**15**	**15**	**1.4**
Скв.,со2(8), прил.1, [9]	–	210	8.1	0.7	1.4	165	2	0	464	18	–	30	27	–	–	2.6	–
Порода/вода=2,5∗10^{-3}	**1-0.22**	–	**9.2**	**0.7**	**1.4**	**165**	**0.7**	**0**	**322**	**50**	**0.33**	**0**	**55**	**10**	**17**	**15**	**1.7**
Скв.,со12(7), прил.1, [9]	–	620-1400	7.5	1.0	1.4	380	6	0	476	9	–	0	136	–	–	6	–
Порода/вода=3,9∗10^{-2}	**2-0.49**	–	**8.9**	**1.1**	**1.2**	**332**	**1**	**0**	**420**	**45**	**0.4**	**0**	**193**	**16**	**11**	**15**	**1.1**
Скв.,со11(5), прил.1, [9]	-	360	7.8	1.1	2.1	310	6	3.7	598	0	0.4	3	132	–	–	11	–
Порода/вода=5,0∗10^{-2}	**2-0.49**	-	**9**	**1.3**	**1.3**	**418**	**1**	**0**	**526**	**59**	**0.4**	**0**	**242**	**20**	**12**	**15**	**1.1**
Скв., табл. 59, [1]	–	2080-2110	–	10.1	–	3434	14	10	4764	–	–	38	1830	–	–	–	–
Порода/вода=3,98∗10^{-1}	**3-0.49**	–	**8**	**10.9**	**15**	**3322**	**0.4**	**0.5**	**5272**	**92**	**0.13**	**0**	**1899**	**164**	**1.3**	**14**	**0.1**
Скв., табл. 59, [1]	–	2223-2234	–	10.7	–	3749	10	7	3819	–	–	55	3071	–	–	–	–
Порода/вода=5,0∗10^{-1}	**2-0.49**	–	**8.5**	**10.7**	**4**	**3451**	**0.9**	**0**	**4156**	**265**	**0.5**	**–**	**2443**	**181**	**4.6**	**13**	**0.5**
Скв., к 20, прил.1, [9]	–	690	8.2	19.9	19	5662	33	19	12454	312	–	7	1242	–	-	22	–
Порода/вода=7,94∗10^{-1}	**4–0.22**	–	**8.3**	**20.4**	**8**	**6159**	**0.2**	**0.2**	**11507**	**494**	**0.3**	**0**	**1758**	**335**	**3**	**14**	**0.3**
Скв., к 22, прил.1, [9]	–	1070	7.7	25.1	47	7230	47	41	15494	0	–	9	2331	–	–	39	–
Порода/вода=1∗10^{0}	**4–0.22**	–	**8.2**	**25.7**	**10**	**7764**	**0.2**	**0.2**	**14604**	**535**	**0.3**	**0**	**2230**	**425**	**2.3**	**13**	**0.2**
Скв., табл. 59, [1]	-	2140-2269	–	41.8	–	12900	21	42	21289	–	–	11	7590	–	–	–	–
Скв., табл. 59, [1]	-	2141-2154	–	50.1	–	14902	46	7	30904	–	–	38	4108	–	–	–	–
Порода/вода=1.56∗10^{0}	**5-0.49**	–	**6.8**	**47.0**	**237**	**13838**	**2**	**3**	**24295**	**42**	**0.04**	**–**	**8033**	**125**	**0**	**12**	**0**

ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПЛАСТОВЫХ ВОД СЕНОМАНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНЕ ТАЗОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Плавник А.Г.[1], Сальникова Ю.И.[1, 2]
[1] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук Западно-Сибирский филиал, Тюмень, plavnikag@ipgg.sbras.ru
[2] Тюменский индустриальный университет, Тюмень, salnikovaji@tyuiu.ru

Аннотация. Проанализированы результаты анализов пластовых вод за многолетний период освоения района Тазовского месторождения Западной Сибири. Выявлена схожесть условий формирования подземных вод юрско-меловых отложений на территории Тазовского месторождения и сопредельных площадей. Прослежена связь тектонического разлома, проходящего вдоль восточного борта локальной структуры, с вертикальной миграцией вод из неокомского и юрского комплексов в сеноманский горизонт, повлиявшей на формирование законтурных вод газонефтяной залежи сеномана.
Ключевые слова: *Западно-Сибирский мегабассейн, геохимия пластовых вод, внутриконтурные и законтурные воды.*

Abstract. The results of analyzes of formation waters over a long period of development of the Tazovskoye field region in Western Siberia are analyzed. The similarity of the conditions for the formation of groundwater in Jurassic-Cretaceous deposits on the territory of the Tazovskoye field and adjacent areas was revealed. The connection between the tectonic fault running along the eastern side of the local structure and the vertical migration of water from the Neocomian and Jurassic complexes into the Cenomanian horizon, which influenced the formation of the boundary waters of the Cenomanian gas-oil deposit, was traced.
Keywords: *West Siberian megabasin, geochemistry of formation waters, intra-circuit and peripheral waters.*

При освоении ресурсного потенциала северной части Западной Сибири особенно важным является решение теоретических и прикладных вопросов гидрогеологии и гидрогеохимии пластовых вод, изучение их связи с нефтегазоносностью отложений. В связи с продвижением масштабных геолого-разведочных работ в эти районы (1950-1960 гг.) начинается и изучение гидрогеохимической природы глубоких подземных вод северных областей Западно-Сибирского мегабассейна [1, 2, 3]. Значительный вклад в исследования пространственных геохимических закономерностей подземных вод верхнего и нижнего гидрогеологических этажей, ведущих факторов, определяющих генезис подземных вод мегабассейна и их связь с нефтегазоносностью отложений, внесли такие ученые, как Н.Н. Ростовцев (1962), А.Э. Конторович (1963), С.Л. Шварцев (1963), Е.А. Барс (1970), В.А. Нуднер (1970), Б.П. Ставицкий (1970), В.М. Матусевич (1976), А.А. Розин (1977), Н.М. Кругликов (1985), А.Р. Курчиков (2004), Д.А. Новиков (2000) и др.

Виду ограниченности гидрогеологических исследований разреза юрско-меловых отложений северных территорий Западно-Сибирского мегабассейна и практически их полное отсутствие в период с конца 1960-х по начало 2000-х годов, можно отметить крайне неравномерную изученность, которая выражается пространственной неоднородностью распределения имеющейся информации в плане и по разрезу. В основном полученные результаты характеризуются слабой детализированностью и носят фрагментированный характер.

За последние годы в процессе разработки месторождений углеводородов появилась возможность проанализировать значительный объем гидрохимических исследований законтурных вод, попутных вод и вод, извлекаемых для обеспечения систем поддержания пластового давления нефтяных месторождений. Анализ современных гидрохимических данных и данных, полученных на этапе поисково-разведочных работ, позволяет детализировать условия формирования состава подземных вод нефтегазоносных горизонтов Западно-Сибирского мегабассейна.

В этом отношении особый интерес представляет информация, накопленная на Тазовском месторождении, в том числе по пробам попутных вод, отобранных при эксплуатации сеноманской залежи до внедрения системы заводнения пласта. Это позволяет оценить гидрогеохимические условия в нефтенасыщенной зоне пласта без внедрения вод из других объектов и сопоставить с региональными данными.

К настоящему времени накоплен достаточно большой объем результатов гидрогеохимических опробований (более 300 проб) апт-альб-сеноманского комплекса (ААС ВК), неокомского и юрского комплексов на Тазовском месторождении и прилегающих территориях. Непосредственно на Тазовском месторождении гидрогеохимическим опробованием охарактеризован сеноманские горизонт (30 проб), в меньшей степени неокомский (17 проб) и юрский (6 проб) комплексы. Пластовые воды альбских и аптских отложений на месторождении не изучены. Пробы пластовых вод юрского и неокомского комплексов на Тазовском месторождении подтверждают схожий состав с водами этих же комплексов в районе месторождения.

На основе имеющихся данных о пластовых водах сеноманского горизонта Тазовского месторождения авторами выполнено деление анализов, отобранных из нефтенасыщенного интервала, и интервала, расположенного ниже уровня водонефтяного контакта (ВНК) (табл. 1). При рассмотрении сводных данных геохимии подземных вод Тазовского месторождения также можно выделить два периода изучения ААС ВК.

Таблица 1. Гидрогеохимическая характеристика пластовых вод сеномана на Тазовском месторождении

Номер скважины, кустовой площадки	Кол-во проб/ скважин	Год отбора	М, г/дм^3	Солевой состав, min/max/сред., мг/дм^3						Микрокомпоненты, мг/дм^3			rNa/rCl	Тип вод по В.А. Сулину
				$Na^+ + K^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO^{3-}	I^-	Br^-	B^+		
Начальный этап (сеноман)														
1РО, 5R, 16R, 25R Законтурные	9 4	1964-1966	12.1 19.2 17.1	4337.8 6909.0 6181.3	258.5 894.0 344.3	23.0 116.7 83.0	4.1 62.7 23.0 5 опр.	7304.1 11553.8 10218.1	231.8 439.0 270.2	13.9 18.8 16.8 7 опр.	43.7 80.0 57.9 7 опр.	7.0 20.0 10.5 6 опр.	0.86 0.96 0.93	ХК
10R, 24R Внутриконтурные	4 2	1965-1968	9.0 17.5 14.0	3116.8 6339.3 5117.3	142.9 313.4 230.3	33.7 95.7 71.4	14.8 20.0 17.0 3 опр.	5362.9 10423.0 8368.1	155.6 317.2 243.8	11.7 19.6 15.7 3 опр.	24.2 50.3 39.9 3 опр.	5.5 12.8 9.8	0.94 0.95 0.94	ХК
13R, 18R, 32R Внутриконтурные	9 3	1964-1967	14.4 19.3 16.9	5442.0 7057.1 6245.3	78.6 134.3 107.0	73.0 127.0 95.4	3.3 15.0 9.2 4 опр.	8125.0 10638.0 9400.8	703.7 1282.0 1083.7	5.1 22.0 14.3	36.8 59.9 46.1	8.8 9.2 9.0 2 опр.	1.00 1.04 1.03	ХМ, ГКН
Современный этап (сеноман)														
КП 3.1 Законтурные	5 5	2017-2022	14.2 18.7 17.3	4941.8 6801.9 6989.4	222.5 903.9 441.8	86.3 216.4 134.3	5.0 25.3 16.0	8316.0 11220.0 10209.8	189.2 378.2 280.7	0.6 16.7 6 3 опр.	25.0 51.6 39.6 3 опр.	8.1 8.1 8.1 1 опр.	0.82 0.97 0.91	ХК
КП 4 Законтурные	2 2	2019, 2022	16.0 19.0 17.5	5794.0 7040.7 6417.3	214.2 211.0 212.6	72.8 93.0 82.9	46.4 12.5 29.5	9147.6 11273.0 10210.3	610.0 397.0 503.5	14.7 16.0 15.4	40.5 25.0 32.8	10.4 10.4 10.4 1 опр.	0.98 0.96 0.97	ХК
КП 6 Законтурные	1 1	2022	19.5	7139.9	190.0	110.0	12.5	11450.0	630.0	15.2	25.0	9.4	0.96	ХК

Подземные воды сеноманских отложений исследованы как на этапе поисково-разведочных работ (1964-1968 гг., 22 пробы), так и на современном этапе (2017-2022 гг., 8 проб). Полученные данные свидетельствуют о близости результатов определения химического состава проб подземных вод, отобранных на разных этапах исследований. Преимущественно воды сеноманских отложений относятся к хлоридно-кальциевому типу. Исключение составляют девять анализов проб хлоридно-магниевого и

гидрокарбонатно-натриевого типов, которые отобраны в скважинах №№ 13R, 18R, 32R расположенных на восточном склоне Тазовской структуры вдоль значительного по размерам и амплитуде разлома (рис. 1).

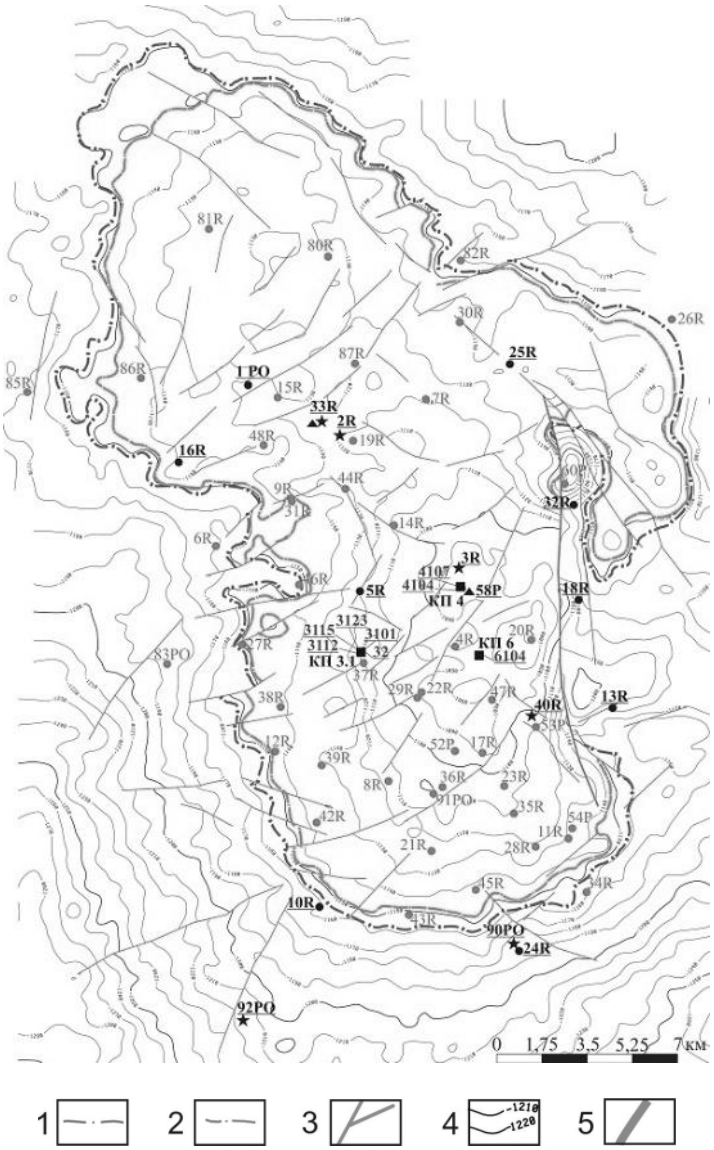


Рис. 1. Карта расположения скважин Тазовского месторождения по кровле отражающего горизонта Г (сеноман)

Условные обозначения:

1 - внешний контур нефтеносности; 2 - внешний контур газоносности; 3 - малоамплитудные нарушения; 4 - изогипсы кровли сеномана, м; 5 - основное тектоническое нарушение (сброс большой амплитуды).

●**37R -** скважина, номер, R - разведочная, PO - поисково-оценочная;

■**КП 4** - кустовая площадка, номер;

●**25R** - скважина с отбором пробы воды на химический анализ (апт-альб-сеноманский водоносный комплекс), номер;

★**40R** - скважина с отбором пробы воды на химический анализ (неокомский комплекс), номер;

▲**58R** - скважина с отбором пробы воды на химический анализ (юрский комплекс), номер;

3101 - эксплуатационная скважина (сеноман) с отбором пробы воды на химический анализ, номер.

Пластовые воды продуктивного интервала сеномана, отобранные из эксплуатационных скважин Тазовского месторождения (2017-2022 гг.), относятся к хлоридно-кальциевому типу. Средняя минерализация вод по кустам скважин изменяется от 17,3 до 19,5 г/дм^3.

По данным опробования разведочных скважин (1960-е годы) в пределах нефтенасыщенной части пласта на Тазовском месторождении пробы пластовых вод (9 анализов) характеризуются близким значением средней минерализации – 17,1 г/дм^3 и имеют также хлоридно-кальциевый тип [4].

Законтурные воды сеноманской залежи, изученные по скв.10R и 24R (две пробы), в целом характеризуются однотипным и схожим химическим составом с внутриконтурными водами с пониженными значениями минерализации (9,0-17,5 г/дм^3).

Наибольший интерес представляет геохимия законтурных вод сеномана вдоль восточного склона Тазовской структуры, отсеченного глубоким тектоническим разломом. Здесь, по данным восьми анализов скв. 13R, 18R, законтурные воды сеномана относятся к гидрокарбонатно-натриевому типу с минерализацией 14,4-19,3 г/дм^3, что можно объяснить влиянием тектонического разлома с амплитудой до 120 м. По единственной пробе из скв. 32R, пробуренной на расстоянии около 400 м от указанного разлома, тип законтурных сеноманских вод определяется как хлоридно-магниевый с минерализацией 17,6 г/дм^3. Пластовые воды сеноманских отложений в восточной зоне распространения этого разлома, очевидно, формировались под влиянием перетоков флюидов гидрокарбонатно-натриевого состава из юрских и неокомских комплексов.

Выводы

По результатам анализа глубоких подземных вод района Тазовского месторождения можно сделать следующие выводы.

1. Пластовые воды сеноманского горизонта на Тазовском месторождении по составу характеризуются единообразием с водами района исследований в целом – воды относятся к хлоридно-кальциевому типу, с близкими значениями минерализации и содержания основных компонентов ионно-солевого состава. Это свидетельствует о схожести условий формирования подземных вод на описываемой территории.

2. Природа сеноманских вод Тазовского месторождения, приуроченных к восточному борту протяженного тектонического разлома (гидрокарбонатно-натриевый и хлоридно-магниевый типы), вероятно, связана с вертикальной миграцией вод из неокомского и юрского комплексов.

Аналитические работы по изучению химического состава пластовых вод выполнены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ №FWZZ-2022-0015 в рамках НИР СО РАН.

Список литературы

1. Комгорт, М.В., Курчиков А.Р., Бородкин В.Н. Поисково-разведочные работы на территории Ямало-Ненецкого атономного округа: история и перспективы // История науки и техники. – 2009. – № 6. – С. 17-28.

2. Матусевич В.М. Краткая история изучения глубоких подземных вод Западно-Сибирского мегабассейна и эволюция научных представлений // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1999. – № 4. – С. 24-31.

3. Павлюков, А. И. Краткая история изучения и масштабы техногенного воздействия на апт-альб-сеноманский водоносный комплекс Западной Сибири / А. И. Павлюков, Ю. И. Сальникова // Подземная гидросфера : Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием, Иркутск, 20–26 июня 2021 года. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. – С. 101-105. – DOI 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-101-105

4. Плавник А. Г. Гидрогеохимия сеноманских отложений района Тазовского месторождения / А. Г. Плавник, Ю. И. Сальникова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 2, № 2. – С. 191-196. – DOI 10.33764/2618-981X-2023-2-2-191-19

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ХРОМАТО-МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПРИРОДНЫХ ВОД

Потурай В.А.
Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, poturay85@yandex.ru

Аннотация. В настоящей статье, на основе многолетних исследований состава органического вещества в подземных и поверхностных водах хроматографическим методом, приводится описание проблем, с которыми можно столкнутся при использовании газовой хромато-масс-спектрометрии (**ГХ-МС**) и твердофазной экстракции (**ТФЭ**). Предлагаются пути их решения. Кроме этого, приводятся результаты исследования состава органического вещества в Тумнинских термальных водах с применением модифицированных методов анализа.

Ключевые слова: *термальные воды, органическое вещество, газовая хромато-масс-спектрометрия, твердофазная экстракция.*

Abstract. Based on many years of research into the composition of organic matter in groundwater and surface water, this paper describes the problems associated with the use of gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and solid-phase extraction (SPE). Ways to overcome these problems are suggested. In addition, the results of the study of the organic matter composition in the Tumnin thermal waters using modified analytical methods are presented.

Key words: *thermal water, organic matter, gas chromatography-mass spectrometry, solid-phase extraction.*

Методические приемы и подходы являются очень важной частью любого исследования. Выбору методов анализа состава вод, особенно состава индивидуальных органических соединений, уделяется пристальное внимание. На сегодняшний день, ТФЭ с использованием сорбента DSC-18 как метод пробоподготовки и концентрирования органических компонентов и ГХ-МС – это хорошо зарекомендовавший себя тандем высокочувствительных методов, который позволяет анализировать сложные многокомпонентные среды, разделяя и регистрируя соединения даже с очень близкой структурой и весьма низкими концентрациями. При анализе подземных вод методом ГХ-МС, как правило, определяют весьма малые количества соединений, поэтому очень важным становится соблюдение «чистоты» на всех этапах пробоподготовки и анализа в лаборатории, поскольку даже незначительное инструментальное загрязнение может приводить к получению искажённых, и даже ложных результатов [13, 14, 16]. Автором уже более 15 лет проводятся исследования состава органического вещества в подземных (горячих и холодных) и поверхностных водах с использованием ТФЭ и ГХ-МС и накоплен достаточно большой массив данных [4, 9–12, 17]. На начальном этапе концентрирование органического вещества методом ТФЭ и его хроматографическое определение проводились под руководством ведущего инженера аналитической лаборатории краевого центра экологического мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций Владимира Львовича Рапопорта. Им были отмечены некоторые особенности проведения ТФЭ и ГХ-МС, которые использовались в настоящей работе. Некоторые тезисы он доложил на конференции в Китае [Рапопорт В.Л., *Жиркова Ю.Д. Инструментальные загрязнения при хромато-масс-спектрометрическом анализе поверхностных вод // Тезисы конференции*], но, к сожалению, эти материалы так и не были опубликованы. Автор продолжил исследования состава органического вещества в подземных водах, в ходе которых были подтверждены сделанные раннее и получены новые выводы по особенностям проведения ТФЭ и ГХ-МС, которые могут влиять на качество анализа и, соответственно, на конечный результат. На основе полученного опыта, в этой работе рассматриваются инструментальные загрязнения, связанные с хроматографической системой прибора (узлом ввода пробы, состоянием капиллярной

колонки, и применением септ в инжекторе) и особенности проведения твердофазной экстракции с использованием картриджей с сорбентом для концентрирования органических компонентов. Также приводятся данные по составу органического вещества в Тумнинских термальных водах, которые были получены с учетом опыта использования ТФЭ и ГХ-МС для анализа органических компонентов.

Методика анализа. Концентрирование и очистка органических соединений, а также их перенос на подходящую для ГХ-МС-анализа матрицу осуществлялся методом ТФЭ. Экстракт органических соединений получали путем промывки сорбента 500 мкл хлористого метилена. Качественный анализ органических соединений осуществляли методом капиллярной газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией [2, 18] на газовом хромато-масс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP2010S в лаборатории КЦЭМП (аналитик В.Л. Рапопорт) и на Shimadzu GCMS-QP2010 ultra в лаборатории ИКАРП ДВО РАН (аналитик В.А. Потурай). Разделение осуществлялось на кварцевой капиллярной колонке RTX-5 и HP-5MS (неподвижная фаза 5 % – фенил, 95 % – диметил-полисилоксан), внутренний диаметр 0,25 мм, толщина слоя неподвижной фазы 0,25 мкм, длина колонки 30 м. Скорость потока газа-носителя (гелий марки 7.0) 1 мл/мин. Анализ проводился в режиме полного ионного тока, значения m/z от 50 до 430. Температура инжектора 320 ºС, температура ионного источника 250 ºС, температура интерфейса 310 ºС. Идентификация пиков осуществлялась по масс-спектрам и индексам удерживания (индекс Ковача) [3, 8].

Инструментальные загрязнения при ГХ-МС. Экстракты, полученные из поверхностных и подземных вод, часто содержат высокомолекулярные нелетучие органические компоненты (асфальтены, воски, смолы и др.). Эти вещества и продукты их термической деструкции требуют гораздо более высокой температуры нагрева для переноса потоком гелия по капиллярной колонке, чем это может обеспечить хроматограф. Это приводит к их оседанию на стенках капиллярных колонок, особенно вблизи инжектора или на кварцевой ватке в стеклянном лайнере (испарителе), из-за чего рабочие свойства колонок изменяются, при этом изменяются времена удерживания компонентов, происходит уширение пиков и искажение их формы. Для устранения подобных загрязнений требуется очень длительный прогрев колонки при высокой температуре в токе гелия. Однако это не всегда приводит к восстановлению её свойств, в таком случае, рабочие свойства можно восстановить, отрезав часть колонки, которая прилегает к инжектору, длиной 0,5–1 м. Кроме этого, часто требуется повторное кондиционирование капиллярной колонки, заключающееся в длительном поэтапном нагреве до максимальной температуры, при котором следует отсоединить колонку от масс-детектора для предотвращения загрязнения ионного источника.

В ходе хроматографического анализа также важно правильно выбрать время прогрева колонки при высокой температуре и, соответственно, время окончания анализа. Так как экстракты природных вод содержат неизвестные на момент анализа соединения, такое время точно рассчитать не представляется возможным. В таком случае, наиболее высокомолекулярные соединения могут не успеть «выйти» из капиллярной колонки и при последующем анализе проявятся в виде пиков или горба на хроматограмме. Для устранения этого эффекта необходимо в ходе анализа дожидаться окончания выхода всех компонентов из хроматографа, на что указывает длинная (не менее 5–7 минут) прямая базовая линия в конце хроматограммы. Также полезно, после завершения анализа (или ряда анализов экстрактов одного типа вод), запускать холостой анализ тем же методом.

В современных хроматографах обдув септы (прокладка, отделяющая внутреннюю среду прибора) потоком газа носителя, как правило, исключает попадание в колонку веществ, которые выделяет септа при нагревании. Однако при вводе проб в хроматограф, септа многократно прокалывается, при этом частицы материала септы попадают в испаритель, где из этих частиц выделяются летучие вещества. Далее, эти компоненты фокусируются на холодной колонке и при получении хроматограмм дают нормальные

пики примесей [5, 6]. В зависимости от режима работы прибора и количества материала септы, попавшего в испаритель, загрязнение может проявляться как в одной, так и множестве последующих хроматограммах. Для уменьшения случаев загрязнения выпускают иглы для микрошприцев с различными вариантами заточки. Однако полностью исключить попадания материала септы в испаритель, по-видимому, невозможно. Полезно знать компоненты, которые выделяет материал септы. В ходе наших исследований мы применяем септы зеленого цвета, которые содержат различные эфиры фталевой кислоты (фталаты). Это, как правило, три соединения: дибутилфталат, диизобутилфталат и бис(2-этилгексил)фталат. Эти соединения обычно рассматриваются как типичные загрязнители природных сред в результате антропогенного воздействия, так как являются универсальными пластификаторами и широко используются в пластмассовых и резиновых изделиях. Источником фталатов могут быть и пластифицированные прокладки крышек виал, в которых содержится экстракт, и картриджи, используемые при ТФЭ. Эфиры фталевой кислоты широко распространенны в окружающей среде и могут поступать в анализируемый образец даже из загрязненного лабораторного воздуха [6]. Для предотвращения загрязнения из-за попадания материала септы в испаритель, следует чаще заменять лайнер, особенно при применении автоматического ввода, так как шприцы автоматического ввода оснащаются более толстыми иглами с простой конической заточкой, что приводит к быстрому изнашиванию септ и попаданию частиц износа в испаритель. При фиксировании этих соединений на хроматограммах в виде пиков, их следует исключать из рассмотрения так же, как это делается для силоксанов (соединения, входящие в состав сорбента капиллярной колонки), которые проявляются на хроматограммах в результате износа капиллярной колонки при длительном нагреве.

Особенности проведения ТФЭ. Процесс проведения твердофазной экстракции заключается в фильтрации анализируемой воды через картридж с сорбентом DSC-18 с постоянной скоростью (1 мл в минуту). Фильтрация осуществляется при помощи избыточного (инертным газом) или отрицательного давления (вакуумом). Интересующие нас соединения (аналиты) оседают на сорбенте, с которого они снимаются (элюируются) различными органическими растворителями: хлористый метилен, метанол, ацетонитрил, изопропанол и др. Картридж для ТФЭ представляет собой пластиковый тубус, формой напоминающий шприц без поршня. В результате фильтрации анализируемая вода контактирует со стенками картриджа, из которых в воду (или растворитель при элюировании) попадают соединения, проявляющиеся потом на хроматограмме в виде отдельных пиков. В ходе исследования были установлены эти примеси – для картриджей фирмы Supelco, это четные алканы состава н-C_{14}, н-C_{16}, н-C_{18}, н-C_{20}, для картриджей Oasis – фталаты и также четные алканы. При хроматографическом анализе органических компонентов важно исключение на любом этапе пластифицированных изделий. Поэтому посуда для отбора воды используется исключительно стеклянная. К сожалению, на сегодняшний день нет стеклянных картриджей для ТФЭ. На рынке товаров аналитической химии можно найти по описанию стеклянные пустые картриджи для самостоятельной набивки сорбентом, как правило, это картриджи фирмы Agilent, однако, на деле они тоже изготовлены из пластика. Простое игнорирование четных алканов, поступивших из стенок патрона, – не лучший вариант, так как н-алканы, в том числе четные – характерны для природных вод, а молекулярно-массовое распределение углеводородов используется для оценки генезиса органического вещества. Механизм устранения этого загрязнения заключается либо в переносе сорбента в самодельные стеклянные картриджи, изготовленные из градуированных пипеток (наиболее предпочтительный вариант), либо в вычитании площади пика мешающего соединения из площади пика, установленного на хроматограмме природного компонента.

При кондиционировании картриджа с сорбентом (а также при элюировании) используются различные органические растворители, которые в разной степени растворяются в воде. Для более надежного контакта анализируемой воды с сорбентом необходимо удалять остатки растворителя после кондиционирования, а также остатки анализируемой воды после фильтрации, перед элюированием. Добиться этого можно высушиванием сорбента в токе инертного газа, например аргона. После кондиционирования сорбент необходимо просушить в токе аргона не менее 5–10 минут, с давлением 0,6–1,5 атмосферы. После внесения анализируемой воды, сорбент сушится в токе аргона не менее 25–30 минут, до полного осушения, тогда, при снятии аналитов растворителем, остатки воды не будут препятствовать контакту растворителя с сорбентом, что позволит эффективно извлечь целевые компоненты.

Органическое вещество в Тумнинских термальных водах. Пробы для анализа состава органических соединений были собраны в июне 2017 года В.Н. Компаниченко [9]. Были отобраны 4 пробы в течение недели из скважины № 8 Тумнинских терм, глубиной 532 м и температурой воды на выходе 46°С. Термальные воды Тумнинского района слабоминерализованные, щелочные, кремниевые, гидрокарбонатные натриевые. Растворенные газы представлены, в основном, атмосферным азотом с незначительной примесью других газов (O_2, CO_2, CH_4) [1, 7, 15]. С учетом вышеизложенных особенностей проведения ТФЭ и ГХ-МС был осуществлен хроматографический анализ проб Тумнинских терм, который показал наличие 73 растворенных органических компонентов, которые относятся к 12 гомологическим рядам. Максимальных относительных концентраций достигают алифатические углеводороды (н-, изо-, и цикло-алканы и терпены), а также ароматические и азотсодержащие углеводороды и эфиры карбоновых кислот. Среди н-алканов установлены соединения н-C_9–C_{31}, молекулярно-массовое распределение которых говорит об их бактериальном и растительном происхождении (индексы OEP и CPI значительно выше единицы – 1,8–4,9 и 2,3–2,8 соответственно).

Выводы. В результате многолетних исследований состава органического вещества в подземных и поверхностных водах Дальнего Востока хромато-масс-спектрометрическим методом, был обнаружен ряд особенностей при проведении пробоподготовки и инструментального анализа, которые могут влиять на конечный результат. Установлено, что в результате анализа природных вод капиллярная колонка теряет свои рабочие свойства из-за накопления высокомолекулярных соединений в узле ввода пробы, а также неправильного выбора времени анализа. Следует периодически подрезать капиллярную колонку и осуществлять холостые анализы. Кроме этого, при проколе септы шприцом автосэмплера в испаритель могут попасть соединения-загрязнители (фталаты), которые потом дают пики на хроматограммах. Устраняется частой заменой септы, лайнера и установкой более высокого значения обдува потоком гелия.

При использовании заводских картриджей ТФЭ, в экстракт заносятся примеси (четные алканы, фталаты), препятствующие оценке молекулярно-массового распределения углеводородов. Необходимо применять самодельные стеклянные патроны для ТФЭ. Кроме этого, следует хорошо высушивать сорбент перед каждым этапом в потоке инертного газа, так как это позволяет более эффективно извлекать целевые компоненты во время элюирования.

В результате исследования Тумнинского термального месторождения модифицированными методами ТФЭ и ГХ-МС установлено 73 органических соединения, среди которых преобладают алифатические углеводороды растительного и бактериального генезиса. Также широко распространены ароматические и азотсодержащие соединения и эфиры.

Автор благодарит Владимира Николаевича Компаниченко, к.г.-м.н., ведущего научного сотрудника ИКАРП ДВО РАН, за помощь в отборе проб воды Тумнинского месторождения.

Список литературы

1. Брагин И. В. Геохимия термальных вод Сихотэ-Алиня. Газовый аспект / И. В. Брагин, Г. А. Челноков // Вестник ДВО РАН. – 2009. – № 4. – С. 147–151.

2. Другов, Ю. С. Пробоподготовка в экологическом анализе / Ю. С. Другов, А. А. Родин. – СПб.: «Анатолия», 2002 – 755 с.

3. Зенкевич И. Г. Основы газохроматографической идентификации органических загрязнителей природной среды / И. Г. Зенкевич, Ю. С. Другов // Журнал аналитической химии. – 2013. – Т. 68. – № 10. – С. 940–956.

4. Компаниченко В. Н. Особенности химического состава вод Кульдурского термального поля / В. Н. Компаниченко, В. А. Потурай, В. Л. Рапопорт // Региональные проблемы. – 2009. – № 12. – С. 20–25.

5. Крылов В. А. Источники систематических погрешностей при газохроматографическом определении диалкил-о-фталатов в воде / В. А. Крылов, В. В. Волкова // Журнал аналитической химии. – 2015. – Т. 70. – № 5. – С. 510–516.

6. Крылов В. А. Определение эфиров о-фталевой кислоты в воде методом хромато-масс-спектрометрии с эмульсионным микроэкстракционным концентрированием / В. А. Крылов, В. В. Нестерова // Журнал аналитической химии. – 2016. – Т. 71. – № 8. – С. 809–817.

7. Кулаков В. В. Геохимия подземных вод Приамурья / В. В. Кулаков. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2011. – 254 с.

8. Лебеде, А. Т. Масс-спектрометрия в органической химии / А. Т. Лебедев. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2003. – 493 с.

9. Потурай В. А. Комплексная биогеохимическая характеристика термальных вод Тумнинского месторождения / В. А. Потурай, С. С. Строчинская, В. Н. Компаниченко // Региональные проблемы. – 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 22–30.

10. Потурай, В. А. Органическое вещество в гидротермальных системах разных типов и обстановки / В. А. Потурай // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 6–16.

11.Потурай В. А. Состав и распределение н-алканов в азотных термах Дальнего Востока России / В. А. Потурай // Тихоокеанская геология. – 2017. – Т. 36. – № 4. – С. 109–119.

12. Потурай В. А. Сравнение химического состава термальных, сточных и грунтовых вод Кульдурского района / В. А. Потурай // Региональные проблемы. – 2010. – Т. 13. – № 2. – С. 92–96.

13. Рапопорт В. Л. Загрязнение реки Амур антропогенными и природными органическими веществами / В. Л. Рапопорт, Л. М. Кондратьева // Сибирский экологический журнал. – 2008. – № 3. – С. 485–496.

14. Рапопорт В. Л. Экспрессное определение нитробензола в природной воде методом ВЭЖХ / В. Л. Рапопорт, Т. И. Пелых, Г. Ф. Золотухина, Н. В. Бердников // Вестник ДВО РАН. – 2007. – № 2. – С. 146–150.

15. Чудаев О. В. Геохимия термальных вод Сихотэ-Алиня / О. В. Чудаев, В. А. Чудаева, И. В. Брагин // Тихоокеанская геология. – 2008. – Т. 27. – № 6. – С. 73–81.

16. Шостова Е. М. Хромато-масс-спектрометрическое исследование состава органических компонентов воды р. Амур за период 2007–2016 годы / Е. М. Шостова, А. П. Неудачин, В. Л. Рапопорт // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития». М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2017. – С. 447–448.

17. Kompanichenko V. N. Organic matter in hydrothermal systems on the Russian Far East in the context of prebiotic chemistry / V. N. Kompanichenko, V. A. Poturay, V. L. Rapoport // Origins of life and evolution of biospheres. – 2010. – V. 40. – № 6. – P. 516–517.

18. Soniassy R. Water analysis: Organic micropollutants / R. Soniassy, P. Sandra C. Schlett. – Germany: Hewlett-Packard Company, 1994. – 278 p.

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ. СЕЙСМИЧНОСТЬ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА. НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВЗАИМОСВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ

Светлаков А.А., Добрынина А.А., Алексеев С.В., Алексеева Л.П.
Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: svetlakov@crust.irk.ru

Аннотация. Проведен анализ фондовых материалов по динамике уровня подземных вод в наблюдательных скважинах Байкальского региона на предмет выявления гидрогеологических предвестников землетрясений. По результатам исследования выделены четыре аномалии в уровенном режиме подземных вод, которые связаны с тектоническим сжатием и повышением пластового давления. Приводятся данные о связи гидрогеологических предвестников с параметрами последующих землетрясений.

Ключевые слова: *гидрогеологические предвестники, землетрясения, геоинформационные технологии.*

Abstract. An analysis of hydrogeological data on the groundwater levels in monitoring wells in the Baikal region has been conducted to identify hydrogeological precursors of earthquakes. The study identified four anomalies of groundwater level rise associated with tectonic compression and increased formation pressure. Data on the correlation between hydrogeological precursors and parameters of subsequent earthquakes are provided.

Key words: *hydrogeological precursors, earthquake, geoinformation technology.*

В течение многих лет совместные усилия гидрогеологов и сейсмологов направлены на изучение роли воды в сейсмических процессах, включая воздействие гидрогеологических условий на сейсмичность различных регионов, поиски гидрогеологических предвестников землетрясений, влияние землетрясений на подземные воды, прогноз сильных землетрясений на основе гидрогеологических предвестников.

Сейсмичность воздействует на подземные воды в результате изменения напряженно-деформированного состояния водовмещающих горных пород и сопровождается развитием трещинной дилатансии, возникновением новых путей фильтрации, миграцией химических соединений, перераспределением пластового давления, изменением гидродинамических и физико-химических параметров подземной гидросферы.

Изменения в гидрологическом режиме поверхностных водотоков, связанные с землетрясениями, фиксировались на протяжении еще несколько тысячелетий назад (Плиний, 79 г. н.э.), а резкое падение уровня воды в скважинах после Великого землетрясения на Аляске 1964 г. дало толчок к развитию нового научного направления в мировой науке - «earthquake hydrology» [1, 2].

Начиная с 1970-х гг., при проведении гидрогеологических наблюдений в сейсмоактивных регионах фиксировалось изменение в режиме подземных вод под влиянием землетрясений. Оно проявлялось в виде ко- и постсейсмических событий. Для систематического инструментального наблюдения за параметрами подземных вод в Средней Азии, Казахстане, Дагестане, Закавказье, на Байкале, Камчатке, Курилах, Сахалине была организована сеть гидрогеосейсмологических прогностических полигонов. Она успешно функционировала совместно с сетью сейсмических станций вплоть до распада СССР.

В настоящее время усилия российских и зарубежных ученых направлены на развитие научно-методических основ гидрогеологического метода мониторинга геологической среды и поиска предвестников землетрясений, типизацию вариаций параметров режима подземных вод, созданию феноменологических моделей гидрогеодинамических и гидрогеохимических процессов, активизирующихся до- и после сейсмических событий, оценке связи между гидрогеологическими

предвестниками и вариациями сейсмичности, современными деформациями земной коры на стадиях подготовки землетрясений различной интенсивности [3-17].

Примечательно, что гидрогеосейсмологические исследования возродились в Байкальском регионе, характеризующимся повышенной сейсмической активностью. Здесь силами ФГБУ «Гидроспецгеология» и ИЗК СО РАН уже организована сеть мониторинговых наблюдений в скважинах на опорных полигонах.

В аспекте тектонического развития для Байкальского региона характерны разломы глубокого заложения, определяющие конфигурацию геосинклиналей. Данные разломы можно разделить на краевые и внутригеосинклинальные, а также на первичные и вторичные. Современное тектоническое развитие можно охарактеризовать как незавершенное, что выражается в высоких показателях сейсмичности. В годовом цикле регистрируется до 10 тысяч землетрясений различного энергетического класса. Сейсмичность Байкальского региона сосредоточена в узкой полосе вдоль рифтовых впадин и приурочена к верхней и средней коре – максимальное количество гипоцентров сосредоточено на глубинах до 15 км.

Согласно данным сейсмического районирования, в Байкальском регионе существует высокая вероятность - до 99 % (ОСР–97–С) повторения землетрясений в ближайшие 50 лет с магнитудой до 10 баллов. Для основной территории магнитуда землетрясений не должна превысить 8–9 баллов в соответствии с картой ОСР–97–В [18, 19].

Сложные тектонические условия в совокупности с высокой сейсмической активностью требуют изучения и накопления знаний о влиянии сейсмических процессов на подземную гидросферу. Изменения в сейсмических очагах находят свое отражение в параметрах подземных вод как до землетрясения, так и после сейсмического события. Кроме того, чем сильнее землетрясение, тем больший объем среды и большее время подготовки оно занимает, что позволяет дать характеристику гидрогеологическим предвестникам землетрясений на данной территории.

В настоящей работе приведены результаты анализа массива данных об уровне подземных вод на пунктах гидрогеологического мониторинга в пределах Байкальского региона. Они сопоставлены с текущей сейсмической активностью.

Согласно фондовым данным ФГБУ «Гидроспецгеология» на территории Байкальского региона расположено 13 пунктов наблюдений (Листвянка, Исток, Култук, Байкальский ЦБК, Хужир, Селенгинск, Сотников, Усть-Баргузин, Большое Голоустное, Еланцы, Бабушкино, Слюдянка и Солзан), которые находятся в зоне влияния основных разломов: Главного Саянского, Кичерского, Приморского, Морского и Обручевского [20]. Для сопоставления использовались параметры землетрясений, произошедших на расстоянии не более 150 км от пункта наблюдения (рис. 1)

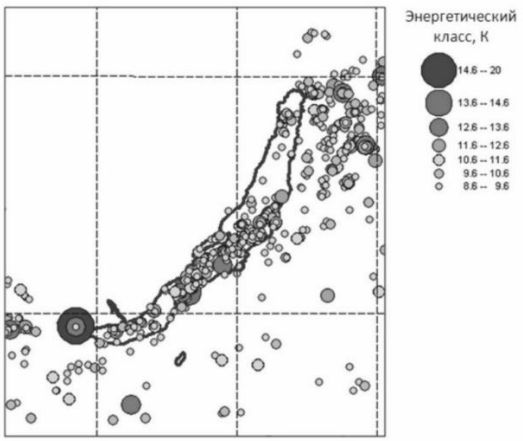


Рис. 1. Сейсмичность центральной части Байкальского региона в 2016-2020 гг.

В период с 2016 по 2020 гг. на нескольких водопунктах зафиксировано аномальное повышение уровня подземных вод, которое нельзя связать с сезонным колебанием (рис. 2). Первая аномалия можно прослеживается с августа по октябрь 2016 г. в гидрогеологических скважинах Листвянки, Байкальского ЦБК, Култука и Истока. Она имеет два характерных пика роста и соответствующие им землетрясения. На начальном этапе уровень подземных вод в отдельных скважинах повысился на 0.4 м в течение двух суток. Землетрясение произошло 29.08.2016 г., энергетический класс которого составил К=10.4. Второй пик (26.10.2016 г.) имел меньшую амплитуду, рост уровня составил 0.2 м, а энергетический класс землетрясения - К=10.7.

Вторая аномалия зафиксирована в скважинах Листвянки, Байкальского ЦБК, Култука, Истока и Сотниково. Землетрясение произошло 24.09.2017 г. Энергетический класс землетрясения К=10, магнитуда М=3.3. Выделяется один характерный пик с резким поднятием уровня подземных вод на величину до 0.2 м за несколько суток.

Третья аномалия также имеет один пик роста уровня подземных вод, который зафиксирован сентябре-октябре 2019 г. в скважинах Листвянки, Байкальского ЦБК, Култука, Селенгинска, Сотниково, Большого Голоустного, Еланцов, Бабушкина, Слюдянки и Солзана. Землетрясение произошло 10.10.2019 г., энергетический класс К=11.9. Уровень подземных вод в среднем повышался на 0.3-0.5 м, в отдельных случаях до 3.0 м, период роста составил 2-4 суток.

Четвертую аномалию можно связать с Быстринским землетрясением, произошедшем 21.09.2020 г. Повышение уровня подземных вод отмечено в скважинах Листвянки, Байкальского ЦБК, Култука, Селенгинска, Сотниково, Еланцов, Бабушкина, Слюдянки, Солзана и Хужира. Помимо увеличения уровня подземных вод в пунктах мониторинга, сотрудниками Института земной коры СО РАН фиксировались очаги разгрузки подземных вод на обширной территории задолго до землетрясения [21]. При магнитуде М=5.6 и энергетическом классе К=14.6 землетрясения уровень подземных вод повысился на 0.4-0.5 м, а период роста составил трое суток.

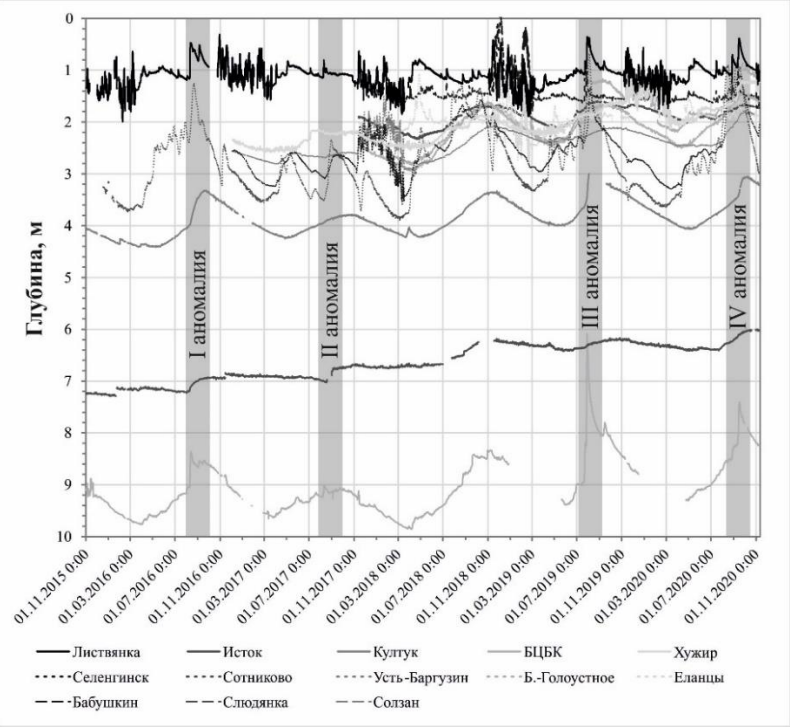


Рис. 2. Динамика уровня подземных вод в скважинах по данным мониторинга 2015-2020 гг.

Во всех четырех событиях тип деформаций направлен на сжатие, рост пластового давления и повышение уровня воды. Все это связано с упругим сжатием среды, уменьшением емкости пор и трещин, что привело к возрастанию пластового давления и к резкому повышению уровня подземных вод [22]. Анализ временных вариаций сейсмической активности в выбранных районах показал, что каждой аномалии уровня подземных вод соответствуют близкие сильные и умеренные землетрясения с энергетическим классом от 12 и выше. Форма аномалий уровня подземных вод несимметрична – каждая аномалия начинается с резкого скачка, а затем уровень медленно понижается, достигая фонового значения.

Стоит отметить, что повышение уровня подземных вод наблюдается за достаточно значительный промежуток времени до землетрясения, что свидетельствует о сложном поведении геологической среды в процессе подготовки землетрясения: процесс консолидации среды и закрытия разломов происходит очень быстро (этот момент согласуется с резким увеличением уровня воды), затем наблюдается снижение уровня подземных вод, что может быть связано с активизацией вторичных разломов в очаговой области и разгрузкой напряжений в районе пункта мониторинга.

Созданная инфраструктура мониторинга и установленная связь проявлений гидрогеологических предвестников с параметрами сильных землетрясений составляют научно-техническую основу для включения данного комплексного метода в разработку геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф для Байкальского региона.

Список литературы

1. Ingebritsen, S. E. Earthquake hydrogeology / S. E. Ingebritsen, M Manga; Water Resources Research – 2019. 55(7). – P. 5212–5216.

2. Wang, CY. Earthquakes and water / CY. Wang, M. Manga; Berlin – Heidelberg: Springer, 2010. – 228 p.

3. Копылова, Г.Н. Оценка деформационных свойств системы “пласт-скважина” на основе анализа барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине / Г.Н. Копылова, Э.М. Горбунова, С.В. Болдина, Д.В. Павлов; Физика Земли – 2009. № 10. – С. 69–78.

4. Виноградов, Е.А. Мониторинг уровня подземных вод по данным прецизионных измерений / Е.А. Виноградов, Э.М. Горбунова, Н.В. Кабыченко и др.; Геоэкология – 2011. № 8. – С. 439–449.

5. Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // Физика Земли – 2011. № 12. С. 50–62.

6. Besedina, A. Chilen Earthquakes: Aquifer Responses at the Russian Platform / A. Besedina, E. Vinogradov, E. Gorbunova, I. Svintsov; Pure and Applied Geophysics – 2016. 173(2). – P. 321–330.

7. Копылова, Г.Н. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. / Г.Н. Копылова, С.В. Болдина // Вулканология и сейсмология – 2019. – С. 3–20

8. Копылова, Г.Н. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки / Г.Н. Копылова, С.В. Болдина; Камчатпресс. – Петропавловск-Камчатский, 2019. – 144 с..

9. Горбунова, Э.М. Прецизионный гидрогеологический мониторинг в техногенно-нарушенных условиях: организация, проведение и обработка экспериментальных данных / Э.М. Горбунова, А.Н. Беседина, Н.В. Кабыченко и др.; Сейсмические приборы. – 2021. Т. 57(2). – С. 62–80.

10. Горбунова, Э.М. Реакция водонасыщенных коллекторов на динамическое воздействие (по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод) / Э.М. Горбунова, А.Н. Беседина, Н.В. Кабыченко, И.В. Батухтин, С.М. Петухова и др.; Физика Земли. – 2021. № 5. – С. 74–90.

11. Gorbunova, E. Large-Scale Explosion and Induced Seismicity: Geological, Structural, and Hydrogeological Impacts / E. Gorbunova; Pure and Applied Geophysics – 2021. 178 (4). – P. 1223–1234.

12. Wang, CY. Liquefaction beyond the near field / CY. Wang; Seismological Research Letters – 2007. 78(5). – Pp. 512–517.

13. Wang, CY. Earthquakes and Water / CY. Wang, M. Manga; Berlin – Heidelberg: Springer, 2010. – 228 p.

14. Biagi, PF. Groundwater Ion Content Precursors of Strong Earthquakes in Kamchatka (Russia) / PF. Biagi, A. Ermini, SP. Kingsley, YM. Khatkevich, EI Gordeev; Pure and Applied Geophysics. – 2000. Vol. 157. – P. 1359–1377.

15. Biagi, P.F. Hydrochemical Precursors in Kamchatka (Russia) related to the Strongest Earthquakes in 1988–1997 / P.F. Biagi, A. Ermini, E. Cozzi, Y.M. Khatkevich, E.I. Gordeev; Natural Hazards. – 2000. Vol. 21. – P. 263–276.

16. Hartmann, J. Hydrogeological and Gasgeochemical Earthquake Precursors / J. Hartmann, J. Levy; A Review for Application. Natural Hazards – 2005. 34(3). – P. 279–304.

17. Martinelli, G. Previous, Current, and Future Trends in Research into Earthquake Precursors in Geofluids / G. Martinelli; Geosciences – 2020, 10(5). – P. 1–22.

18. Dobrovolsky, I.P. Calculation of Radon (Fluid) Precursors of Tectonic Earthquake / I.P. Dobrovolsky; Open Access Library Journal. – 2023. Vol. 10. – P. 1–8.

19. Уломов, В.И. Новый комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации-ОСР-12 / В.И. Уломов, М.И. Богданов // Инженерные изыскания, 1999. – С 30-39.

20. Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / Под ред. В.П. Солоненко. – Новосибирск: Наука, 1981. – 168 с.

21. Интернет ресурс – https://specgeo.ru/

22. Семинский, К. Ж. Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09. 2020г., MW= 5.4): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты / К. Ж. Семинский, С. А. Борняков, А. А. Добрынина и др. // Геология и геофизика; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т геологии и минералогии им. В.С. Соболева. Новосибирск, 2021. – С. 727-743.

23. Пиннекер, Е.В. Основы гидрогеологии. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах / Е.В. Пиннекер, Б.И. Писарский, С.Л. Шварцев, В.Г. Ясько, А.А. Дзюба, И.Г. Киссин, В.П. Зверьев, И.С. Ломоносов, О.Н. Толстихин, Н.А. Журавель, А.Д. Назаров, Ж. А. Герасимова; отв. ред. Е.В. Пиннекер – Новосибирск: Наука, 1982. – 240 с.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВОДОЗАБОРА НОВОСИБИРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА

Сухорукова А.Ф.[1,2], Плаксина Н.А.[3], Яндола Н.И.[1,2]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск

[3] ФГУП Управление энергетики и водоснабжения, Новосибирск

Аннотация. Анализ данных химического состава подземных вод за длительный период (более 60 лет) эксплуатации водозабора Новосибирского научного центра и результатов 2023 года, полученных лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН свидетельствует о стабильности макрокомпонентного состава подземных вод. Воды гидрокарбонатные магниево-кальциевые с минерализацией подземных вод в диапазоне значений 200 – 400 мг/дм^3, общей жескостью от 4 до 7,8 мг-экв/дм^3. Характерная особенность вод инфильтационного водозабора участка «Береговой-1» существенное превышение ПДК (в 5-18 раз) концентрации железа, при среднем значении 3,2 мг/дм^3 и марганца, что предопределяет обязательную водоподготовку перед подачей населению. Содержание марганца в среднем составляет 0,45 мг/дм^3, превышение ПДК в отдельные годы достигало 8 раз, концентрация мышьяка превышала ПДК в два и более раза. Воды участка «Зырянка» соответствуют санитарным нормам по качеству, за исключением превышения концентрации радона, которая может достигать 95 Бк/дм^3.

Ключевые слова: *геохимия подземных вод, концентрация железа, марганца, радона, водозабор Новосибирского научного центра*

Abstract. Analysis of data on the chemical composition of groundwater for a long period (more than 60 years) of operation of the water intake of the Novosibirsk Scientific Center and the results of 2023 obtained by the Laboratory of Hydrogeology of Sedimentary Basins of Siberia, INGG SB RAS, indicates the stability of the macrocomponent composition of groundwater. Hydrocarbonate magnesium-calcium waters with groundwater mineralization in the range of 200 – 400 mg/dm^3, total hardness from 4 to 7.8 mg-eq/dm^3. A characteristic feature of the water from the infiltration water intake of the Beregovoy-1 site is a significant excess of the maximum permissible concentration (5-18 times) of the concentration of iron, with an average value of 3.2 mg/dm^3 and

manganese, which predetermines mandatory water treatment before supply to the population. The average manganese content is 0.45 mg/dm3, the excess of the MPC in some years reached 8 times, in some years the concentration of arsenic exceeded the MPC two or more times. The waters of the Zyryanka site meet sanitary quality standards, with the exception of exceeding the concentration of radon, which can reach 95 Bq/dm^3.

Key words: *geochemistry of groundwater, concentration of iron, manganese, radon, water intake of the Novosibirsk Scientific Center*

Введение

Город Новосибирск один из крупнейших по численности (1635 тыс. человек) населения и площади городов России, водоснабжение большей его части осуществляется пятью насосно-фильтровальными станциями из реки Обь. При создании Новосибирского Научного Центра (ННЦ), расположенного удаленно (на расстоянии 25 км) от центра города, был разработан и реализован проект инфильтрационного линейного водозабора на правом берегу одноименного водохранилища (рис. 1). Изучение территории, на которой расположен водозабор ННЦ, началось в конце 40-х годов прошлого века, в связи со строительством Новосибирской ГЭС, с конца 50-х годов работы вела Боровая партия НГПЭ, в 1957 году была пробурена первая эксплуатационная скважина действующего ныне водозабора. Большой вклад в изучение гидрогеологических условий территории, качества и запасов подземных вод для питьевого водоснабжения внесли новосибирские гидрогеологи Бейром С.Г., Карпицкий И.П., Примачек А.Д., Филлипов В.А., Косс Л.Н., Корявова В.А., Вязунова С. А., Кусковский В.С., Тарасов Г.П., Плаксина Н.А. и многие другие. В 1990-е годы была реализована программа «Окружающая среда и экологическая обстановка в Новосибирском научном центре СО РАН», изучалась распространенность тяжелых металлов в водозаборах ННЦ геохимиками ОИГГМ СО РАН Аношиным Г.Н., Воротниковым Б.А., которые отмечали существенное превышение ПДК для железа, марганца, незначительное и периодическое для мышьяка и бария [1].

В настоящее время эксплуатируются участки «Береговой-1» и «Зырянка» Основная часть водозабора ННЦ (участок «Береговой-1») является инфильтрационным и представляет собой ряд скважин вблизи береговой линии водохранилища, расстояние от скважин уреза воды не более 200 м, длина водозаборного ряда скважин составляет 1200 м (рис. 1). Ближайшее расстояние от скважин водозабора до водопотребителя, то есть Академгородка, составляет 850 м. Водозабор подземных вод участка «Зырянка» расположен в долине р. Зырянка, на расстоянии 1,3 км от берега водохранилища.

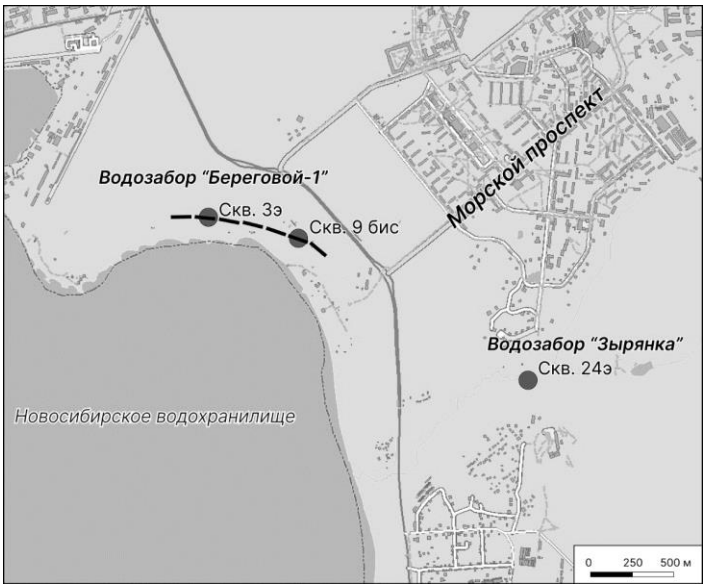


Рис. 1. Местоположение участков «Береговой-1» и «Зырянка» водозабора ННЦ. Вынесены скважины годового мониторинга 2023 года, выполненного специалистами ИНГГ СО РАН.

Геолого-гидрогеологические условия

В геологическом отношении район расположен в пределах области погружения Колывань-Томской складчатой зоны. В ее строении принимают участие породы юргинской свиты верхнедевонского возраста и залегающего на них комплекса четвертичных отложений надпойменных террас р. Оби. Геологическое строение характеризуется относительно близким залеганием палеозойского фундамента (от 33 до 45 м) и наличием песчано-гравийных аллювиальных отложений р. Оби. Палеозойские отложения представлены глинистыми сланцами юргинской свиты, которые разбиты многочисленными тонкими трещинами, мощность зоны интенсивной трещиноватости достигает 25 м [2]. К отложениям юргинской свиты приурочены трещинные воды. На большей части территории в долине р. Оби, где отсутствует кора выветривания, подземные воды палеозойских пород гидравлически связаны с подземными водами аллювиальных отложений и эксплуатируются совместно. Питание трещинных вод палеозоя осуществляется за счет, как инфильтрации атмосферных осадков, так и поступления поверхностных вод из водохранилища.

Водозабор «Береговой-1» расположен на IV надпойменной террасе р. Оби, литологический состав отложений неоднороден, как в вертикальном, так и горизонтальном разрезе и представлен в основном разнозернистыми песками мощностью от 6 до 15 м. Водозабор «Зырянка» на III надпойменной террасе, со схожим строением водоносного горизонта.

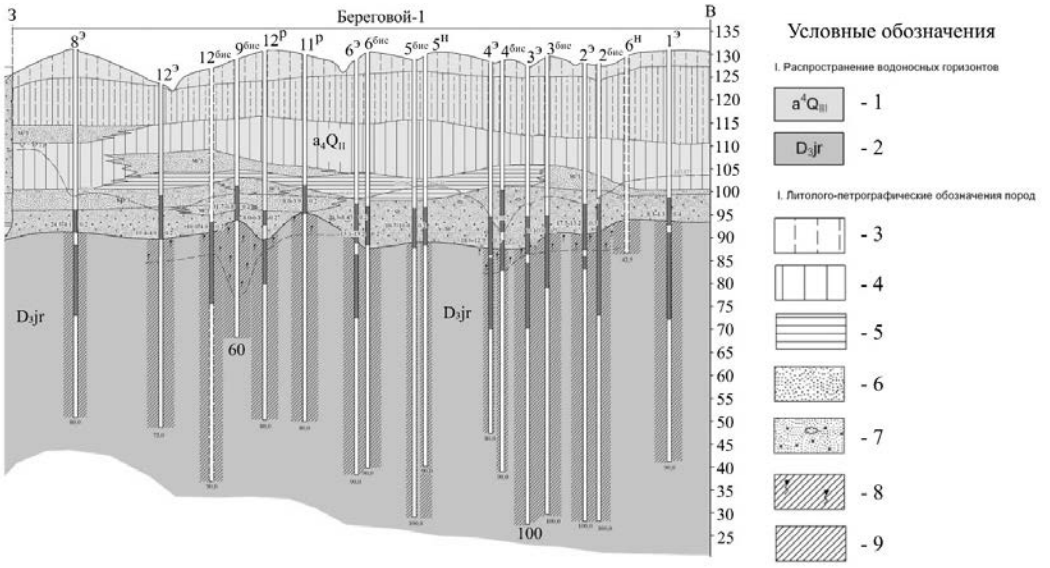


Рис. 2. Геолого-гидрологический разрез участка «Береговой-1» (материалы предоставлены Плаксиной Н.А.).Водоносный горизонт: 1 - IV надпойменной террасы р. Оби, 2 – осадочно-терригенных пород юргинской свиты; 3- супеси,4- суглинки, 5- глины, 6 – пески, 7 – гравийно-галечниковые отложения, 8 – глинистые сланцы сильно разрушенные, 9 – глинистые сланцы трещиноватые

Гидрохимические условия участков «Береговой 1» и «Зырянка»

Гидрогеохимические исследования водозабора ННЦ продолжают серию наших работ по выявлению природы радиоактивности подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области [3-6]. С начала эксплуатации водозабора проводилась оценка качества подземных вод для централизованного питьевого водоснабжения, режимные наблюдения за уровнем, выполнялась переоценка запасов различными гидрогеологическими партиями НГПЭ. В настоящей работе использованы материалы: фондовые ТФГИ по Сибирскому федеральному округу и ФГУП «Управления энергетики

и водоснабжения» (ФГУП УЭВ) г. Новосибирска и результаты полного химического анализа вод трех скважин, отобранных в течении 2023 года сотрудниками лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН. Во время отбора проб в течение года непосредственно на объектах было выполнено определение быстроизменяющихся компонентов pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2, HCO_3^- и радона. Последующее лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП), проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ (г. Томск). В таблице 1 представлены средние значения химического состава вод водозаборных скважин по многолетним данным Плаксиной Н.А., Тарасова Г.П., Аношина Г.Н., Воротникова Б.А. и результатам гидрогеохимического мониторинга ИНГГ СО РАН 2023 года.

Исследуемые подземные воды залегают в гидродинамической зоне активного водообмена, глубина которой в границах характеризуемого района составляет порядка 80-100 метров. Для нее характерно в первую очередь растворение и выщелачивание алюмосиликатных пород (песчано-глинистые сланцы верхнего палеозоя). Этим обуславливается преобладание в подземных водах гидрокарбонатов кальция и магния при величине общей минерализации 0,3 – 0,4 г/дм^3. По своему химическому составу подземные воды преимущественно гидрокарбонатные магниево-кальциевые. Содержания микрокомпонентов в подземных водах, в целом сравнительно низкие.

Участок «Береговой-1». По данным ФГУП УЭВ органолептические показатели качества вод не соответствуют нормативным требованиям по запаху (сероводорода), мутности и цветности, что обусловлено высоким содержанием в подземных водах железа и марганца. Характеристика химического состава подземных вод приводится по данным массива данных для скважин 3э и 9бис, состоящего из 184 анализов подземных вод, выполненных в период эксплуатации водозабора на участке недр «Береговой-1» в период 1958-2015 гг. и в 2023 году (табл. 1). В качественном отношении подземные воды гидрокарбонатные магниево-кальциевые с величиной сухого остатка в среднем 295 мг/дм^3.

Общая жёсткость воды варьирует в диапазоне значений 4,1-5,8 при средней величине 4,9 мг-экв/дм^3. Величина pH характеризуется слабощелочной реакцией среды и в среднем составляет 7,42. При отборе проб воды в 2023 году, непосредственно на месте отбора были замерены быстроизменяющиеся компоненты, при этом показатель Eh в среднем составляет – 67,5 мВ, что соответствует восстановительной среде, для которой характерно наличие сероводорода, повышенное содержание железа, марганца и мышьяка. Результаты многолетних наблюдений это подтверждают. Содержание железа за длительный существенно превышает ПДК (в 5-18 раз), при среднем значении 3,2 мг/дм^3. Содержание марганца в среднем 0,45 мг/дм^3, превышение ПДК в отдельные года достигало 8 раз. Из азотистых веществ в значимых количествах отмечается наличие иона-аммония (в среднем 1,2 мг/дм^3). Для вод участка характерна низкая фтороносность, концентрация фтора – 0,2-0,3 мг/дм^3. Согласно имеющимся данным концентрации практически всех токсичных компонентов не превышают ПДК за исключением повышенного содержания марганца, железа и мышьяка. Радиационная безопасность подземных вод и их насыщенность радоном не превышают допустимые уровни, установленные СанПиН [7] (табл. 1). Воды участка Береговой по единому водоводу подаются на станцию обезжелезивания и дальнейшей очистки, затем – населению.

Участок «Зырянка». Органолептические показатели качества воды соответствуют нормативным требованиям по запаху, цветности и мутности и характеризуются очень хорошими вкусовыми качествами, что обусловлено, в первую очередь, низким содержанием в них железа. В качественном отношении подземные воды гидрокарбонатные магниево-кальциевые с величиной сухого остатка в среднем по водозабору 350 мг/дм^3 (см. табл. 1). Общая жёсткость воды стабильно составляет около 6,7 мг-экв/дм^3. Величина pH характеризуется слабощелочной реакцией среды, в среднем

составляет 7,6. Показатель Eh больше +150 мВ, что соответствует окислительной геохимической обстановке. Содержание железа невелико - среднее 0,12 мг/дм^3, что обеспечивает высокие вкусовые качества воды. Средние концентрации марганца в скв. 24э незначительно превышают ПДК (по результатам 2000-2011 годов), по данным за 2023 год концентрация марганца составляет 0,07 мг/дм^3.

Таблица 1. Химический состав (средние значения) подземных вод участков «Береговой-1» и «Зырянка»

Показатель	Единицы измерения	Скважина, период отбора (число проб)						ПДК
		Участок «Береговой-1»				Участок «Зырянка»		
		3 э		9 бис		24 э		
		1958-2015 гг (134)	2023 г (4)	1983-2015 гг (51)	2023 г (4)	2000-2011 гг (21)	2023 г (4)	
pH		7,34	7,63	7,50	7,70	7,60	7,59	6-9
Об.ж.	мг-экв/дм^3	5,8	5,2	4,1	4,7	6,7	6,7	7
HCO_3^-	мг/дм^3	370,4	312,6	270,8	290,6	448,0	400,7	
SO_4^{2-}		6,3	4,1	8,8	4,9	10,7	16,9	500
Cl^-		7,7	5,2	7,7	5,0	11,2	14,4	350
Ca^{2+}		80,9	78,2	60,1	73,8	96,7	103,7	
Mg^{2+}		19,8	15,7	18,0	13,2	22,3	19,0	
Na^++K		16,9	8,9	5,3	7,6	20,3	14,4	
M		334	426	236	395	350	569	1000
NH_4		1,2	0,8	1,2	0,6	0,05	0,05	1,5
NO_2		0,11	0,02	0,03	0,02	0,003	0,02	3,3
NO_3		0,84	0,10	0,34	0,17	2,40	1,87	45
П.ок.		3,18	1,98	2,17	1,78	1,32	0,45	5
F		0,30	0,21	0,31	0,22	0,16	0,20	1,5
Si		8,42	7,51	4,76	6,71	6,3	6,6	10
Mn		**0,48**	**0,29**	**0,41**	**0,30**	**0,16**	0,07	0,1
Fe		**3,50**	**1,65**	**2,93**	**1,08**	0,12	0,17	0,3
Zn		<0,005	0,048	<0,005	0,0006	0,0005	0,002	1
Cu		<0,02	0,0008	<0,02	0,0003	0,002	0,001	1
As		**0,025**	**0,018**	**0,021**	**0,016**	0,0005	0,0006	0,01
Al		0,01	0,0007	0,02	0,0006	0,0015	0,0017	0,2
B		<0,05	0,068	<0,05	0,051	<0,05	0,04	0,5
Ba		0,08	0,09	0,085	0,09	0,03	0,02	0,7
Hg		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0005
U		н/д	0,00004	н/д	0,00003	н/д	0,004	0,015
^{222}Rn	Бк/дм^3	15	22	18	28	**73**	**88**	60
α- акт		0,07	н/д	<0,01	н/д	0,075	н/д	0,2
β- акт		0,1	0,02	0,01	0,01	0,24	0,27	1,0

Примечание: М- величина общей минерализации, Об.ж. - общая жесткость, П.ок. - перманганатная окисляемость, н/д – нет данных, жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК.

Радиационная безопасность подземных вод и их насыщенность радионуклидами, как в пластовых условиях в скважинах, так и в разводящей сети, оценивалась по показателям удельной суммарной α – и β – активности и активности радона (см. табл. 1). Показатели α – и β –активности, по водозабору "Зырянка" не превышают ПДК. Повышенное содержание радона в подземных водах водозаборного участка "Зырянка" является характерной чертой их качественного состава, активность которого не превышает 95 Бк/дм^3. Учитывая недлительный период полураспада радона (3,8 сут), в воде подаваемых потребителям концентрации радона снижаются до величин в среднем 50 Бк/дм^3. Воды водозабора «Зырянка» подаются населению без водоподготовки,

разводящая сеть является пусть и примитивной, но системой водоподготовки, позволяющей освободить подземные воды от радона.

В заключении необходимо отметить, что данные многолетних мониторинговых наблюдений (выполненными различными организациями города Новосибирска) и результаты, полученным лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СОРАН, показывают, что в течение длительного периода эксплуатации качественный состав подземных вод в целом остается постоянным.

Полевые и аналитические работы выполнены при финансовой поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Список литературы

1. Аношин, Г.Н. Оценка загрязненности питьевых вод и природных вод Академгородка тяжелыми металлами / Г.Н. Аношин, Б.А. Воротников; Окружающая среда и экологическая обстановка в Новосибирском научном центре СО РАН. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1995. – С. 89-109.

2. Кусковский, В.С. Оценка запасов подземных вод инфильтрационного водозабора: Математическое моделирование / В.С. Кусковский, А.А. Кашеваров, С.Т. Рыбакова; – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 156 с.

3. Novikov, D.A. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, Yu.G. Kopylova, A.N. Pyryaev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachev, A.F. Sukhorukova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh, A.A. Khvashchevskaya, P.N. Kalinkin, A.V. Petrozhitsky; Groundwater for Sustainable Development. – 2023. V. 20. – 100886.

4. Новиков, Д.А. Об открытии слаборадоновых вод – Инские источники / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, А.Ф. Сухорукова, Л.Г. Вакуленко, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, А.Н. Фаге, А.А. Хващевская, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, М.С. Мельгунов, П.Н. Калинкин, С.А. Растигеев; Геология и геофизика. – 2022. Т. 63. № 12. – С. 1714-1733.

5. Новиков, Д.А. Об открытии слаборадоновых вод – Седова Заимка / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, А.Ф. Сухорукова, Ф.Ф. Дульцев, А.С. Деркачев, А.В. Черных, А.А. Хващевская; Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. Т. 333. № 12. – С. 61-73.

6. Novikov, D.A. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachyov; Groundwater for Sustainable Development. – 2021. V. 15. – 8 p.

7. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий (с изменениями на 26 июня 2021 года). – М., 2021. – 65 с.

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД ИСТОЧНИКА МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ДАБАН-ГОРХОН

Украинцев А.В., Плюснин А.М., Жамбалова Д.И.
Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, ukraintsev87@bk.ru

Аннотация. В статье рассмотрены условия формирования и особенности химического состава вод железистого углекислого источника Дабан-Горхон. Приведены новые данные о микроэлементном составе воды и конденсационной влаги, отобранной на территории, непосредственно прилегающей к месту разгрузки источника. Рассчитаны коэффициенты водной миграции микроэлементов. Выход источника приурочен к тектоническому нарушению взбросового типа северо-восточного простирания, значительную роль в формировании химического состава воды играют трещинно-жильные воды, миграция которых происходит в пределах разрывных нарушений.

Ключевые слова: *железистые углекислые минеральные воды, конденсат, микроэлементный состав вод, редкоземельные элементы.*

Abstract. The article discusses the formation conditions and chemical composition features of the ferruginous CO_2-rich mineral spring Daban-Gorkhon water. New data are presented on the water trace element composition and on the condensation moisture composition taken from the territory immediately adjacent to the place of the spring discharge. The trace element water migration coefficients were calculated. The spring is confined to the reverse fault with a north-eastern strike; fissure-vein waters, migrating within the faults area, play a significant role in the water composition formation.

Key words: *ferruginous CO_2-rich mineral water, condensation moisture, trace element water composition, rare earth elements.*

Источник минеральных вод Дабан-Горхон (52°25′277″N 111°48′422″E) находится в 22 км к юго-востоку от с. Сосново-Озёрское Еравнинского района Бурятии, на левом берегу р. Уды, в 2 км от ее русла. Родник восходящий, разгружается в правом борту пади Дабан-Горхон в воронку, достигающую 10-12 м в диаметре. Выход источника расположен у подножия склона, в лощине, которая протягивается с северо-востока от угольного месторождения. Дебит родника составляет 0,6-0,7 л/сек [1]. Вдоль ручейка, берущего начало от источника, имеются охристые и коричневые отложения и биоматы. Результаты исследования микробных сообществ воды и донных осадков источника Дабан-Горхон показали широкое распространение в исследуемых сообществах бактерий цикла железа, что определяется присутствием железа в воде [2]. Возле выхода источника построены несколько небольших домиков и примитивные ванны, вода используется местным населением для лечения.

Источник Дабан-Горхон находится в поле распространения угленосных пород гусиноозерской серии, в которую входят селенгинская и сангинская свиты. Они представлены песчаниками, конгломератами, алевролитами, углями. В районе выхода минеральных вод присутствуют участки редкоземельной, тантал-ниобиевой и медной минерализации. Дабан-Горхонское месторождение бурых углей расположено к северо-востоку от источника в бассейне среднего течения ручья Дабан-Горхон. Угленосный пласт состоит из четырех пачек, каждая мощностью от 14 до 21 м. Прослои пород мощностью от 0,5 до 3 м, разделяющие угольные пачки, представлены плотными алевролитами и аргиллитами, в которых по слоистости отмечается уголь в виде тончайших прослоек. Угли Дабан-Горхонского месторождения относятся к классу зрелых бурых гумусовых углей с содержанием углерода в органической массе в среднем 71%. Запасы бурого угля Дабан-Горхонского месторождения составляют около 34 млн. т. Область питания источника сильно раздроблена тектоническими нарушениями, по которым и происходит движение воды. В центральной части Дабан-Горхонской синклинали установлено разрывное нарушение (приосевой взброс) северо-восточного простирания в отложениях сангинской и селенгинской свит, плоскость сместителя которого падает к юго-востоку под углом 70°. Амплитуда перемещения блоков по

приосевому взбросу составляет десятки метров [3]. К этому разлому приурочен выход минеральных вод.

Источник Дабан-Горхон обследовался нами в 2019 и 2023 годах. Основные физико-химические параметры воды источника измерялись непосредственно в полевых условиях. Показатель pH определялся с помощью портативного pH-метра PH-911, эквивалентное солесодержание (TDS) – с помощью кондуктометра «МАРК-603», температура воды измерялась цифровым термометром «CENTER 375». Отбирались пробы воды для лабораторного изучения их химического состава. Воду для макрокомпонентного анализа отбирали в пластиковые бутылки объемом 1,5 л, анализ выполнялся в сертифицированной лаборатории Геологического института СО РАН (аналитик Д.И. Жамбалова) по стандартным методикам для пресных и соленых вод. Анализ микроэлементного состава выполнен методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 ce в Лимнологическом институте СО РАН. В 2023 году в районе выхода источника были отобраны 5 проб конденсационной влаги. Конденсат собирался с помощью специальной установки, представляющей собой герметичный цилиндрический пластиковый корпус с натянутой на него полиэтиленовой пленкой и емкостью для сбора влаги внутри. Площадь поверхности, с которой производится сбор конденсата составляет 1 м^2. Для увеличения достоверности полученных результатов одновременно устанавливалось пять сборников конденсата. Расстояние между установками составляло порядка 20-25 м. Пробы конденсата фильтровались через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм и консервировались для микроэлементного анализа.

Вода источника Дабан-Горхон характеризуется гидрокарбонатным магниево-кальциевым составом. Формула Курлова имеет вид:

$$M0{,}76\,\frac{HCO_3 82\ SO_4 17}{Ca 57\ Mg 24\ Na 19}$$

Основные физико-химические характеристики воды в 2019 и 2023 годах следующие: pH – 6,9 и 7,0 (соответственно); TDS – 356 мг/л и 372,6 мг/л; температура воды в месте выхода источника оставалась неизменной и составляла 0,43°C. Содержание железа в воде источника – 18 мг/л, свободной углекислоты – 0,2 г/л [1].

В таблице 1 приведены результаты анализа микроэлементного состава воды источника Дабан-Горхон и конденсационной влаги, отобранной на прилегающей к месту выхода территории. Общая минерализация конденсата значительно меньше минерализации воды источника и варьирует в пределах 47,8 – 68,0 мг/л. Однако, некоторые элементы в конденсационной влаге представлены в концентрациях, сравнимых с их содержанием в источнике. Среди них Al, Cr, Ni, Cu, Zn, Se, Ag, Cd, Sn, Sb, Hf, Ta, W, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th.

Различия в минерализации конденсационной влаги и воды источника превышают один математический порядок, поэтому для выявления особенностей поведения отдельных микроэлементов были рассчитаны коэффициенты водной миграции. Коэффициенты водной миграции рассчитывались по формуле [4]:

$$К_x = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$$

где m_x – содержание элемента «х» в воде, г/л;

а – минерализация воды, г/л;

n_x – процентное содержание элемента в земной коре [5].

Таблица 1. Микрокомпонентный состав воды источника Дабан-Горхон и конденсата, собранного на прилегающей территории, мкг/л

Компонент	Ист. Дабан-Горхон	Конденсат (точки опробования)				
		1	2	3	4	5
Li	54	0,039	0,031	0,043	0,025	0,037
Be	0,01	0,004	0,005	0,0024	0,0011	0,0029
B	22	2,8	1,85	1,83	2,1	4,4
Al	8,6	11	21	8,4	8,8	10,9
Si	16200	157	64	66	240	56
P	1280	60	25	55	31	34
S	29000	280	<200	400	390	340
Cl	5200	420	490	410	450	380
Sc	0,32	0,031	0,021	0,025	0,038	0,022
Ti	2,3	0,15	0,57	0,09	0,13	0,16
V	0,116	0,035	0,042	0,026	0,023	0,029
Cr	0,96	1,06	0,99	1,14	0,89	0,94
Mn	190	11,1	7,3	8,1	8,1	7,9
Fe	3400	35	42	39	28	29
Co	0,78	0,087	0,075	0,09	0,09	0,097
Ni	1,11	0,67	0,99	0,68	0,56	0,84
Cu	1,05	0,87	1,48	0,56	0,38	0,97
Zn	2,9	6	6,9	5,4	4,8	6,7
Ga	0,01	0,0038	0,005	0,0022	0,0025	0,002
Ge	0,007	0,0016	0,004	0,002	0,004	<0,001
As	0,51	0,08	0,08	0,057	0,049	0,059
Se	0,16	0,18	0,12	0,14	0,09	0,11
Br	24	1,4	1,2	1,4	1,4	1,2
Rb	4,5	0,124	0,118	0,128	0,113	0,076
Sr	2400	8,2	7,2	8,9	10,1	9,3
Y	0,177	0,012	0,015	0,013	0,012	0,011
Zr	0,047	0,023	0,03	0,022	0,022	0,023
Nb	0,0049	0,0017	0,002	0,0013	0,0012	0,001
Mo	0,069	0,042	0,047	0,036	0,025	0,034
Ag	0,013	0,015	0,038	0,012	0,016	0,014
Cd	0,027	0,064	0,054	0,051	0,049	0,059
Sn	0,052	0,051	0,084	0,042	0,023	0,062
Sb	0,019	0,054	0,028	0,025	0,022	0,018
I	8,5	0,48	0,11	0,16	0,15	0,25
Cs	0,172	0,0065	0,0059	0,0059	0,0038	0,0054
Ba	680	10,1	6,4	7,2	5,5	5,6
Hf	0,0012	0,0019	0,0015	0,0009	0,0008	0,0014
Ta	0,0009	0,001	0,0006	0,0007	0,0005	0,0005
W	0,077	0,075	0,062	0,084	0,073	0,069
Au	0,0009	0,0009	0,0005	0,0009	0,0017	<0,0004
Hg	0,1	0,11	0,06	0,11	0,15	0,11
Tl	0,0025	0,018	0,012	0,014	0,015	0,008
Pb	3	2,9	4,8	2,3	3,6	4,2
Bi	0,0023	0,0032	0,0054	0,002	0,0018	0,0021
Th	0,0023	0,0012	0,0029	0,0032	0,0011	0,0016
U	0,057	0,01	0,012	0,012	0,012	0,011

На рисунке 1 представлены графики распределения коэффициентов водной миграции для воды источника Дабан-Горхон и 5 проб конденсационной влаги

с прилегающей территории. В целом, поведение микроэлементов в воде и конденсате имеет определенное сходство, для большинства элементов коэффициенты миграции имеют значения в пределах одного порядка. Однако для некоторых обнаруживаются существенные различия. Элементы, концентрации которых в конденсационной влаге сравнимы с их содержаниями в воде источника, характеризуются высокими коэффициентами водной миграции, на один математический порядок и более выше, чем в воде источника.

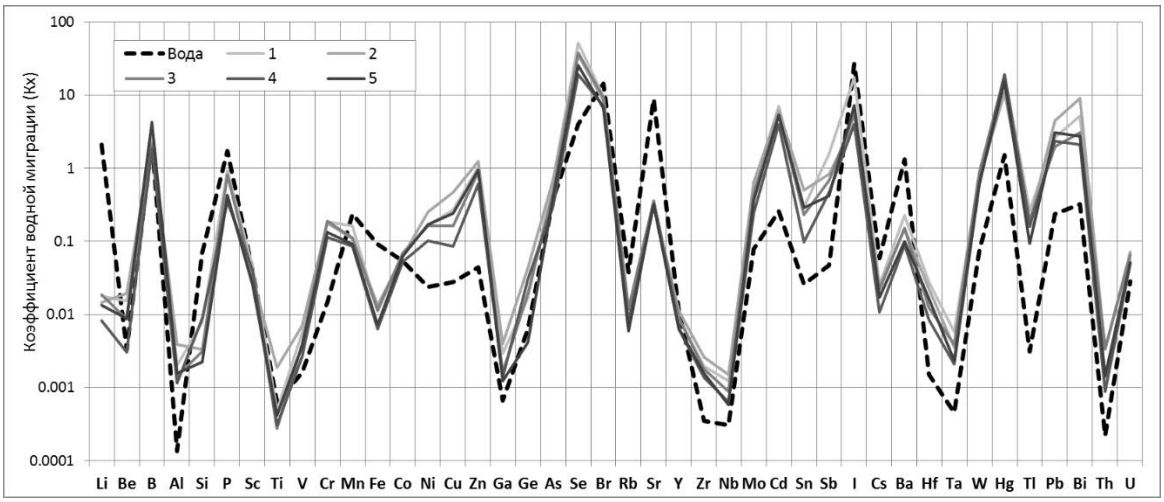


Рис. 1. Распределение коэффициентов водной миграции элементов в воде источника Дабан-Горхон (Вода) и конденсационной влаге, отобранных на прилегающей территории (1-5)

Корреляционный анализ коэффициентов водной миграции элементов в воде и конденсационной влаге показал зависимость, близкую к линейной, с коэффициентом корреляции 0,32. Вода источника характеризуется относительно повышенными коэффициентами миграции I, Br, Sr, а конденсационная влага – Se, Hg, Cd.

Вода источника Дабан-Горхон и конденсационная влага обогащены редкоземельными элементами. Суммарное содержание РЗЭ в воде источника составляет 0.56 мкг/л, в конденсационой влаге – 0,16 мкг/л. На рисунке 2 приведены спектры распределения концентраций редкоземельных элементов, нормированные по содержанию в североамериканском сланце (NASC) [6].

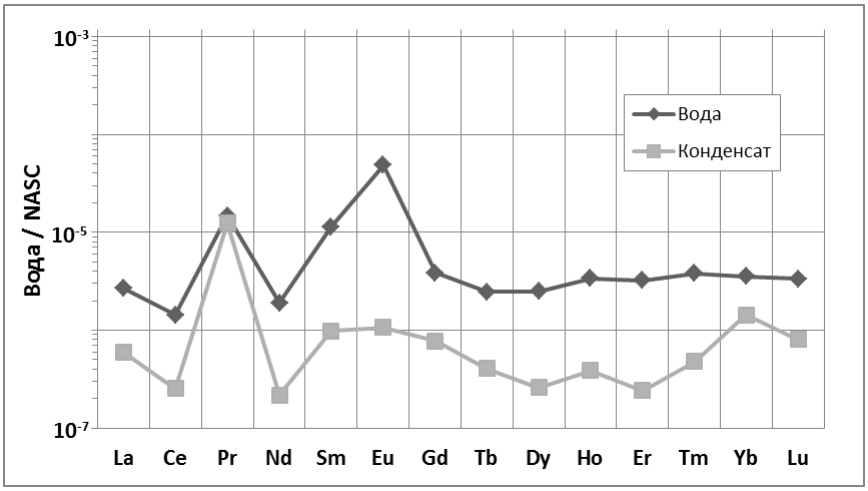


Рис. 2. Спектры распределения концентраций редкоземельных элементов в воде источника Дабан-Горхон и в конденсате, нормированные по содержанию в североамериканском сланце (NASC)

В воде источника наблюдается положительная европиевая аномалия. Вероятно, она связана с особенностями геологического строения района расположения источника. Как в воде источника, так и в конденсате фиксируются отчетливые положительные празеодимовые аномалии. Аномально высокие содержания Pr могут быть связаны с высокой миграционной способностью комплексных соединений Pr с сульфат-ионами [7].

Формирование химического состава воды источника Дабан-Горхон и потока аэрозолей на прилегающей территории происходит при участии трещинно-жильных вод, которые активно мигрируют в пределах разломов и разгружаются в борту впадины. На данной территории существует поток углекислого газа эндогенной природы, миграция которого к поверхности также происходит по разрывным нарушениям. Углекислый газ на глубине существует в форме флюида и способен переносить в своем составе различные микроэлементы, в том числе РЗЭ [8]. По мере приближения к поверхности он переходит в газообразное состояние, элементы переходят либо в водный раствор, либо высаживаются на вмещающих породах. Вероятно, именно этими процессами определяются аномалии в поведении некоторых химических элементов в конденсационной влаге, отобранной в районе выхода источника.

Работа выполнена в рамках проекта АААА-А21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока. Аналитические работы проведены с использованием средств проекта РНФ.

Список литературы

1. Борисенко И.М., Замана Л.В. Минеральные воды Бурятской АССР. – Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1978. – 162 с.

2. Банзаракцаева Т.Г., Бархутова Д.Д. Таксономическое разнообразие микробного сообщества холодного железистого источника Дабан Горхон (Витимское плоскогорье) // Природа Внутренней Азии. Nature of Inner Asia. – 2023. – № 3(25). – С. 7-16.

3. Мареев З.М. Геологическая карта СССР. М-б 1:200 000. Серия Западно-Забайкальская. Лист N-49-XXXIV. Объяснительная записка. – М., 1974. – 110 с.

4. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. – М.: Недра, 1975. – 208 с.

5. Войткевич Г.В. и др. Краткий справочник по геохимии / Г.В. Войткевич, А.Е. Мирошников, А.С. Поваренных, В.Г. Прохоров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 184 с.

6. Gromet L.P., Dumek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The “North American shale composite”: Its composition, major and trace element characteristics // Geochim. et Cosmochm. Acta. – 1984. – V.48. – P. 2469-2482.

7. Воронина Ю.С., Плюснин А.М. Содержание редкоземельных элементов в снежном покрове на территории Джидинского ГОКа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2023. – № 2. – С. 122-132.

8. Украинцев А.В., Плюснин А.М., Чернявский М.К., Луканов Д.Д. Формирование состава РОВ и РЗЭ на месторождениях углекислых минеральных вод Восточного Забайкалья / Подземная гидросфера: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. – С.235-239.

ОБОБЩЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И КАТИОННО-АНИОННЫЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПОЛИГОНЕ ТКО РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ

Чередова Т.В.[1,2], Дорошкевич С.Г.[1], Жамбалова Д.И.[1]
[1]Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, cheredova-tv@yandex.ru, sv-dorosh@mail.ru
[2]Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, cheredova-tv@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрено загрязнение подземных вод в зоне действия закрытого полигона твердых коммунальных отходов, расположенного в п. Сотниково Иволгинского района Республики Бурятия. Показано, что подземные воды загрязняются фильтратом, образующимся в теле свалки. Нормы $ПДК_{сан-гиг}$ в подземных водах превышены по минерализации – в 1,8-2,7 раз, содержанию $Fe_{общ}$ – в 49 раз, NH_4^+ – в 10,6 раз, Mg^{2+} – в 6,9 раз, Cl^- – в 2,4 раз. Полученные данные свидетельствуют о необходимости рекультивации полигона.
Ключевые слова: *полигон, твердые коммунальные отходы, загрязнение, подземные воды*

Abstract. The article considers groundwater pollution in the area affected by the closed solid municipal waste landfill in Sotnikovo village (Ivolginsky district, Republic of Buryatia). It has been shown that groundwater is polluted by leachate from the landfill. Maximum permissible concentrations in groundwater are exceeded for mineralization by 1.8-2.7 times, Fe by 49 times, NH4+ by 10.6 times, Mg2+ by 6.9 times, Cl- by 2.4 times. The data obtained indicate that the landfill needs to be reclaimed.
Key words: *landfill, solid municipal waste, pollution, groundwater*

Ежегодный объем образования твердых коммунальных отходов (ТКО) в Республики Бурятия составляет 2614,87 тыс. $м^3$ (321,3 тыс. тонн). Основным источником образования ТКО является г. Улан-Удэ, насчитывающий 436,138 тыс. жителей (45% от всей численности населения в республике), на долю которого приходится 148,7 тыс. т/год коммунальных отходов, из которых более 96% направляется для захоронения на полигоны [1].

Некоторое время (2011-2015 гг.) для размещения ТКО, образующихся в г. Улан-Удэ, использовался полигон, расположенный в юго-западной части п. Сотниково Иволгинского района Республики Бурятия. Участок для размещения полигона был выбран в районе расположения бывшего пометохранилища недействующей Сотниковской птицефабрики. Общая площадь отведенного земельного участка для полигона составляла 8 га, проектная вместимость 58,5 тыс. $м^3$ [2]. Расстояние от полигона до ближайшего жилого массива – около 400 м, ближайшего водного объекта, р. Селенга – около 2,0 км.

В геоморфологическом отношении площадка полигона расположена на левобережье р. Селенга в сухом распадке, относящемся к южным отрогам хребта Хамар-Дабан. Район размещения полигона п. Сотниково характеризуется развитием широкого комплекса интрузивных, осадочных и метаморфических пород, различных по возрасту, генезису и литологическому составу, среди которых распространены породы докембрия, нижнего кембрия, нижнего и верхнего мела, неогена и четвертичные отложения. Основание полигона представлено делювиально-пролювиальными песчаными и крупнообломочными грунтами, подстилаемыми коренными породами. На поверхности изучаемой территории до глубин 1,0-1,6 м были вскрыты насыпные грунты из песка с включениями компонентов отходов. Под слоем насыпных грунтов расположены пески гравелистые и грунты щебенистые, обладающие повышенными коэффициентами фильтрации – до 2,1 и 8,3 м/сут, соответственно [3]. В гидрогеологическом отношении район исследований находится в пределах развития водоносных комплексов горного обрамления и горизонта аллювиальных отложений

долины р. Селенга, являющейся основной водной единицей Иволгинского района. Для водовмещающих отложений характерны изменчивость их как по мощности, так и в фациально-литологическом отношении. По степени защищенности подземные воды относятся к незащищенным. Для проведения наблюдений за качеством поземных вод с юго-восточной стороны полигона пробурено три наблюдательные скважины: на расстоянии 30 м от границы свалки (скв.1), 250 м (скв. 2) и 300 м (скв.3). Глубина скв. 1 и скв. 2 составляла 50 м, глубина скв. 3 – 10 м.

Плановая продолжительность эксплуатации полигона составляла 13 лет, однако после заполнения одной из карт на площади 2,77 га выяснилось, что ее местоположение попадает в подзону с особыми условиями использования (реестровый номер 03:00-6.184) аэропорта г. Улан-Удэ, и растущая свалка может помешать посадке авиационного транспорта, поэтому официально полигон был закрыт в 2015 г. На этот момент высота складированного мусора достигала 6,0-8,2 м, высота мусора над рельефом – 5,0-6,5 м, объем накопленных отходов составлял 97,13 тыс.т. Проект рекультивации полигона по ряду причин не прошел государственную экологическую экспертизу, и открытая карта свалки оказалась заброшенной. К сожалению, несанкционированный вывоз населением мусора на полигон продолжается, что способствует захламлению прилегающей к нему территории, на которой, прежде всего со стороны подъездных дорог, встречаются пищевые отходы, строительный мусор и прочие компоненты ТКО.

Отличительной технологической особенностью при строительстве полигона п. Сотниково, являлось отсутствие дренажной сети в его основании. Предполагалось, что в связи с метеорологическими особенностями Республики Бурятия, выражающимися в незначительном количестве осадков в год – 254 мм и продолжительным солнечным сиянием – до 16 ч/сут [4], образование фильтрата, который необходимо будет удалять через дренажную систему, маловероятно из-за высокой скорости его испарения, а подземные воды по результатам инженерно-гидрогеологических изысканий, проведенных на этой территории на глубину 20 м встречены не были [3]. Действительно, по результатам расчета, представленного в проектной документации, расчетная испаряющая способность полигона составляла 630 мм в год, что примерно в 2,5 раза выше годовой суммы осадков в этом регионе. Кроме того, практика эксплуатации остальных полигонов ТКО г. Улан-Удэ (полигоны п. Стеклозавод, с. Нижний Саянтуй) на тот период показала отсутствие образования фильтрата как на поверхности свалок, так и в наблюдательных скважинах.

По результатам натурных наблюдений, проводимых авторами в 2022-2023 гг. на данной территории, в одной из наблюдательных скважин (скв. 1) на глубине 17 м была обнаружена вода. Отбор проб и последующий анализ подземной воды проведен в мониторинговом режиме с мая по ноябрь 2023 г. Для сравнения в качестве фона была выбрана скважина, глубиной 100 м, расположенная в жилом массиве п. Сотниково на расстоянии около 1 км от границ свалки выше по уровню рельефа местности в северном направлении. Анализ макрокомпонентного состава подземных вод был проведен с использованием стандартизированных в Российской Федерации методик для природных вод в лаборатории гидрогеологии и геоэкологии ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) (таблица).

Таблица – Обобщенные показатели и катионно-анионный состав подземных вод в зоне влияния полигона ТКО г. Улан-Удэ

Наименование показателя	Фоновая скважина	Наблюдательная скважина на свалке (скв. 1)*	$ПДК_{сан-гиг}$ [5], мг/дм^3	$ПДК_{рыб-хоз}$ [6], мг/ дм^3
Водородный показатель (pH)	8,45	7,31	6,5-8,5	$С_ф$
Кремниевая кислота (H_2SiO_3), мг/дм^3	13,68	3,42	-	-
Минерализация, мг/дм^3	692,56	2722,44 **3,93**	1000-1500	-
Перманганатная окисляемость, мгO_2/ дм^3	41,66	141,36 **3,39**	5,0-7,0	-
Жесткость, ^{0}Ж	3,6	36 **10**	7,0-10,0	-
Железо общее ($Fe_{общ}$), мг/дм^3	1,8	14,8 **8,22**	0,3	0,1
Аммоний ион (NH_4^+), мг/дм^3	-	15,94 **16**	1,5	0,5
Натрий (Na^+), мг/дм^3	140	135	200	120
Магний (Mg^{2+}), мг/дм^3	9,73	346,56 **35,6**	50	40
Кальций (Ca^{2+}), мг/дм^3	56,11	150,3 **2,68**	-	180
Гидрокарбонат ион (HCO_3^-), мг/дм^3	177,56	1213,04 **6,83**	-	-
Карбонат ион (CO_3^-), мг/дм^3	13,5	-	-	-
Хлорид ион (Cl^-), мг/дм^3	42,54	852,57 **20,04**	350	300
Нитрит ион (NO_2^-), мг/дм^3	0,12	0,14 **1,17**	3,3	0,08
Сульфат ион (SO_4^{2-}), мг/дм^3	230	3,5	500	100
Нитрат ион (NO_3^-), мг/дм^3	9,8	4,3	45	40
Фторид ион (F^-), мг/дм^3	2,85	0,1	1,5	$С_ф$+0,05 (до 0,75)

Примечание. Числитель – значение в подземной воде, знаменатель – кратность превышения над фоном, $С_ф$ – фоновая концентрация

По результатам химического анализа подземные воды в фоновой скважине были отнесены к пресным, слабощелочным, хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатным магниево-кальциево-натриевым (по формуле Курлова М.Г.):

$$M_{0,67}\ \frac{SO_4\ {}_{53}}{HCO_3\ {}_{32}\ Cl_{13}}\qquad pH$$
$$\frac{}{Na_{62}\ Ca_{29}\ Mg_8}\ 8,5$$

На формирование химического состава подземных вод п. Сотниково оказывает влияние Ошурковское месторождение апатитов, расположенное в 10-12 км с северо-западной стороны от поселка. Влияние месторождения выражается в повышенном содержании в подземных водах кремниевой кислоты – до 13,68 мг/дм^3, железа общего – до 1,8 мг/дм^3 (6 $ПДК_{сан-гиг}$) и фторид-ионов – до 1,5 мг/дм^3 (1,9 $ПДК_{сан-гиг}$), входящих в состав основных компонентов апатитовых руд [7].

Подземные воды в наблюдательной скважине на свалке были значительно загрязнены, обладали повышенной мутностью и рыжевато-оранжевым цветом. Для них

была характерна повышенная относительно фоновых значений минерализация – до 2,74 г/дм^3, что позволило отнести их к солоноватым водам (согласно ОСТ 41-05-263-86). По классификации Курлова М.Г. данные воды были отнесены к гидрокарбонатно-хлоридному натриево-кальциево-магниевому типу:

$$M_{2,74}\ \frac{HCO_{3\ 45}\ Cl_{55}}{Ca_{17}\ Mg_{66}\ Na_{14}}\qquad pH7,3$$

В подземных водах наблюдательной скважины наблюдались превышения санитарно-гигиенических нормативов качества воды по минерализации (1,8-2,7 ПДК$_{сан-гиг}$), содержанию ионов Fe$_{общ}$ (49 ПДК$_{сан-гиг}$), NH_4^+ (10,6 ПДК$_{сан-гиг}$), Mg^{2+} (6,9 ПДК$_{сан-гиг}$), Cl^- (2,4 ПДК$_{сан-гиг}$). Полученные данные свидетельствуют о серьезном загрязнении подземных вод в зоне расположения полигона ТКО п. Сотниково, что может быть вызвано образованием фильтрата в теле полигона. Согласно данным Гуман О.М., преобладающими анионами в фильтрате со свалок коммунальных отходов являются HCO_3^- и Cl^-, катионами – NH_4^+, Na^+, K^+, Ca^{2+} и Mg^{2+} [8], по этим же ионам были выявлены повышенные содержания в проведенных исследованиях на свалке п. Сотниково. Нейтральная реакция среды фильтрата (pH 7,31) свидетельствует о 10-20 летнем сроке захоронения отходов [9,10], что также совпадает с данными о возрасте полигона п. Сотниково.

Таким образом, на полигоне коммунальных отходов п. Сотниково наблюдается образование фильтрата, который не выходит на поверхность полигона, но отражается на составе подземных вод, вызывая превышение санитарно-гигиенических нормативов ПДК в 2-10 раз по основным катионам и анионам. Основание полигона ТКО п. Сотниково является негерметичным. Полигон нуждается в рекультивации.

Список литературы

1. Приказ Министерства природных ресурсов республики Бурятия от 29.04.2020 г. № 159-ПР «Об утверждении территориальной схемы в области обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Республики Бурятия» // [Электронный ресурс], режим доступа https://base.garant.ru/73969411/ (дата обращения 26.01.2024)

2. Фондовые материалы: архив Администрации МО Иволгинский район Республики Бурятия, «Рекультивация полигона ТБО в с. Сотниково Иволгинского района Республики Бурятия», пояснительная записка (шифр 7/17 ПЗ), разработчик ООО «Байкалэкосервис», 2017.

3. Фондовые материалы: архив Администрации МО Иволгинский район Республики Бурятия, «Рекультивация полигона ТБО в с. Сотниково Иволгинского района Республики Бурятия», инженерные изыскания (инв.номер № У-1175), разработчик ООО «Байкалгеопроект», 2017.

4. Сницаренко Н.И., Швер Ц.А. Климат Улан-Удэ. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1983 – 240 с.

5. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями на 10 марта 2020 года) // [Электронный ресурс], режим доступа: https://docs.cntd.ru/document (дата обращения 22.06.2021 г.)

6. СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания" // [Электронный ресурс], режим доступа https://docs.cntd.ru/document/573500115/titles/7EC0KG (дата обращения 29.01.2024)

7. Швабенданд Е.Г. Обоснование параметров экологически сбалансированной горнотехнической системы открытой разработки сложноструктурных месторождений апатитовых руд: специальность: 25.00.22 «Геотехнология (подземная, открытая и строительная) / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Швабенланд Елена Егоровна; ФГБУ ВНИИ им. Н.М. Федоровского. – Москва, 2020. – 152 с.

8. Гуман О. М. Эколого-геологические условия полигонов твердых бытовых отходов Среднего Урала: специальность 25.00.36 "Геоэкология (по отраслям)": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Гуман Ольга Михайловна. – Екатеринбург, 2009. – 42 с.

9. Farquhar, G. J. (1989). Leachate: production and characterization. Canadian Journal of Civil

Engineering. V.16(3). PP.317–325. doi:10.1139/l89-057
10. El-Fadel, Mutasem & Bou-Zeid, Elie & Chahine, Walid & Alayli, B. (2002). Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content // Waste management (New York, N.Y.). V.22. PP. 269-82. doi.10.1016/S0956-053X (01)00040-X.

ГАЗОВЫЙ И МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОТОКОВ АЭРОЗОЛЕЙНА СОДОВОМ ОЗЕРЕ НИЖНЕЕ БЕЛОЕ (ЗАПАДНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Черниговский Р.С.[1,2], Плюснин А.М.[1,2], Украинцев А.В.[1]
[1]Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, plyusnin@ginst.ru
[2]Восточно-Сибирский государственный университет технологий управления, Улан-Удэ, tchernigovsky.roman@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты изучения газового и аэрозольного потоков в районе содового озера. Применена новая методика отбора проб газа из нижней части зоны аэрации, которая позволила установить особенности газового состава в пределах разрывного нарушения. Показано, что в акватории озера в пределах разрывного нарушения формируется ореол свободного газа, в котором в значимом количестве присутствует углекислый газ. Изучен химический состав конденсационной влаги, собранной в местах отбора газовых проб. Полученные результаты позволили заключить, что химический состав воды озера формируется под воздействием двух факторов - выветривания горных пород на водосборной территории и приносом химических элементов углекислым газом. В конденсационных водах наблюдается возрастание относительного содержания хрома, марганца, никеля, цинка, кадмия, олова, сурьмы, гафния и лантаноидов.
Ключевые слова: *конденсат, свободный газ, озерная вода, микроэлементы, лантаноиды.*

Abstrakt. The article presents the results of studying gas and aerosol flows in the soda lake area. A new technique was used for sampling gas from the lower part of the aeration zone, which made it possible to establish the characteristics of the gas composition within the fault. It is shown that in the water area of the lake, within the boundaries of the fault, an aureole of free gas is formed, in which carbon dioxide is present in significant quantities. The chemical composition of condensation moisture collected at gas sampling sites was studied. The results obtained allowed us to conclude that the chemical composition of lake water is formed under the influence of two factors - weathering of rocks in the drainage area and the supply of chemical elements with carbon dioxide. In condensation waters, an increase in the relative content of chromium, manganese, nickel, zinc, cadmium, tin, antimony, hafnium and lanthanides is observed.
Key words: *condensate, free gas, lake water, trace elements, lanthanides.*

Формирование химического состава минеральных озер большинством исследователей связывается с испарительным концентрированием. Считается, что определяющее влияние на особенности химического состава вод оказывают влияние горные породы, с которыми взаимодействует вода [1, 2 и др.]. Между тем на территории Забайкалья существует аномальный поток углекислого газа, который может приносить в своем составе ряд химических элементов [3, 4]. Нами исследованы газовый и аэрозольный потоки в районе озера Нижнее Белое. Озеро расположено на юге Бурятии в Боргойской межгорной впадине. Глубина озера составляет 1.5-2 м. Минерализация воды 4,57 г/дм^3, pH – 9,6. Вода прозрачная, видимость составляет до 1.5 м. Иловые отложения представлены бурым наилком, переходящим в серую глину с черными вертикальными прослойками (до 10 см), ниже залегает серый ил. Озеро относится к числу наиболее изученных минеральных озер Бурятии и уникально своими лечебно-оздоровительными свойствами.

Отбор проб газа производился 9 сентября 2023 г. в 5 точках, расположенных на берегу на удалении 1 км от озера в пределах предполагаемого разлома, а также в акватории озера методом вытеснения воды. Для отбора проб газа была использована специально созданная установка, с помощью которой удалось опробовать газ из нижней части зоны аэрации (рис. 1а.). Исследование химического состава аэрозолей, выделяющихся из зоны аэрации, проведено путем сбора конденсата на поверхности полиэтилена (рис. 1б).

В районе озера удалось отобрать пять проб газа из зоны аэрации пять проб газа из донных отложений, пять проб конденсационных вод и пробу воды из озера (рис. 1в.). Газовый состав проб исследован методом газовой хроматографии в сертифицированной лаборатории ООО Научно-производственная фирма «Сибэкосервис» (г. Иркутск) на хроматографе "Хромос ГХ-1000", микроэлементный состав конденсата и воды озера в Лимнологическом институте СО РАН методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500.



Рис. 1. Пробоотборники для исследования газового состава зоны аэрации (1.а.) и потока аэрозолей из почвогрунтов (1.б.), схема опробования газового и аэрозольного потоков в районе озера Нижнее Белое. Условные обозначения:1- приемная камера, 2 – штуцер для откачки воздуха, 3- шток, 4- труба, 5- паз, 6- конус, 7- резьбовое соединение; Bel1-Bel10 –места опробования потоков газа и аэрозолей.

В точках BEL2, BEL4, BEL5 в зоне аэрации наблюдаются повышенные содержания углекислого газа и азота и относительно пониженные кислорода (табл.1). Вероятно, азот и углекислый газ поступают вместе с водой по разлому, в пределах которого располагается озеро. В результате дегазации трещинно-жильных вод происходит насыщение нижней части зоны аэрации в районе разлома азотом, углекислым газом и гелием. Вследствие этого уменьшается количество кислорода. Метан обнаруживается в очень маленькой концентрации. В пробах газа, отобранных из донных отложений озера наблюдается преобладание азота. В одной точке наблюдения фиксируется относительно повышенное содержание метана, в трех точках установлено наличие углекислого газа. Метан, несомненно, имеет биогенное происхождение, он образуется в отложениях озера, а азот и углекислый газ привносится трещинно-жильными водами. В составе газов присутствуют также этилен, пропилен, бутан, бутилен, пентан, толуол, этилбензол, ксилол.

Таблица 1. Состав газов зоны аэрации и донных отложений озера, %

№ пробы	Место отбора	He	H_2	CO_2	O_2	N_2	CH_4
Bel 1	Берег озера	0.007	0.002	0.00001	12.96	86.96	1.00E-06
Bel 2	Берег озера	0.011	0.003	0.046	7.05	92.82	1.00E-06
Bel 3	Берег озера	0.007	0.003	0.009	13.15	86.77	1.00E-06
Bel 4	Берег озера	0.006	0.002	0.071	10.16	89.62	1.00E-06
Bel 5	Берег озера	0.0068	0.002	0.023	9.10	90.77	1.00E-06
Bel 6	Донные отложения	0.008	0.001	0.00001	0.2	97.32	2.4071
Bel 7	Донные отложения	0.009	0.002	0.017	0.37	99.56	0.011
Bel 8	Донные отложения	0.01	0.002	0.019	0.19	99.63	0.0897
Bel 9	Донные отложения	0.009	0.002	0.022	0.19	99.67	0.0771
Bel 10	Донные отложения	0.009	0.001	0.00001	0.21	99.71	0.0553
Атмосферный воздух		0.0005	0.00005	0.03	20.95	78.08	0.00018

Общая минерализация конденсационных вод изменяется от 8 до 73 мг/дм^3, в анионном составе доминирует гидрокарбонат-ион, в значимых количествах присутствуют сульфат-ион и хлорид-ион. Среди катионов в четырех пробах доминирует натрий в одной пробе – кальций. В этой пробе, которая отобрана в бортовой части озерной котловины, установлена минимальная минерализация воды.

Микроэлементный состав конденсационных вод в значительной степени отличается от озерной воды. Конденсационные воды характеризуются относительно высоким содержанием ряда микроэлементов, среди которых выделяются алюминий, фосфор, марганец, железо, где содержание достигает сотен мкг/дм^3. Концентрация меди, цинка, брома достигает десятков мкг/дм^3. Олово, сурьма, свинец, сумма РЗЭ присутствуют в количестве нескольких мкг/дм^3. Так как минерализация конденсационных вод значительно меньше, чем минерализация воды в озере, сложно вычленить особенности поведения тех или иных микроэлементов в потоках аэрозолей и водных растворах. Для сравнения микроэлементного состава выборок конденсационных и озерных вод был рассчитан коэффициент водной миграции.

Коэффициент водной миграции был рассчитан по формуле [5]:

$$К_x = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x};$$

где m_x – содержание элемента «x» в воде, г/л;

a – минерализация воды, г/л;

n_x – процентное содержание элемента в земной коре [6].

На графике распределения коэффициентов водной миграции можно видеть, что относительное содержание почти всех микроэлементов в озерной воде меньше, чем в конденсате (рис. 2а). Это может быть связано с протеканием процессов кристаллизации солей из минерализованных вод, удалением элементов из раствора за счет сорбционных и биогенных процессов и др. Несмотря на это все-таки просматривается синхронное изменение концентрации большинства элементов в воде озера и конденсате, собранном в озерной котловине. На общем фоне синхронного изменения концентрации поведение некоторых химических элементов в конденсационных водах отличается от озерной воды.

Так наблюдается возрастание относительного содержания в конденсате хрома, марганца, никеля, цинка, кадмия, олова, сурьмы, гафния, тогда как в озерной воде их относительная концентрация падает. На диаграмме парной корреляции между озерной водой и конденсационной влагой в пробе Bel2 видно, что существует линейная зависимость между концентрациями проанализированных химических элементов (рис. 2б). Коэффициент корреляции составляет 0.25952. При расчетах из выборки были исключены результаты анализа Se, Br, Te, I. Содержание этих элементов имеют значительно более высокие концентрации в озерной воде, и они выпадают из установленной корреляционной зависимости. Кроме того, озерная вода характеризуется относительно более высокими содержаниями бора, молибдена, урана. А в конденсате наблюдается относительно более высокое содержание олова, сурьмы, висмута, коэффициент водной миграции которых находится за пределами доверительного интервала установленной корреляционной зависимости.

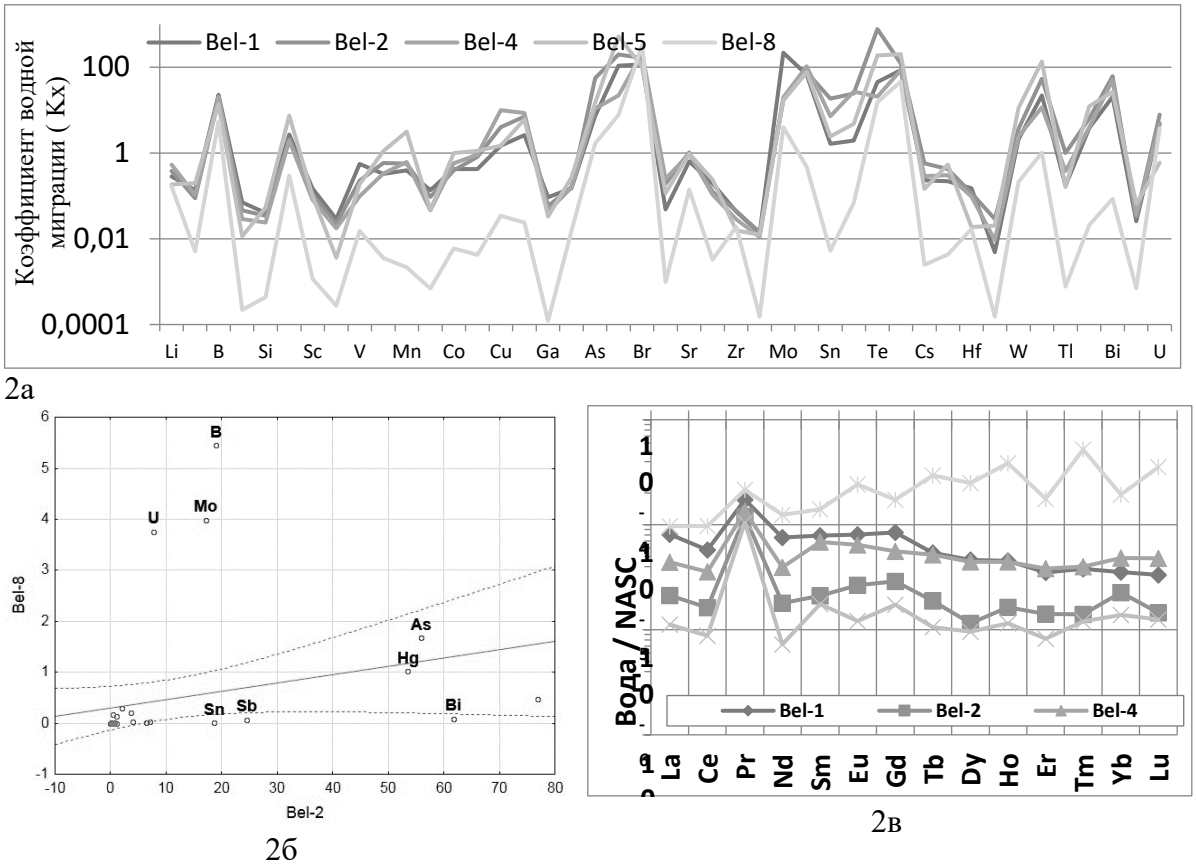


Рис. 2. Распределение коэффициентов водной миграции элементов в озере Нижнее Белое и конденсационных водах, отобранных в его южной части (2а); диаграмма рассеивания коэффициентов водной миграции между конденсационными водами Bel2 и озерной водой (Bel8) (2б); распределение редкоземельных элементов, нормированное относительно NASK (2в).

Интересно поведение лантаноидов в исследованных водах. В озере наблюдается общая тенденция возрастания тяжелых РЗЭ элементов по сравнению с легкими (рис. 2в). А во всех проанализированных конденсационных водах наблюдается уменьшение концентрации тяжелых лантаноидов по сравнению с легкими. Такое поведение этих элементов может быть связано с разными источниками поступления их в раствор. Вероятно, основная масса лантаноидов в озерную воду поступает при выветривании пород на водосборной площади. Такое распределение характерно для эффузивных образований, залегающих в Боргойской впадине. А распределение лантаноидов в

конденсационной воде отражает их содержание в трещинно-жильных водах, разгружающихся в озеро по разлому. По этому же разлому из недр в озеро выделяется углекислый газ в свободном виде. В конденсационных водах установлены аномально высокие содержания празеодима. Возможно, это связано с фазовыми переходами воды. Известно, что наиболее высокие содержания этого элемента связаны с такими минералами как монацит и бастнезит. Вероятно, при разрушении этих минералов в экзогенных условиях происходит более интенсивный вынос в раствор празеодима, так как он находится в них в виде акцессорной примеси. Затем при испарении поровых вод празеодим попадает в конденсационные воды.

Результаты исследования показывают, что формирование химического состава содового озера Нижнее Белое связано с протеканием двух процессов. Первый процесс связан с выветриванием горных пород на водосборной территории. В результате взаимодействия в системе вода-порода в водный раствор поступает значительное количество химических элементов. В озерной воде за счет испарительного и морозного концентрирования достигается насыщение относительно глин, карбонатов и др. труднорастворимых соединений. В составе труднорастворимых соединений из раствора высаживаются щелочноземельные элементы, раствор становится щелочным. Щелочная среда благоприятствует устойчивости в растворенном состоянии химических элементов, находящихся в форме анионов -Se, Br, Te, I. Также в окислительных условиях в щелочной среде устойчивы элементы образующие сложные кислородсодержащие анионы – B, Mo, U.

С другой стороны, в озеро разгружаются трещинно-жильные воды, насыщенные углекислым газом, который поступает к поверхности с большой глубины. Он имеет длительную историю миграции. Изначально он находился в форме флюида, переносил в своем составе большое количество растворенных веществ, имеющих с ним химическое сродство. Среди них были Cr, Mn, Fe, Sr, Zr, Nb, Sn, Hf, Ta, РЗЭ [4]. При переходе в газообразное состояние часть растворенных во флюиде компонентов перешло в воду, другая часть могла высадиться на вмещающие породы. Разгружающиеся в озеро трещинно-жильные воды сформировали свой химический состав под воздействием потока углекислого газа и несут в своем составе часть химических элементов, перешедших из флюида в раствор. Наиболее контрастно воздействие флюида проявляется в поведении редкоземельных элементов.

Работа выполнена в рамках проекта АААА-А21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока. Аналитические работы проведены с использованием средств проекта РНФ № 313.

Список литературы

1. Домрочева Е.В., Лепокурова О.Е. Равновесия содовых подземных вод угленосных отложений Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) с минералами вмещающих пород. Вестник Томского государственного университета. 2015. № 390. С. 211–217.

2. Борзенко С.В. Геохимия соленых озер Восточного Забайкалья. Авторефератдиссертации на соискание ученой степенидоктора геолого-минералогических наук. Томск, 2018, 42 с.

3. Плюснин А.М. Воздействие глубинных геологических процессов на химический состав углекислых минеральных вод Северо-Восточной Азии. Добрецовские чтения: Наука из первых рук. Материалы Первой Всероссийской научной конференции посвященной памяти выдающегося ученого и организатора науки академика РАН Н.Л. Добрецова. – Новосибирск: СО РАН, 2022. – 378 с. С.250-253.

4. Плюснин А.М., Украинцев А.В. Химический состав как индикатор процессов протекающих в недрах на примере углекислых минеральных вод Забайкалья. Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образованиятруды Всероссийской научной конференции с международным участием. Москва, 2023. С. 392-398.

5. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. – М.: Недра, 1975. – 208 с.

6. Краткий справочник по геохимии. Изд-во 2-е, перераб и доп. М.:Недра, 1977, 184 с.// Г.В. Войткевич, А.Е. Мирошников, А.С. Поваренных, В.Г. Прохоров.

ИЗМЕНЕНИЕ КРИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ПРЕДЕЛАХ УЧАСТКОВ ЗАКАЧКИ АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО И НАКЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВЫХ ПОЛЕЙ

Янников А.М.
Институт «Якутнипроалмаз» АК АЛРОСА ПАО,
Мирный, yannikov90@mail.ru

Аннотация: В настоящее время высокоминерализованные дренажные воды, образующиеся при отработке коренных месторождений алмазов Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей, закачиваются обратно в недра. Для закачки используется второй ярус толщи многолетнемерзлых пород, что приводит к формированию природно-техногенных водоносных горизонтов, насыщенных рассолами. Трансформация закачиваемых вод происходит за счёт их разбавления водами криолитозоны, которые находятся в твёрдом фазовом состоянии. Приведены фактические и прогнозные объёмы вовлечённых вод криолитозоны, полученные в результате аналитических расчётов и миграционного моделирования. Полученные данные позволяют говорить о локальном влиянии процесса закачки на второй ярус криолитозоны. Объёмы закачки не позволяют сформировать каких-либо выдержанных аномалий значительной площади, т.к. продолжительность и интенсивность воздействия компенсируются инертностью процессов криолитозоны.

Ключевые слова: *Многолетнемерзлые породы, рассолы, дренажные воды, участки закачки, техногенные водоносные горизонты.*

Abstract: Currently, highly mineralized drainage waters generated during the development of primary diamond deposits of the Alakit-Markhinsky and Nakynsky kimberlite fields are pumped back into the subsoil. For injection, the second layer of permafrost is used, which leads to the formation of natural-technogenic aquifers saturated with brines. The transformation of injected waters occurs due to their dilution with permafrost waters, which are in a solid phase state. The actual and predicted volumes of entrained permafrost waters, obtained as a result of analytical calculations and migration modeling, are presented. The data obtained allow us to speak about the local influence of the injection process on the second tier of the permafrost zone. The injection volumes do not allow the formation of any sustained anomalies of a significant area, because the duration and intensity of the impact are compensated by the inertia of permafrost processes.

Key words: *Permafrost, brines, drainage waters, injection sites, man-made aquifers.*

Проблема экологически безопасной утилизации или изоляции дренажных вод, осложняющих отработку месторождений, на настоящий момент очень актуальна, т.к. в общемировой практике безальтернативно взят вектор не только на снижение техногенной нагрузки на окружающую среду, но и на введение новых, экологически безопасных методик и технических решений. При изучении мировой практики несложно заметить, что наиболее перспективным направлением изоляции практически всех жидких отходов является закачка в недра, в том числе в экранированные коллекторы с низкими коэффициентами фильтрации на глубины 200-250 м от дневной поверхности [1].

Криолитозона в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля имеет наибольшую мощность первого и второго ярусов в рамках изучаемой территории: превышающую на водоразделах 750 м, составляя в среднем от 500 до 700 м. Мощность третьего яруса охлаждённых рассолонасыщенных пород составляет 100-150 м. Существенное увеличение мощности первого и второго ярусов связано с геоморфологическими особенностями, а именно гипсометрическими отметками дневной поверхности, составляющими на водоразделах от 600 до 770 м. Нулевая изотерма на территории кимберлитового поля залегает на глубинах от 700 до 1000 м [2, 3]. В пределах криолитозоны выделяются межмерзлотный нижнеордовикский водоносный комплекс и подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс [4, 5]. Наиболее проницаемые и водообильные блоки, как правило, приурочены к зонам динамического воздействия основных разрывных нарушений (региональных, кимберлитконтролирующих разломов и т.д.).

Мощность первого и второго ярусов криолитозоны в рамках Накынского кимберлитового поля составляет от 300 до 400 м и хорошо коррелируется с гипсометрическими отметками дневной поверхности. Нулевая изотерма здесь залегает на глубине от 700 до 900 м. В пределах криолитозоны выделяется межмерзлотный и подмерзлотный верхнекембрийские водоносные комплексы [6, 7].

Криогидрогеологические условия Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей, а именно наличие мощной толщи многолетнемерзлых пород (ММП) и развитая криогенная ярусность, определили тип используемых коллекторов и способ обращения с дренажными водами. В настоящее время для трубок Алакит-Мархинского кимберлитового поля – Юбилейная и Айхал это участки Заречный (находящийся на стадии строительства и опытно-промышленного использования) и Ноябрьский (находящийся на этапе промышленной эксплуатации) [8]. Для закачки дренажных вод трубок Ботуобинская, Нюрбинская и Майская (Накынское кимберлитовое поле) используется участок Ботуобинский. Перечисленные участки используют морозные недонасыщенные породы второго яруса криолитозоны, и в процессе их эксплуатации формируется техногенный водоносный горизонт [9]. Необходимо отметить, что все три участка: Ботуобинский, Заречный и Нюрбинский характеризуются невысокими расходами и объёмами закачки, а также незначительным процентом использования полезной емкости (не более 11%).

Характеристику динамики изменений температуры в обводнённых интервалах формируемых техногенных водоносных горизонтов (табл. 1) проведем по участкам закачки, переведённым в промышленную стадию эксплуатации. Сопоставительный анализ обусловлен схожими режимами эксплуатации, как в настоящее время, так и в будущем (максимальный объём закачиваемых вод на участке Ботуобинский будет составлять 88,7 тыс. м^3 (243 м^3/сут); а на участке Ноябрьский – 156,9 тыс. м^3 (430 м^3/сут).

Таблица 1. Осреднённые результаты термометрических измерений по закачным скважинам участков закачки Ботуобинский и Ноябрьский

Глубина, м	Температура по стволу закачных скважин, °С							
	участок Ботуобинский				участок Ноябрьский			
	I квартал	II квартал	III квартал	IV квартал	I квартал	II квартал	III квартал	IV квартал
110	-5,0	-4,2	-1,2	-2,4				
120	-6,1	-4,3	-1,4	-2,5				
130	-7,5	-4,3	-1,4	-2,5				
140	-7,5	-4,3	-1,6	-2,8				
150	-8,0	-4,2	-1,6	-2,8	-4,8	-3,6	-0,5	-2,8
160	-8,1	-4,2	-1,9	-3,1	-5,3	-3,8	-1,2	-2,8
170	-8,1	-4,2	-2,1	-3,2	-6,6	-3,7	-1,2	-2,8
180	-8,0	-4,2	-2,1	-3,2	-6,7	-3,8	-1,2	-2,9
190	-8,1	-4,2	-2,1	-3,3	-6,5	-3,7	-1,5	-3,2
200	-8,0	-4,2	-2,2	-3,4	-6,8	-3,8	-1,5	-3,2
210	-7,5	-4,2	-2,2	-3,3	-7,0	-3,8	-1,7	-3,2
220					-6,8	-3,8	-1,7	-3,6
230					-6,5	-3,8	-1,7	-3,6

Необходимо отметить, что перед началом эксплуатации температура пород в пределах участков Ботуобинский и Ноябрьский составляла от -3 до -4°С. Незначительность объёмов закачки, инертность пород второго яруса криолитозоны не привели к существенному площадному изменению температурного режима,

по наблюдательным скважинам участка сезонные изменения температуры в интервале глубин 110-230 м не превышали 0,1-0,2°С и не имели четкой сезонной привязки [10, 11].

Однако непосредственно в закачных скважинах отмечаются более существенные температурные изменения в разрезе года (табл. 1), обусловленные температурой закачиваемых дренажных вод, т.к. по причине их сравнительно небольших объёмов, в процессе транспортировки, осуществляемой автоцистернами, происходит значительное изменение температуры. Предельные зафиксированные значения температуры (экстремумы) составляют от +3 до -12 °С; среднегодовая температура колеблется от -4 до -5 °С.

Полученные данные позволяют говорить о локальном влиянии процесса закачки на второй ярус криолитозоны с точки зрения изменения геотермического режима. Объёмы закачки не позволяют сформировать каких-либо выдержанных аномалий значительной площади, т.к. продолжительность и интенсивность воздействия в целом компенсируются инертностью процессов криолитозоны.

Помимо проводимых наблюдений непосредственно по стволам закачных и наблюдательных скважин, инструментом контроля за развитием техногенного водоносного горизонта в интервале второго яруса криолитозоны является наземная геофизика методами электроразведки, электротомографии, методом переходных процессов и др. В процессе исследований было подтверждено, что формируемые техногенные горизонты представляют собой аномалии, характеризующиеся отличной от окружающих пород электропроводимостью и имеющие ограниченную плановую распространённость [11].

По той причине, что дренажные рассолы месторождений Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитового полей имеют среднегодовую минерализацию 120-170 г/л, объёмы провзаимодействовавших вод криолитозоны не превышают двукратного объёма закачанных дренажных рассолов. С учётом выполненного гидродинамического моделирования можно говорить о том, что эксплуатация участков Ботуобинский, Заречный и Ноябрьский приведёт к формированию в пределах второго яруса криолитозоны техногенных водоносных горизонтов ограниченной площади.

Прогнозный объём вод криолитозоны, вовлечённых в процесс формирования природно-техногенной геосистемы: техногенного водоносного горизонта, связанного зонами вертикальной фильтрации с природными межмерзлотными водоносными комплексами (для участка Ботуобинский это верхнекембрийский межмерзлотный водоносный комплекс, для участков Заречный и Ноябрьский – нижнеордовикский водоносный комплекс), определённый как с помощью аналитических расчётов (в рамках задачи Стефана и метода Л.С. Лейбензона), так и специализированного программного комплекса, составит:

- для участка Ботуобинский от 3,0 до 4,0 млн $м^3$;
- для участка Заречный от 5,0 до 6,0 млн $м^3$;
- для участка Ноябрьский от 10,0 до 12,0 млн $м^3$.

Результаты, полученные в настоящее время, посредством используемых методов геофизического контроля, позволяют утверждать, что режим формирования (закачка низкой интенсивности) будет препятствовать существенной трансформации геотермического режима и не приведёт к изменению границ криолитозоны в пределах изучаемых участков. Суммарные площади формирующихся в пределах Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей природно-техногенных систем, как было отмечено выше, составят порядка 20 $км^2$, и могут быть охарактеризованы как локальные.

Список литературы

1. Алексеев, С. В. Первый опыт захоронения соленых дренажных вод карьера трубки Удачная в многолетнемерзлые породы / С. В. Алексеев, А.В. Дроздов, Т.И. Дроздова и др. // Криосфера Земли. - 2002.

– Т. VI, № 2. – С. 61-65.

2. Алексеев, С. В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции / С. В. Алексеев. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. - 319 с.

3. Колганов, В.Ф. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии / В.Ф. Колганов, А.Н. Акишев, А.В. Дроздов. – Мирный, 2013. - 558 с.

4. Гидрогеология СССР. Т. 20. Якутская АССР. - М.: Недра, 1970. - 384 с.

5. Романовский, Н.Н. Схема подразделения подземных вод области распространения многолетнемерзлых горных пород / Н.Н. Романовский // Методика гидрогеологических исследований и ресурсы подземных вод Сибири и Дальнего Востока. - М.: Наука, 1966. - С. 28–41.

6. Толстихин, Н.И. Подземные воды мерзлой зоны литосферы / Н.И. Толстихин. - М.-Л.: Госгеолтехиздат, 1941. - 204 с.

7. Пиннекер, Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна / Е.В. Пиннекер. – М.: Наука, 1966. – 332 с.

8. Янников, А. М. Моделирование гидродинамического режима техногенного водоносного горизонта в пределах участка «Ноябрьский» рудника «Айхал» / А. М. Янников, А. С. Стручкова, А. Ю. Корепанов // Науки о Земле и недропользование. – 2023. – Т. 46, № 1(82). – С. 20-35. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35

9. Дроздов, А.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии / А.В. Дроздов, Н.А. Иост, В.В. Лобанов. - Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. - 507 с.

10. Янников, А.М. Использование ммп для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» / А.М. Янников, С.А. Янникова, М.Ю. Овчинникова, А.Ю. Корепанов // Вестник Пермского государственного университета. - 2021. - №3. - С. 284-299.

11. Янников, А.М. Гидрогеология Алакит-Мархинского кимберлитового поля / А.М. Янников. - Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2022. 132 с.

III. КРИОГИДРОГЕОЛОГИЯ

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА НАЛЕДЕЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО И ЮЖНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Верхотуров А.Г.
Забайкальский государственный университет, Чита. weral0606@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрена динамика процесса наледеобразования в центральном и южном Забайкалье за многолетний период. Основными источниками наледеобразования здесь являются грунтовые, надмерзлотные воды, воды подрусловых таликов, трещинно-жильные и трещинно-пластовые воды, разгружающиеся по сквозным таликам. Участки разгрузки вод подрусловых таликов и вод глубокого стока, как правило, локализованы в пространстве, а места разгрузки грунтовых и надмерзлотных вод, существенно зависят от состава поверхностных отложений, глубин сезонного оттаивания и количества осадков, выпавших в летне-осенний период, поэтому наледи этого типа являются труднопрогнозируемыми. Несмотря на небольшие объемы, они представляют реальную угрозу населенным пунктам, объектам инфраструктуры и требуют значительных затрат на противоналедную борьбу.

***Ключевые слова**: подземные воды, наледи, динамика, воздействие, ущерб*

Abstract. The article considers the dynamics of the ice formation process in the central and southern Transbaikalia over a long period of time. The main sources of ice formation here are groundwater, permafrost waters, waters of subsurface taliks, fractured-vein and fractured-formation waters discharged through through taliks. The areas of discharge of waters of subsurface taliks and deep runoff waters, as a rule, are localized in space, and the places of discharge of groundwater and permafrost waters significantly depend on the composition of surface sediments, the depths of seasonal thawing and the amount of precipitation that fell in the summer-autumn period, therefore, ice of this type are difficult to predict. Despite their small volumes, they pose a real threat to human settlements, infrastructure facilities and require significant costs for anti-ice warfare.

***Keywords:** groundwater, ice, dynamics, impact, damage*

Борьба с наледями в центральном и южном Забайкалье в последнее десятилетия является весьма актуальной проблемой. Наледи подтапливают объекты инфраструктуры, личные подворья, вызывают значительный материальный ущерб, который в наиболее многоводный год 2022 г. превысил 60 млн руб, причем наледеобразование наблюдалось на территории 10 муниципальных образований в 42 населённых пунктах. В шести районах края объявлялся режим чрезвычайной ситуации, было подтоплено 134 приусадебных участка, подполья 49 жилых домов. Наледи перекрывали движение на 12 участках дорог протяженностью 3700 м (рис. 1). Несколько меньшие объемы наледобразования наблюдаются ежегодно в этой части Забайкальского края с 2018 г.

Впервые детально изучать наледи территории Забайкалья стали инженеры, работавшие на изысканиях для проектирования и строительства Транссибирской магистрали: Н.М. Козьмин (1892), С.А. Подъяконов (1903), А.В. Львов (1916). Позднее этими проблемами занимались Н.И. Толстихин (1941), В.Р. Алексеев (1970, 1973), И.А. Некрасов (1976), Д.М. Шестернев (2005, 2006) и др. [1,6]. Исследования наледей в центральной и южной частях Забайкальского края выполняются с 80-х годов прошлого века сотрудниками кафедры гидрогеологии и инженерной геологии ЗабГУ.

Наледи представляют реальную опасность для автомобильных и железных дорог. Так вдоль полотна Забайкальской железной дороги насчитывается 78 наледей общей протяженностью 10,66 км. Основное их количество сосредоточено на Читинской, Могочинской и Амазарской дистанциях пути. Опасными в отношении наледеобразования являются участки 237, 247 км и др. автомобильной дороги «Амур».

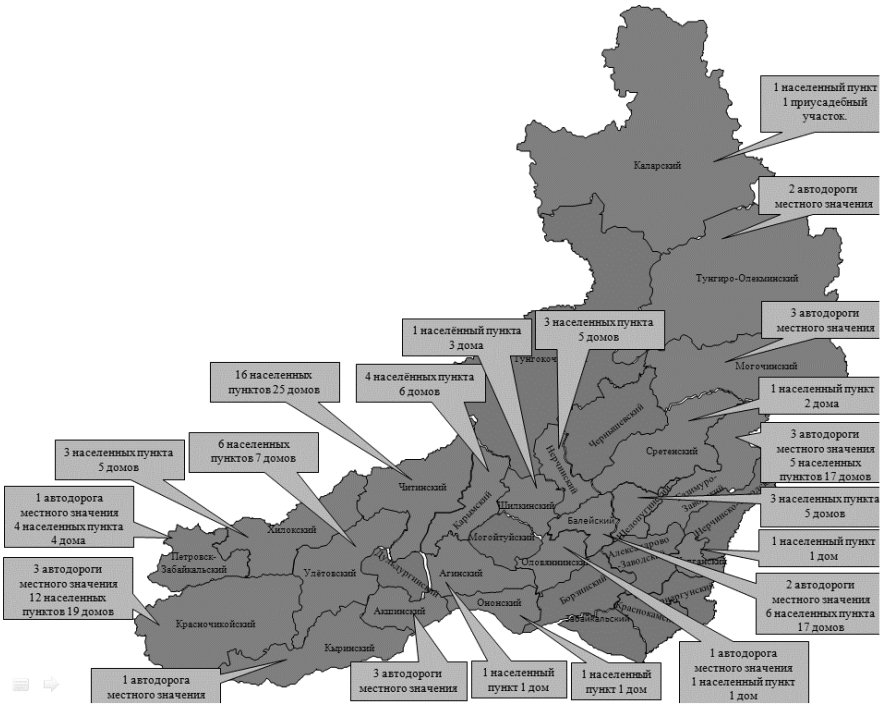


Рис. 1. Районы Забайкальского края, наиболее подверженные риску образования наледей [2]

О необходимости более детальных исследований на наледных участках поднимались вопросы на научных конференциях регионального, всероссийского и международного уровней. За многолетний период вопрос изучения причин наледеобразования и разработки рекомендаций по защите территории от наледной опасности был положительно решен только для трех наледеопасных участков: 1) на пересечении автомобильной дорой «Байкал» руч. Суходол в пос. Песчанка, 2) на участке пересечения автомобильной дорогой ручья Смоленка в г. Чите, 3) на Забайкальской железной дороге 6277-6278 км. По результатам изысканий, в первых двух случаях был рекомендован и реализован безналедный пропуск путем строительства мостов с увеличенными пролетами, во втором случае реализован комплекс мероприятий, основным из которых явилось устройство подземного дренажа наледеобразующих вод с последующим выводом их на рельеф. Затраты на ликвидацию наледной опасности и реконструкцию земляного полотна на 6277-6278 км Забайкальской железной дороги составили 598,943 млн. руб. К сожалению, несмотря на неоднократные предложения по выполнению тематических работ по установлению причин формирования наледей на других объектах и разработки рекомендаций по предотвращению наледеобразования [4], положительных решений от Министерства природных ресурсов Забайкальского края и других организаций не было.

Целью наших исследований являлось изучение причин активизации наледеобразования в последние годы и анализ возможных мероприятий по предотвращению наледной опасности в центральной и южной частях Забайкальского края. Задачей работ было выявление территорий и объектов, которые наиболее подвержены воздействию наледей на рассматриваемой территории в последние десятилетия. Для решения этой задачи был осуществлен сбор, анализ и обработка материалов по наледям центральной и южной части территории Забайкальского края, выполнено дешифрирование космических и аэрофотоснимков. Для этого были использованы спутниковые снимки Забайкальского края, которые имеются в общем доступе в сервисе «Google Планета Земля». На отдельных участках было проведено полевое обследование наледей при ликвидации чрезвычайных ситуаций (пос. Баляга,

пос. Красный Чикой и др.). Значительное время было уделено анализу гидрометеорологических условий территории их изменчивости и влиянию на наледеобразование на рассматриваемой территории. Информация о изменении гидрометеорологических условий получена с портала «Погода и климат» и с климатических справочников.

По результатам исследований установлено, что центральная и южная часть Забайкальского края характеризуются незначительной относительной наледностью (отношение площади наледей к площади водосборного бассейна f $=(S_н/S)\times100, \%$). Несмотря на большое количество наледей на данной территории (табл.1), их размеры (площадь и объемы) являются весьма скромными по сравнению с наледями северного Забайкалья. При проведении расчетов принимались во внимание наледи подземных вод, и наледи смешанного питания (речных и подземных вод).

Таблица 1. Распространение и характеристика основных наледных бассейнов Забайкалья

Наледные бассейны		Количество наледей	Объем наледей, млн. м^3	Объем единичной наледи, тыс. м^3	Относительная наледность бассейна, %
По географической приуроченности	VII порядка				
Центрального Забайкалья (52–56^o с.ш.)	Ингодинский	452	19,0	42,0	0,09
	Хилокский	347	15,9	45,8	0,07
Южного и юго-восточного Забайкалья (49–52^o с.ш.)	Чикойский	397	15,3	38,5	0,09
	Ононский	588	30,1	51,2	0,04
	Газимур-Аргунский	672	26,4	39,3	0,025

Средняя мощность природных наледей на рассматриваемой территории за многолетний период колеблется от первых десятков сантиметров до 1,1 м, составляя в среднем 0,5-0,6 м и менее. Площадь наледей изменяется от первых сотен до первых тысяч квадратных метров. Параметры наледей на юго-западе Забайкалья (Чикойский и Хилокский наледные бассейны) и на юго-востоке (Ононский, Газимурский-Аргунский наледные бассейны) мало отличаются от аналогичных параметров наледей центрального Забайкалья. Общее количество наледеобразующих источников в центральном и южном Забайкалье превышает 2500, их суммарный расход оценивается в 5,4 м^3/с, а объемы отдельных наледей составляют в среднем 40 000 м^3. [6].

Причины подтопления инженерных сооружений наледями грунтовых и надмерзлотных вод связаны, в первую очередь, с характером рельефа и гидрогеологическими условиями территории. Наличие неглубоко залегающего первого от поверхности водоносного горизонта грунтовых (надмерзлотных) вод уже предполагает возможность подтопления фундаментов и подвальных помещений жилых и производственных зданий, а выпадение летом повышенного количества осадков (особенно в течение нескольких лет подряд) создает благоприятные условия для подъема уровней грунтовых и надмерзлотных вод. При высоких уровнях воды в поверхностных водотоках и быстром их промерзании происходит подпор подземных вод в прибрежной зоне, и русло реки из области разгрузки превращается в область питания надмерзлотных и грунтовых вод [5]. В результате резко роста напоров воды либо прорываются на поверхность в виде наледей, либо ищут новые пути движения, иногда разгружаясь в подполья, затапливают здания.

На высоких речных террасах при промерзании слоя сезонного оттаивания происходит уменьшение живого сечения потока надмерзлотных вод, что создает условия для прорыва подземных вод на поверхность или в подвальные помещения под

отапливаемыми зданиями, где отсутствует сезонная мерзлота. Высокие уровни грунтовых вод в многоводные годы при наличии неглубоко залегающих литологических водоупоров при сезонном промерзании вызывают почти аналогичные последствия, но при возрастании напора в водоносном горизонте часть грунтовой влаги мигрирует в сторону талого водоупора.

Для Забайкальского края характерно чередование маловодных циклов и периодов с повышенным количеством атмосферных осадков, выпадающих в жидкой фазе [6]. В маловодные годы наледность территории, в зависимости от типа наледеобразующего источника, кое-где снижается до нуля, а на остальной территории отмечается значительное уменьшению параметров наледей и существенно снижается наледная опасность.

По нашим наблюдениям, данным гидрологических постов Забайкальского УГМС, сводок МЧС, периоды активизации наледей грунтовых, надмерзлотных вод и имеющих смешанный тип питания (поверхностными и подземными водами) в Забайкалье были отмечены в 1963, 1968, 1970, 1971, 1974, 1989, 1991, 1999, 2001. 2008, 2013 и в период с 2019 по 2023 гг.

Режим формирования наледей надмерзлотных и грунтовых вод, при отсутствии разгрузки подземных вод глубокого стока, зависит от климатогидрологических факторов и интенсивности водообмена грунтовых и поверхностных вод в реках. Цикличность развития наледных процессов на территории Забайкальского края не имеет строгого определенных временных интервалов, что связано с существенно различной температуро- и влагообеспеченностью по площади. Температуру воздуха определяет продолжительность существования Сибирского антициклона в зимний период, а количество осадков направлением прохождения циклонов в летне-осенний период. Например, если для г. Читы среднегодовое количество осадков в летний период 2021 г. было близким к норме (345 мм), то для г. Нерчинск и г. Сретенск оно составило соответственно 577 и 635 мм, и было аномально высоким. В г. Чите аномальное количество осадков выпадало в 2018 г. (рис. 1)

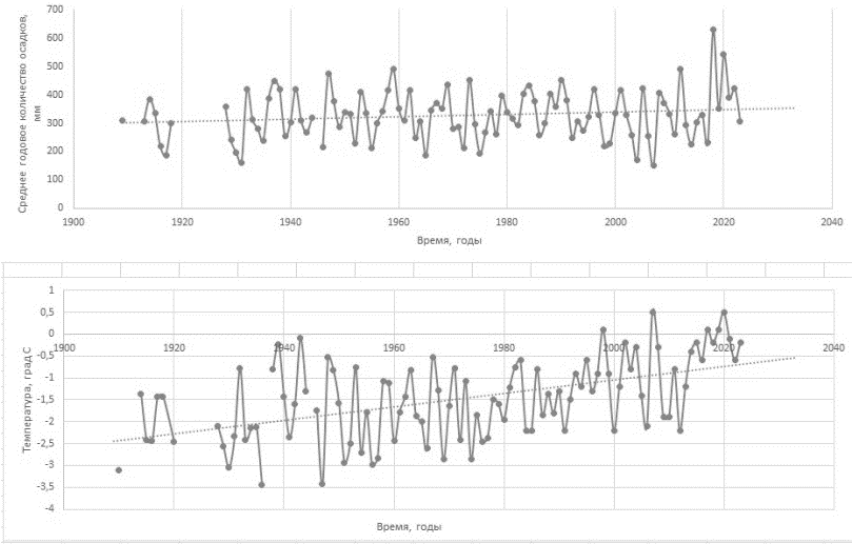


Рис. 2. Многолетние изменения климатических характеристик на территории г. Читы и линия тренда

Если основная доля осадков приходится на август-сентябрь, то устанавливаются более высокие уровни подземных и поверхностных вод в предзимний период, чем уровни на аналогичных участках, где основные осадки были в июне-июле. Поэтому наледеобразование в Сретенском районе, где количество атмосферных осадков в августе-

сентябре 2021 г. составило 260 мм, проявилось значительно интенсивнее, чем в Нерчинском (150 мм), а в последнем интенсивнее, чем в Читинском, где количество атмосферных составило 151 мм.

Чем ниже температуры воздуха в ноябре-декабре, тем выше скорость промерзания грунтов и тем раньше начинают формироваться многочисленные наледи, как это наблюдалось в осенне-зимний период 2023 г. Результаты анализа температур за многолетний период показывают, что наблюдается тренд их постоянного повышения, причем в последнее десятилетие они оказывались (в среднем) выше минус 0,5 ºС. Для осадков линия тренда почти не выражена, хотя определенная цикличность смены маловодных периодов многоводными очевидна.

В аномально многоводные 2018-2019 гг. (г. Чита), 2021-22 гг. (г. Сретенск и др.) наледи грунтовых и надмерзлотных вод начинают образовываться на участках, где их не было длительное время. Участки формирования более крупных гидрогеогенных наледей, за счет подземных вод глубокой циркуляции, как правило, постоянны и не зависят от водности года.

Таким образом, на территории центрального и южного Забайкалья, в зависимости от направления прохождения летних циклонов, отмечается синхронное с повышенной водностью года возрастание наледной опасности. Например, на территориях южных и юго-западных районов Забайкальского края повышенная активность наледобразования отмечалась зимой 1998-1999 гг., когда после относительно многоводного года для (400-500 мм осадков) создалась очень тяжелая ситуация, связанная с образованием наледей. Только прямой ущерб по 9 районам составил более 4 млн. рублей [3]. В г. Чите за этот же период выпало незначительное количество атмосферных осадков (218 мм) и существенных проблем с наледями не было, то есть сдвиг в активности наледных процессов составляет 1-2 года. В период 2021-2022 гг., характеризующийся аномально высоким количеством атмосферных осадков, для южных и юго-восточных районов Забайкальского края отмечена исключительно высокая наледная опасность для населения, объектов инженерной и хозяйственной деятельности, а на территории г.Читы, наоборот, отмечалось снижение активности наледеобразования.

Затраты на борьбу с наледеобразованием с 2018 г. на селитебных территориях и защита транспортных инженерных сооружений от негативного воздействия наледей в центральных и южных районах Забайкальского края в последние годы составили сотни миллионов рублей. В текущем 2024 г. в 6 районах активно формировались наледи, причем в 2 населенных пунктах был введен режим ЧС.

Борьба с наледями требует всестороннего изучения гидрогеологических, геокриологических и инженерно-геологических условий территории и факторов, влияющих на наледеобразование. Разовых обследований наледных участков недостаточно для разработки оптимального комплекса противоналедных мероприятий.

Для оценки наледной опасности в условиях подпора грунтовых и надмерзлотных вод речными водами при промерзании водотоков следует использовать гидрологические прогнозы изменения уровней поверхностных вод и уровней первого от поверхности водоносного горизонта по берегам водотоков. Это позволяет осуществлять профилактические мероприятия по своевременному дренажу грунтовых и надмерзлотных вод от жилых и хозяйственных объектов.

Борьба с наледями требует своевременного отвода и разгрузки наледеобразующих вод в поверхностные водотоки, на рельеф или в естественные и искусственные ёмкости. Рекомендуется применять магистральное и локальное дренирование, в том числе и с использованием подземных дренажных коллекторов [4], устройство и надлежащее содержание уличного дренажа. В случаях возникновения чрезвычайных ситуаций для защиты от наледей хорошо зарекомендовали себя дамбы из грунта и отвод наледеобразующих вод путем создания траншей в теле наледи с целью снижения величин напора подземных и поверхностных вод.

Список литературы

1. Гидрогеология Забайкальского края / А.Г. Верхотуров [и др.]; под общ. ред. В.И. Цыганка; Забайкал. гос. ун-т. – Чита: ЗабГУ, 2017. – 240 с.

2. Звягинцев, В.В. Динамика образования наледи в условиях Восточного Забайкалья: исследование с использованием данных дистанционного зондирования Земли / В.В.Звягинцев, О.Ю. Звягинцева // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т.28, №7. С.17-24.

3. Кондратьев, В.Г. Концепция системы мониторинга опасных наледных процессов на территории Читинской области / В.Г. Кондратьев. – Чита: Забтранс, 2000. –112 с.

4. Пестов, В.М. К вопросу о комплексной системе мониторинга опасных наледных процессов в Забайкальском крае / В.М. Пестов //Геокриологические проблемы Забайкалья и сопредельных территорий: Пятая междунар. науч.-практ. конф. Забайкал. гос. ун-т. – Чита. – 2015. – С. 85-89.

5. Шепелёв, В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны / В.В. Шепелёв. – Новосибирск, изд-во «Гео». 2011. – 169 с.

6. Шестернев, Д.М., Верхотуров, А.Г. Наледи Забайкалья / Д.М. Шестернев, А.Г. Верхотуров. – Чита, ЧитГУ, 2006. – 213 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПИТЬЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ГРАНИЦЕ АЛДАНСКОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МАССИВА И ЯКУТСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА

Гайдукевич В.А., Федоров А.А.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
677010, Якутск, ул. Мерзлотная 36. Россия; gidrosfera_fedorov@mail.ru

Аннотация. На основе анализа фондовых материалов и результатов геологоразведочных работ рассмотрены гидрогеологические условия участков месторождений питьевых подземных вод на границе двух крупных гидрогеологических структур в Южной Якутии. Большое количество атмосферных осадков, островное распространение многолетнемерзлых пород, а также расположение месторождений в зоне перелива подземных вод из гидрогеологического массива в артезианский бассейн в совокупности обеспечивают высокую обводненность пород и дают возможность увеличения запасов подземных вод по промышленной категории.

Ключевые слова. *месторождение питьевых подземных вод, Алданский гидрогеологический массив, Якутский артезианский бассейн, островная мерзлота, водоносный комплекс карбонатных отложений.*

Annotation. The article provides an analysis of geological fund data and geological prospecting works conducted at the drinking-quality groundwater deposit on the border of two large hydrogeological structures in South Yakutia. The main contributors to the high-water saturation of the aquifer are the large amounts of precipitation, the sporadic distribution of permafrost, and the location of the deposit in a transition zone where groundwater flows from a hydrogeological massif into an artesian basin. This allows for an increase in groundwater reserves for добычи.

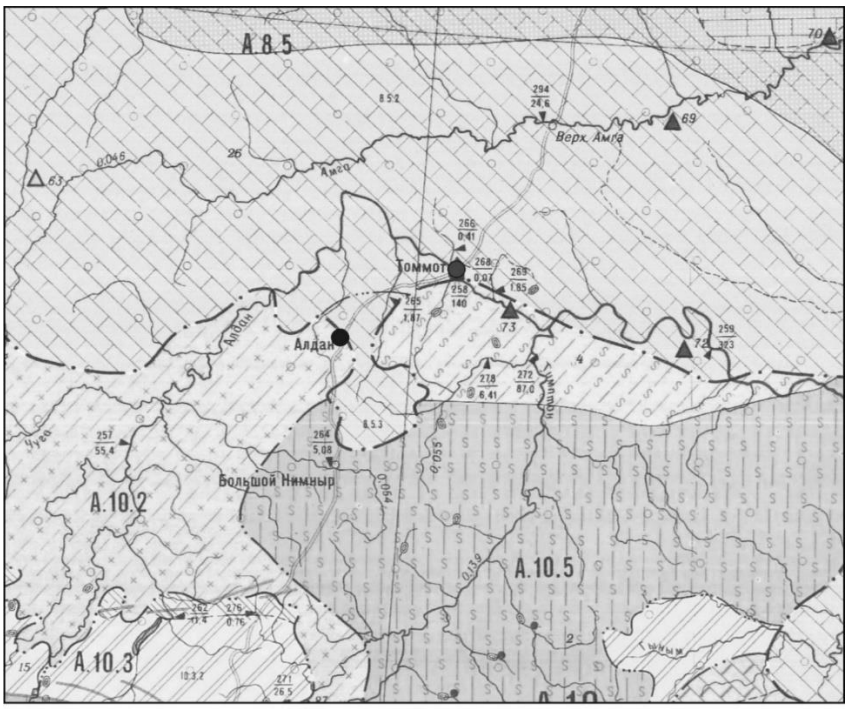
Keywords. *Drinking-quality groundwater, Aldan hydrogeological massif, Yakutian artesian basin, sporadic permafrost, carbonate-rock aquifers.*

В Республике Саха (Якутия) острой проблемой является питьевое водоснабжение, поскольку поверхностные и подземные воды в большей степени в своем природном качестве не соответствуют требованиям, предъявляемым к питьевым водам, вследствие чего практически на всех водозаборах требуется специальная водоподготовка. Наиболее благоприятная обстановка для формирования пресных подземных вод сложилась в Южной Якутии, где многолетнемерзлые породы имеют островное или прерывистое распространение. Широкое развитие талых пород на водоразделах является

благоприятным фактором для инфильтрационного питания подземных вод и хороших условий водообмена [1, 2]. По степени увлажнения территория Южной Якутии относится к зоне достаточного увлажнения. По данным метеостанций в г. Алдан и г. Томмот в среднем за год выпадает до 633 мм атмосферных осадков. Большая их часть выпадает в виде дождя в теплое время года (64–77 %). Наиболее дождливыми месяцами являются июль и август (32–40 % от годовой нормы). Зимой высота снежного покрова достигает максимальной величины в середине марта (41–105 см) [3].

Целью настоящей работы являлось доизучение гидрогеологических условий на участке «Коса Седнова» (скважина 1-РЭ) и участке «руч. Кистановский» (скважина №36-Э) Синегорского и Алданского месторождений подземных вод соответственно, разведанных Южно-Якутской геологоразведочной экспедицией в конце 1980-х – начале 1990-х годов. Основные геологоразведочные работы в 2021-2022 гг. заключались в выполнении опытно-фильтрационных работ в скважинах, которые были пробурены на стадии разведки месторождений, годовом цикле режимных наблюдений за уровнями и гидрохимическом опробовании подземных вод, лабораторных исследованиях отобранных водных проб. Скважины 1-РЭ и №36-Э до 2021 г. не эксплуатировались.

В гидрогеологическом отношении район находится на стыке Якутского артезианского бассейна и Алданского гидрогеологического массива [2]. Алданское месторождение пресных подземных вод (МППВ) расположено на северной окраине Алдано-Тимтонского гидрогеологического массива, входящего в состав Алданского гидрогеологического массива [4]. Месторождение подземных вод Синегорье находится в южной части Лено-Амгинского артезианского бассейна, который является частью Якутского артезианского бассейна (рис. 1).



Условные обозначения

A.8 Якутский АБ
A.8.5 Лено-Амгинский АБ
A.8.5.2 Амгинский АБ
A.8.5.3 Юхтино-Ылымахкский АБ
A.10 Алданский ГГМ
A.10.2 Алдано-Тимтонский ГГМ
A.10.3 Чульманский АдАБ
A.10.3.2 Алдано-Чульманский АдАБ
A.10.5 Сутамо-Сунаннгинский ГГМ

● *Участок «Коса Седнова» МППВ Синегорье (скважина №1-РЭ)*

● *Участок «руч. Кистановский» Томмотский УППВ Алданского МППВ (скважина №36-Э)*

Рис. 1. Фрагмент Карты мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири масштаб 1:2 500 000 (1980 г.)

Рассматриваемые месторождения подземных вод приурочены, согласно классификации Н.Н. Романовского [5], к снежногенно-инфильтрационным таликам и расположены в долинах водотоков. Талики непосредственно связаны с тектоническими разломами и зонами повышенной трещиноватости. Особенно благоприятные условия для формирования подобных таликов создаются в областях распространения закарстованных карбонатных пород [1].

Алданское месторождение находится в 30 км южнее г. Алдан, на северном склоне Алданского щита и приурочено к депрессии архейского фундамента, заполненной карбонатными породами венда и кембрия, а также четвертичными отложениями. Скважиной №36-Э образования архейского возраста не вскрыты. Мощность венд-кембрийских отложений в пределах месторождения изменяется от 0 до 250 м. Породы интенсивно трещиноваты и закарстованы. Перекрывающие четвертичные отложения на склонах представлены щебнистым материалом с супесчаным и суглинистым заполнителем. В долине р. Томмот состав четвертичных отложений весьма пестрый - от валунно-галечных отложений с песчано-глинистым заполнителем до песков, супесей и суглинков. Мощность рыхлых образований до 8-10 м.

Ручей Кистановский является правым притоком р. Томмот. В долине ручья изучался водоносный комплекс венд - нижнекембрийских карбонатных отложений (V-$Є_1$). Он вскрыт скважиной №36-Э в интервале глубин 8,0–76,5. Водовмещающие породы – доломиты закарстованые трещиноватые. По типу фильтрации подземные воды относятся к трещинно-карстовым. Их пьезометрический уровень в течение года изменяется в пределах +0,60–+0,88 м от поверхности земли. Для оценки фильтрационных свойств выполнена опытная одиночная откачка продолжительностью 120 часов с дебитом 25,5 л/с или (2203 $м^3$/сут). Стационарный режим фильтрации подземных вод наступил в первые минуты откачки. При этом достигнуто понижение уровня воды 0,37 м, а удельный дебит скважины составил 68,92 л/с*м. Значение коэффициента водопроводимости пород равно 6892 $м^2$/сут.

По данным годового цикла (июнь 2021 г. – июнь 2022 г.) режимных наблюдений за уровнем подземных вод в скважине №36-Э, максимальный уровень подземных вод был в июне 2021 г., когда он составил +0,88 м над уровнем земли, а дебит самоизлива скважины – 9,8 л/с (рис. 2). Минимальный уровень (+0,60 м от уровня земли) наблюдался с декабря 2021 г. по апрель 2022 г. В водно-критический период года дебит самоизлива скважины изменялся от 3,4 л/с до 1,0 л/с. Размах годовых колебаний уровня подземных вод составил 0,28 м. Среднегодовой дебит самоизлива по скважине №36-Э равен 5,9 л/с. Анализ изменения уровня подземных вод подтверждает инфильтрационное питание водоносного горизонта талыми снеговыми водами и летними атмосферными осадками. Разгрузка подземных вод осуществляется в днище долины реки Томмот.

По результатам гидрохимического опробования, выполненного при детальной разведке в 1989 г. подземные воды из скважины №36-Э гидрокарбонатные, магниево-кальциевые, пресные с минерализацией 0,17 г/$дм^3$. По значению водородного показателя подземные воды нейтральные pH 7,1. Согласно данным гидрохимического опробования 2021-2022 г. химический состав подземных вод не претерпел изменений. В его анионном составе воде также преобладают ионы гидрокарбоната (88-96 %), в катионном составе – ионы магния (36-48%) и кальция (50-71 %). Подземные воды пресные, с минерализацией до 0,37 г/$дм^3$. По значению водородного показателя воды от нейтральных до слабощелочных (pH - 7,8 - 8,1). По всем показателям подземные воды из скважины соответствуют современным требованиям, предъявляемым к питьевым водам.

Запасы подземных вод на участке недр «руч. Кистановский» Томмотского УППВ Алданского МППВ (скважина №36-Э) оценены по категории В в объеме 1000 $м^3$/сут. При необходимости существует возможность увеличения запасов.

Месторождение подземных вод Синегорье также приурочено к северному склону Алданской антеклизы. В геологическом строении территории принимают участие

доломиты и известняки усть-юдомской свиты верхнего отдела венда. В пределах месторождения мощность карбонатной толщи превышает 144 м. В разрезе отмечается чередование плотных и трещиноватых пород, нередко с включением битума. С поверхности до глубины 5-15 м развиты четвертичные аллювиальные отложения – гравийно-галечные отложения с супесчаным заполнителем. В районе исследований развиты региональные разнонаправленные разрывные нарушения с оперяющими их трещинами. По карбонатным породам широко развит карст, вследствие чего они обладают высокой неоднородностью фильтрационных свойств, которая проявляется в изменении на один-два порядка водопроводимости пород и удельных дебитов скважин. На отдельных участках комплекс перекрыт многолетнемерзлыми породами мощностью от 2,5 до 9,5 м.

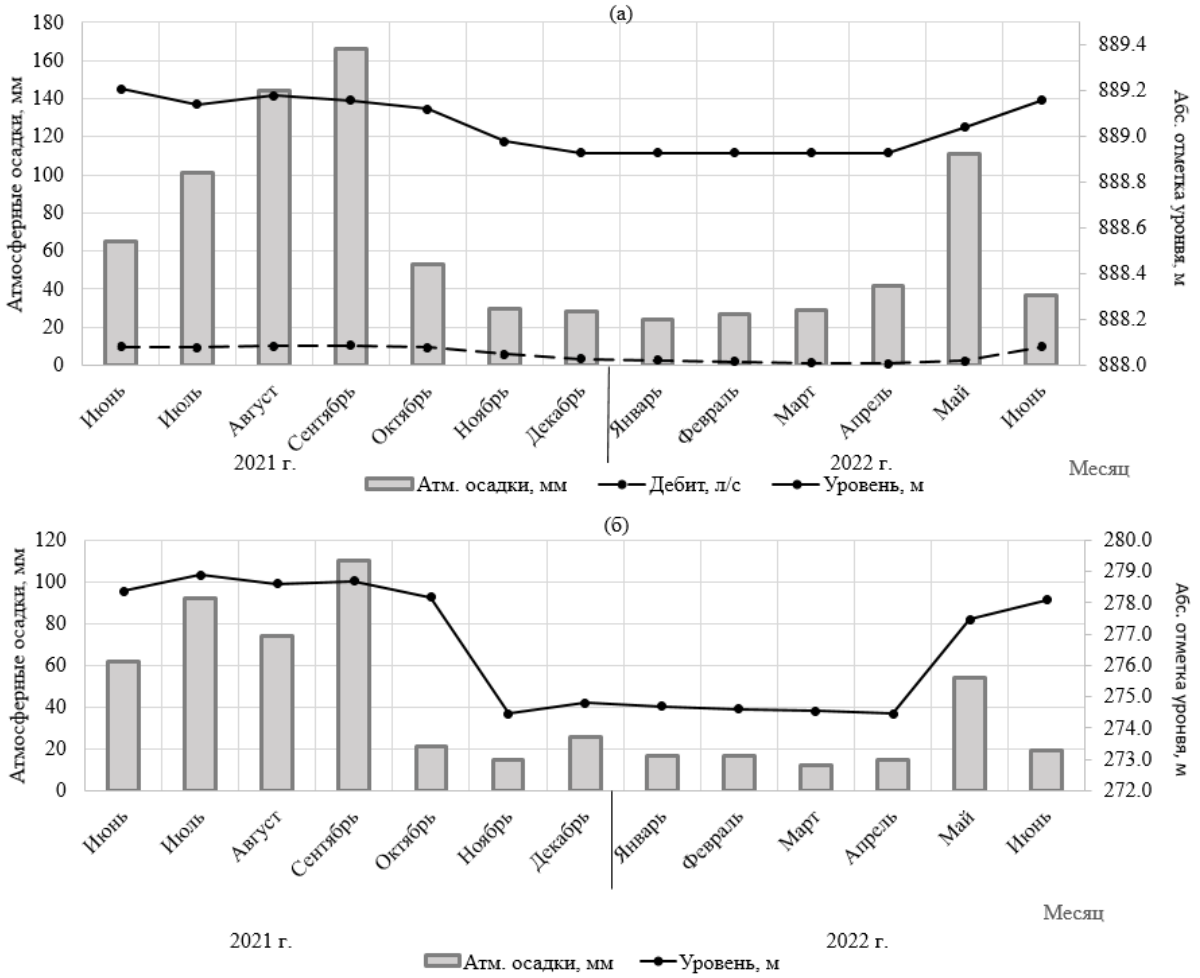


Рис. 2. Изменение количества атмосферных осадков, уровня подземных вод и дебита самоизлива из скважины 36-Э на участке «руч. Кистановский» (а) и количества атмосферных осадков, уровня подземных вод в скважине 1-РЭ на участке «Коса Седнова» (б)

Участок «Коса Седнова» находится на пойме р. Алдан в 2 км севернее г. Томмота. Скважиной 1-РЭ в интервале 8,0 150,0 опробован водоносный комплекс вендских карбонатных отложений – V. Водовмещающие породы – трещиноватые доломиты с включениями битума. Подземные воды комплекса напорно-безнапорные, глубина залегания их статического уровня в течение года изменяется от 4,42 до 8,44 м от поверхности земли.

Опытная одиночная откачка продолжительностью 120 часов проведена с дебитом 12,0 л/с или (1036 м^3/сут). При этом уровень подземных в первые минуты откачки

понизился на 0,11 м и до конца опыта не изменялся. Удельный дебит скважины составил 109,09 л/с*м. а коэффициент водопроводимости – 15000 м^2/сут. Такие высокие значения параметров, характеризующие водообильность пород, связаны с нахождением скважины в области разгрузки подземных вод. О расположении оцениваемого месторождения в области частичной разгрузки подземных вод свидетельствует наличие вблизи изучаемого участка родников с дебитом до 100 л/с и более в многоводные периоды.

Питание водоносного горизонта обеспечивается инфильтрацией атмосферных осадков на талых водоразделах, а также перетеканием подземных вод из нижнекембрийского водоносного горизонта, имеющего широкое площадное распространение к западу от г. Томмот.

По результатам выполненных режимных наблюдений за уровнем подземных вод в скважине №1-РЭ максимальный уровень подземных вод был в июле 2021 г. и составил 4,02 м от поверхности земли. В течение зимнего периода уровень воды понизился до глубины 8,44 м. Годовой размах его колебаний составил 4,42 м. Таким образом, общие закономерности формирования режима подземных вод проявляются в устойчивом зимне-весеннем спаде их уровней и летне-осеннем подъеме. Спад уровней отмечается до апреля, подъем до октября.

При детальной разведке месторождения Синегорье в 1991 г. было установлено, что подземные воды из скважины №1-РЭ гидрокарбонатные, магниево-кальциевые, пресные с минерализацией от 0,31–0,34 г/дм^3. По значению водородного показателя подземные воды нейтральные и слабощелочные (pH 7,5-8,2). Согласно данным гидрохимического опробования 2021-2022 гг., подземные воды из скважины №1-РЭ остаются в том же качестве: в их анионном составе преобладают гидрокарбонат-ионы (92-96%), в катионном составе – ионы магния (44-53%) и кальция – 44-52%. По значению минерализации воды классифицируются как пресные с минерализацией от 0,18 г/дм^3 до 0,35 г/дм^3. По значению водородного показателя - воды нейтральные – pH составляет от 7,4 – 7,8. для питьевых целей они могут использоваться в природном качестве.

По результатам доразведки запасы подземных вод на участке «Коса Седнова» оценены по категории В в объеме 1000 м^3/сут.

Подземные воды рассматриваемых месторождений содержатся в карбонатных породах вендского и нижнекембрийского возраста, представленными закарстованными, трещиноватыми доломитами. Неравномерная трещиноватость и закарстованность водовмещающих пород при высокой изменчивости их фильтрационных свойств, отсутствие питания подземных вод в зимний водно-критический период и островной тип распространения многолетнемерзлых пород определяют вторую группу сложности гидрогеологических условий месторождений.

Подземные воды охарактеризованных месторождений приурочены к зоне свободного водообмена, что положительно отражается на качестве подземных вод. Существует возможность их использования не только для централизованного питьевого водоснабжения, но и реализации питьевой воды в розлив. Благоприятные условия питания водоносных горизонтов, к числу которых относятся островное распространение многолетнемерзлых пород, большое количество атмосферных осадков, расположение изучаемых месторождений в зоне перелива подземных вод из гидрогеологического массива в артезианский бассейн обеспечивают высокую обводненность пород и дают возможность увеличения запасов подземных вод по промышленной категории.

Список литературы

1. Южная Якутия. Мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / Н.И. Труш, А.Б. Чижов, Н.И. Чижова и др. М.: Изд-во МГУ, 1975, 444 с.

2. Гидрогеология СССР, т. 20, Якутская АССР. Якутское геологическое управление. Институт мерзлотоведения СОРАН СССР. М., Изд-во Недра, 1970, 384 с.

3. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып.24. Якутская АССР, кн.1 (Сер.3.

Многолетние данные, ч.1-6). Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 607 с.
4. Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири масштаба 1:2 500 000 / гл. редактор Мельников П.И., зам гл. редактора О.Н. Толстихин, составители: Иванова Л.Д., Ломовцева Н.С., Никитина Н.М., Пигузова В.М.). М., ГУГК, 1984.
5. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М., изд-во МГУ, 1983. 231 с.

МЕРЗЛОТНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Глотов В.Е.[1], Абукова Л.А.[2]
[1]ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН, Магадан
E-mail: geoecol@neisri.r
[2]ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, Москва,
E-mail: abukiva@ipng.ru

Аннотация. Доказываются практическая целесообразность и реальные возможности получения «зеленого» водорода за счет использования возобновляемых источников энергии (ветровой и солнечной), а также ресурсов поверхностных пресных вод на Крайнем Северо-Востоке России. Сделан вывод о том, что в этом крае сезонное производство водорода вполне может обеспечить промышленную генерацию водорода в объеме свыше $50 \cdot 10^9$ т. Определяются первостепенные задачи по организации центров производства водорода с современной системой обеспечения его экологической чистоты за счет надежного улавливания парниковых газов (CO_2 и др.).

Ключевые слова: *Северо-Восток России, «зеленый» водород, центр производства водорода, солнечная и ветровая энергия, ультрапресные воды*.

Abstract. The practical expediency and real possibilities of obtaining "green" hydrogen through the use of renewable energy sources (wind and solar), as well as surface freshwater resources in the Far North-East of Russia are proved. It is concluded that seasonal hydrogen production in this region may well provide industrial hydrogen generation in excess of 50•109 tons. The primary tasks for the organization of hydrogen production centers with a modern system for ensuring its environmental cleanliness due to reliable capture of greenhouse gases (CO2, etc.) are determined.

Keywords: *North-East Russia, "green" hydrogen, hydrogen production center, solar and wind energy, ultra-fresh water.*

Три года назад (05.08.2021 г.) Правительством Российской Федерации (РФ) утверждена «Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации» [1]. Это можно считать началом низкоуглеродного этапа развития основных отраслей отечественной экономики. В значительной степени это связано с переходом на водород как экологически чистый энергоноситель, использование которого снижает выбросы парниковых газов.

Во всём мире наиболее экономически эффективным способом получения водорода признана паровая конверсия метана. Его популярность связана с простотой технических решений, дешевизной (в сравнении с другими технологиями) получения водорода. Недостатком является попутная большеобъемная генерация диоксида углерода. Технологический комплекс Carbon Capture and Storage (CCS), направленный на улавливание, утилизацию и использование диоксида углерода, существенно нивелирует основной недостаток парового реформинга, обеспечивает получение так называемого «голубого» водорода», пригодного для экспортных поставок.

Перспективно использовать восполняемые источники электроэнергии: ветровые установки, солнечные батареи, силу морских приливов-отливов и др. для выработки из воды водорода, называемого «зелёным», методом электролиза, без выделения углекислого газа.

В «Климатической доктрине Российской Федерации» [2], утвержденной Указом Президента 26.10.2023 г. (№ 812 п. 42), предусмотрено, что «…РФ будет способствовать исследованиям и разработкам в области энергоэффективности, использования возобновляемых источников энергии», что непосредственно связано с развитием водородной энергетики. Можно полагать, что в скором времени «зелёный» водород будет более экономичным, чем «голубой».

С учетом сказанного предлагаем безотлагательно начать подготовку к опытному производству водорода путем электролиза воды, предусмотрев в технологической схеме получение необходимой электроэнергии путем эксплуатации возобновляемых энергетических ресурсов (солнечной, ветровой) северо-восточной окраины РФ – территории, относительно приближенной к основным потребителям энергии – странам Юго-Восточной Азии (Япония, Южная и Северная Корея, Китай, Индонезия и др.).

Такой выбор не случаен: полуостровное положение этого региона на высоких северных широтах (выше 59° с. ш.), преобладающий гористый рельеф предопределяют широкий спектр гидрологических и климатических ресурсов возобновляемой энергии для производства водорода. Количественные характеристики их различаются на Циркумарктическом и Циркумтихоокеанском склонах Главного водораздела Земли, значительны отличия климата на морских побережьях и в континентальных условиях.

Для практического применения возобновляемых ресурсов необходимо создание региональных центров производства водорода (ЦПВ), включая объекты его аккумуляции, хранения и транспортировки. Принципиально важной задачей таких центров должно стать водообеспечение технологического процесса. Как следствие, необходима оценка ресурсов природной воды с общей минерализацией не более 100 мг/дм3 и содержанием хлор-иона меньше 5 мг/дм3 (во избежание выбросов в атмосферу больших количеств хлора). Теоретически на производство 1 т водорода требуются затраты 9 т дистиллированной (деионизированной) воды, а, с учетом возможных потерь на дополнительные расходы, вероятнее всего 12 т. Неограниченный по объему водный ресурс – океаны и подземные воды с высокой минерализацией – не пригоден для получения «зеленого» водорода, так как электролиз приведет к выделению не только водорода, но и хлора. Деионизация методом дистилляции связана с затратой электроэнергии около 717 кВт-ч/м^3 [3]. Следовательно, наиболее экономичным сырьем по сравнению с другими источниками является вода горных рек, подрусловых таликов и сезонно-талого слоя (СТС), не нуждающиеся в дисцилляции.

Вместе с тем, эти воды в зонах гидротермальной минерализации содержат повышенные содержания железа, меди, свинца, цинка, золота, серебра, платина, которые при электролизе накапливаются на катоде, меняя его характеристики. Макрокомпоненты химического состава – натрий, калий, магний, кальций, алюминий при электролизе остаются в воде. Поэтому необходимо предварительно проводить детальные гидрогеохимические исследования для изучения закономерностей формирования химического состава поверхностных и подземных вод в районах, перспективных для сооружения ЦПВ.

Высоким северным широтам свойственно резкое различие климатических показателей в теплый и холодный периоды года. Поэтому мы предлагаем сезонные работы ЦПВ начинать в апреле и завершать в октябре (условно, считая этот период теплым). Однако укажем, что на северо-востоке страны в апреле повсеместно поверхностный сток присутствует лишь в малом числе водотоков, величина его даже в крупных реках невелика. Например, в реке Колыма (пост Дусканья) при водосборной площади 50,1 тыс. км^2 зимний расход в апреле падает до 0,29 м^3/с при среднем годовом

338 м^3/с. До начала таяния снежного покрова минимальное значение модуля подземных вод на водосборе арктических морей ничтожно мал, около 0,1 л/с/км^2 [4]. Это ставит перед гидрогеологами важную задачу выяснения (на допроектном этапе сооружения ЦПВ) возможностей создания искусственных запасов воды в объемах, достаточных для бесперебойной работы ЦПВ ежегодно с апреля до первой декады мая, т. е. до начала массового таяния снега.

Существующие способы магазинирования подземных вод не предполагают сохранения созданных запасов в течение всего холодного периода года с кратковременным их расходованием в апреле. Последнее теоретически можно обеспечить, например, методом искусственного таяния накопляемых массивов снега или путем гидравлического разрыва пласта (по подобию с практикой добычи жидких углеводородов из сланцевых толщ), или иными способами. Эти способы обеспечения ЦПВ ультрапресной водой в апреле - первой декаде мая должны быть тщательно изучены и апробированы на предлагаемом опытном объекте.

Кроме того, для ЦПВ, использующих конкретные виды природных восполняемых энергетических ресурсов, потребуется выполнить специфические геокриологические и гидрогеологические работы. Ряд этих ресурсов достаточно обширен, но большей частью они пока недоступны для освоения. Например, ресурсы шельфа и побережий морей определяются энергией волн, морских постоянных течений, приливов-отливов. Общая длина береговой линии нашего региона около 20 тыс. км. Но на всем этом протяжении поверхность тихоокеанских морей более 6-ти месяцев в году (а в арктических более 9) покрыта дрейфующими льдами толщиной до 2 м. Технически исполнимых способов обеспечения многолетней устойчивой работы стационарных электрогенерирующих установок в условиях дрейфующих ледовых полей пока нет. В СМИ сообщалось о разработках погружных установок, монтируемых на морском дне. Говорилось также о проектах сооружения 2 плотин, перекрывающих Пенжинскую губу Охотского моря, для выработки электроэнергии за счет самых высоких в Тихом океане (до 14 м) приливов. Суммарная мощность приливных ЭС около 108,4·103 МВт, что в 110 раз больше мощности Колымской ГЭС [5]. Однако без решения вопросов защиты плотин от дрейфующего льда, предупреждения возможных негативных следствий изменения существующих течений в Охотском море, инженерно-геологических условий на дне губы, охраны водных животных строительство плотин неосуществимо. Возникает и вопрос снабжения будущего предприятия ультрапресной водой, поскольку в районе Пенжинской губы существует зимний дефицит пресной воды, свойственный всему региону.

В числе географических ресурсов практически важными являются энергетические ресурсы горных рек, потенциал которых хорошо изучен. По последним оценкам, энергия рек региона, учитывая экологические и инженерно-геологические условия строительства, составляет 144,2·10^3 МВт. В перспективе до 2050 г. возможно сооружение 9 ГЭС на Колыме, одной ГЭС на р. Амгуэма и одной на р. Анадырь в Чукотском АО.

Особенности сезонного стока рек определяют необходимость строительства водохранилищ, площади которых обычно соответствуют установленной мощности. Например, для Колымской ГЭС выработка 1 мВт электроэнергии соответствует площади водохранилища 510 га (456 км2 : 900 МВт), Усть-Среднеканской – 460 га/МВт, Зейской – 1250 га/МВт. Для сравнения, аналогичный показатель СЭС в пос. Батагай за Полярным кругом 3,8 га/МВт, а Кольской ВЭС 1,2 га/МВт. Вместе с тем, долины рек в регионах сплошного распространения многолетнемерзлых пород являются оазисами жизни, поэтому сооружение каждой ГЭС с геоэкологической точки зрения негативно.

Практически не изучена и проблема изменения природной среды в нижних бьефах ГЭС. Сооружаемые водохранилища влияют на режим стока, уровень воды в реке, изменение границ и мощности подрусловых таликов, режим функционирования

нерестилищ. Известно, например, что в нижнем бьефе Усть-Среднеканской ГЭС повышение температуры воды в водовыводящих сквозных таликах всего на 0,1°С привело к более раннему созреванию икринок лососевых и сиговых на несколько дней раньше массового появления микроорганизмов – источника питания молоди рыб. В результате большая часть мальков погибла [6]. По комплексу геоэкологических обстоятельств использование энергии рек для производства водорода нерационально.

Из числа климатических ресурсов наиболее технически доступными для освоения в текущем времени являются энергия ветров на морском побережье и солнечного излучения континентальных районов.

Общая величина ветровых энергетических ресурсов на побережьях северо-восточных морей, подсчитанная Ю.А. Соколовским [7], позволяет прогнозировать использование этой энергии для крупнообъемного производства водорода. Мерзлотно-гидрогеологические исследования, предшествующие созданию ЦПВ, наряду с решением вопроса водоснабжения, должны включать изучение устойчивости и безаварийной работы объектов этого центра.

Современная ветровая электрогенерирующая установка (ВЭУ) является сложными инженерным сооружением, состоящим из фундамента, башни (мачты) и гондолы с электрогенератором. На примере Кольской ВЭС мощностью 201 МВт, включающей 57 ветроэнергоустановок (ВЭУ) и запущенной в работу в мае 2023 г., можно увидеть, что каждая башня ВЭУ – это толстостенная стальная труба диаметром 3-4,5 м и высотой 65 м, укрепленная на железобетонном фундаменте толщиной 2,5 м и весом до 600 т. На высоте 84 м сооружена гондола весом 68 т с 3я лопастями длиной 65 м каждая. Для выбора участка ВЭС выполнены детальные инженерно-геологические, включая мерзлотные и гидрогеологические, работы. Рассматривалось три конкурирующих участков в разных местах полуострова. Был выбран участок в 257 га на его северо-западе, на денудационной равнине, сложенной архейскими интрузивными и метаморфическими образованиями и перекрытыми палеозойскими осадочными породами с развитием островной криолитозоны [8].

Кольский п-ов резко отличается по климату, геологическому строению и геокриологическим условиям от Северо-Востока РФ. В последнем на побережье арктических морей развиты низменности на субаэральных окраинах субмаринных осадочных бассейнов. Поэтому в многолетнемерзлом состоянии находятся слаболитифицированные осадочные образования, насыщенные льдом. В таких условиях выявление участков, благоприятных для сооружения ВЭУ подобных Кольской, крайне сложная задача. Например, для малой ветро-дизельной установки вблизи г. Анадырь был выбран выположенный участок, сложенный кайнозойскими базальтами, на мысе Обсервации. Попытки соорудить аналогичную ВЭУ на окраине пос. Беринговский, на междуречье, сложенном верхнемеловыми отложениями, катагенетически измененными на средних стадиях мезокатагенеза, завершились неудачей. Крайне незначительные колебания фундамента приводили к нарушению горизонтального положения оси вращения вала генератора и его выходу из строя. Следовательно, при геокриологических исследованиях на потенциальных площадках будущих ВЭУ нужно обращать внимание и на стадии катагенетических преобразований осадочных горных пород в основаниях технических конструкций. Важно учитывать и возможные изменения несущих свойств пород при потеплении климата в период срока эксплуатации. С учетом этих обстоятельств широко распространенные сведения об огромных энергетических ресурсах ветра на морских побережьях, по нашим расчетам, нужно уменьшить в 2-3 раза, но при этом ресурсы ветра практически велики и доступны для освоения.

Ресурсы солнечного излучения для внутриконтинентальных районов подсчитаны с использованием по данным единичных метеостанций. Малый разброс данных по удаленным пунктам указывает на близость климатических характеристик по всему региону. Существенно отметить, что географическое положение региона, его

удаленность от крупных промышленных центров определяют очень малое содержание пыли в атмосфере, а высокие широты определяют повышенные величины солнечного излучения за счет длинного солнечного дня в теплый период года. Поэтому годовая оценка этого величины излучения близка к оценкам в более южных районах. Положительный опыт работы солнечных электростанциях получен в республике Саха-Якутия. Этот опыт позволяет предполагать, что и крупные СЗС мощность в десятки и сотни тысяч МВт будут успешно работать.

Для сооружения ВЭС и солнечной электростанции (СЭС) большую значимость имеет рельеф места их размещения. На Северо-Востоке наиболее рационально эти электростанции располагать на плоских и выположенных водоразделах, занятых горной тундрой и лесотундрой. Обычно на таких элементах рельефа развиты элювиальные валунно-щебнистые образования, подстилаемые трещиноватыми коренными породами. Как правило, здесь породы представлены крупнообломочными элювиальными образованиями. Они малольдисты, мощность до 2 м, что удобно для устройства железобетонного фундамента башни ВЭУ. Удобство выположенных водоразделов для ВЭС определяется и их большей ветреностью, чем в речных долинах.

Выположенные водоразделы и верхние части их склонов удобны тем, что поблизости нет загрязнителей воздуха пыльцой растений, солнечная освещенность более длительная и интенсивная, чем в долинах или у подножья. По нашим предварительным оценкам, примерно треть площадей горных континентальных и прибрежно-морских районов благоприятны для сооружения СЭС и ВЭС.

Полностью не изучены геологические, геокриологические, гидрогеологические обстановки, благоприятные для аккумуляции и хранения (длительностью до 1 года) вырабатываемого водорода, его потери при транспортировке в условиях низких температур воздуха. Неизвестны экранирующие для водорода свойства льдистых толщ осадочных пород или глинистых слоев в подмерзлотной зоне. Есть данные об повышенной экранирующей способности базальтовых и долеритовых пластов. В таком случае при выборе места производства водорода следует обратить внимание на выположенные объекты рельефа, сложенные ультраосновными вулканитами. Их толщи пригодны для создания в них емкостей для аккумулирования и хранения производимого водорода. Если выяснится экранирующая значимость мерзлых пород, то станет технически реальным аккумулировать вырабатываемый водорода и под подошвой их толщ.

Негативные последствия сооружения ГЭС на северных реках хорошо известны, поэтому приведенные выше данные о площадях, занимаемых электростанциями, отражают высокую экологическую эффективность ВЭС и СЭС. Однако практически не изучены экологические последствия их работы в условиях Северо-Востока России. Например, побережья арктических морей служат местами обитания моржей, белых медведей, в летнее время здесь живут и размножаются многочисленные перелетные водоплавающие птицы и т. д. Эту проблему необходимо будет изучать в творческом контакте геокриологов и гидрогеологов с биологами и ихтиологами.

Таким образом, Северо-Восток России перспективен для создания крупных центров производства водорода как для внутреннего, так и международного рынков. Ресурсы ультрапресной воды с низким (менее 5 мг/дм^3) содержанием хлор-иона, наличие климатических ресурсов восполняемой энергии позволяют успешно решить задачи, намеченные «Концепцией водородной энергетики Россий Федерации». Используя энергию ветра, можно выработать $49{,}04 \cdot 10^9$ т водорода, а за счет энергии солнечного излучения – $8{,}29 \cdot 10^9$ т. Это значительно превышает прогнозное потребление водорода в мире через 30 лет.

Однако создание центров производства водорода потребует решения комплекса трудных геокриологических, гидрогеологических геоэкологических задач, для чего необходимы не только финансовые вложения, но и специализированная организация

проведения гидрогеологических и геокриологических работ. Однако эти вложения оправдаются созданием эффективного промышленного кластера «Водород Северо-Востока России».

Список литературы

1. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Утверждена Правительством Российской Федерации 5 августа 2021 г. №2162-р

2. Указ Президента РФ от 26 октября 2023 г. №812. «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации».

3. Григорьев С.А., Порембский В.И., Фатеев В.М., Самсонов Р.О., Козлов С.И. Получение водорода электролизом воды: современное состояние, проблемы и перспективы // Транспорт на альтернативном топливе. 2008. №3. С.62-69.

4. Боревский Б. В., Гараева Т.В., Зубанова Т.Н., Куренной В.В. Карта ресурсного потенциала пресных подземных вод. Масштаб 1:5 000 000 / гл. ред. Б.В. Боревский. М.: 31. ГИДЭК, 2013.

5. Шамин В.С., Шевелева Л.И. Перспективы Пенжинской приливной электростанции // Молодой ученый. 2021. №4 (346). С. 51-56.

6. Чекалдин Ю.Н. Влияние гидрологических условий Усть-Среднеканского водохранилища на запасы водных биоресурсов реки Колымы // Вопросы рыболовства. 2018. Т. 19. № 1. С. 71-81.

7. Соколовский Ю.А. Оценка и использование естественных ресурсов // Север Дальнего Востока / ред. Н.А. Шило. М.: Наука, 1970. С.378-396.

8. Романенко Ф.А., Гаранина Е.В. Формирование и строение многолетнемерзлых пород у южной границы криолитозоны на Кольском полуострове // Криосфера Земли. 2012. Тю XVI. № 3. С. 72-80.

ПОДМЕРЗЛОТНЫЕ ВОДЫ КАК ФАКТОР АКТИВНОЙ БИОКОРРОЗИИ КРЕПЕЙ НА РУДНИКЕ КУПОЛ (ЧУКОТСКИЙ АВТОНОМНЫЙ ОКРУГ)

Дашко Р.Э.[1], Романов И.С.[2]

[1]Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, regda2002@mail.com

[2]ООО «МБС Строительные системы», Санкт-Петербург, ivan.romanov.russia.spb@gmail.com

Аннотация: Рассмотрены условия формирования уникального золотосеребряного месторождения «Купол» в системе Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП). Показана сложность горно-геологических и мерзлотно-гидрогеологических условий рудника. Проанализированы подземные воды месторождения двух зон: многолетнемерзлой толщи и ниже подошвы мерзлоты. Подземные воды подмерзлотного водоносного горизонта по химическому составу сульфатно - хлоридныные натриево-кальциевые с минерализацией 2,5–2,7 г/дм^3. Отмечено, что микробиологические исследования подмерзлотных вод проводились в два этапа: первый – путем посевов на питательные среды, второй с помощью метагеномного анализа 16SрРНК. Было установлено, что большая часть выделенных микроорганизмов обладает высокой коррозионной способностью по отношению к крепям. Особо опасные группы сульфатредуцирующих бактерий.

Ключевые слова: *золотосеребряное месторождение, подземные воды, микроорганизмы, крепи, коррозия*

Abstract: The conditions of formation of the unique gold and silver deposit «Kupol» in the system of the Okhotsk-Chukchi volcanic belt (OCHVB) are considered. The complexity of the mining-geological and permafrost-hydrogeological conditions of the mine is shown. The groundwater of the deposit of two zones is analyzed: the permafrost and below the permafrost sole. The groundwater of the permafrost aquifer is chemically sulfate-chloride sodium-calcium with a mineralization of 2.5-2.7 g/dm^3. It is noted that microbiological studies of permafrost waters were carried out in two stages: the first by seeding on nutrient media, the second by

metagenomic analysis of 16SpRNA. It was found that most of the isolated microorganisms have a high corrosion ability with respect to cracks. Particularly dangerous groups are sulfate-reducing bacteria.
Key words: *gold and silver deposit, underground water, microbiological, support, corrosion*

Месторождение «Купол», расположенное в зоне Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, было открыто в 1995 г., а в 2007 г. началось его промышленное освоение.

В разрезе рассматриваемого района прослеживается комплекс осадочных, вулканогенно-осадочных, вулканогенных и эффузивных пород меловой системы, подразделенной на нижний и верхний отделы. Породы месторождения «Купол» отнесены к средней и верхней толще верхнего мела ($К_2^2$ - $К_2^3$). Среднее содержание золота в рудных телах месторождения составляет 10–25 г/т, серебра 80–270 г/т. Запасы и ресурсы месторождения, классифицированные в соответствии с международными стандартами, составляют 188 т Au и 2377 т Ag (данные компании Kinross Gold по состоянию на 01.10.2007 г.) [1, 2].

В силу специфики структурно-тектонической обстановки прослеживается высокая степень дезинтеграции пород, обусловленная наличием разрывных нарушений, складчатости, слоистости и трещиноватости различного генезиса. Месторождение приурочено к зоне многолетнемерзлых пород (ММП), мощность которых на рассматриваемом участке варьируется в пределах 250–300 м. Поскольку глубина отработки месторождения достигает и превышает 500 м, то горные выработки в настоящее время проходятся в зоне ниже подошвы ММП.

При ведении горных работ принципиальное значение имеет криогенный массив эффузивных и интрузивных пород ($К_2$), к которому приурочены криопэги, и локально-водоносная (подмерзлотная) зона трещиноватости вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород (ЛВЗТ, $К_2$).

По результатам специализированной съемки в горных выработках, на горизонте +440 м. от поверхности (глубина 68 м) было установлено наличие криопэгов, имеющих аномальную минерализацию 445,27 г/дм^3, по химическому составу они хлоридно-сульфатные, кальциево-магниевые с весьма низким значением pH 1,96.

В настоящее время на месторождении не осуществляется контроль подземных вод, прежде всего, подмерзлотных. На руднике специальные гидрогеологические исследования не проводятся, и отсутствует система мониторинга за их проявлениями.

В большинстве случаев интенсивное поступление воды в горную выработку связано с характером трещиноватости пород – степенью раскрытия трещин, их протяженностью, наличием заполнителя и др.

Теория и практика ведения горных работ показывает, что подземные воды могут оказывать существенное воздействие как на формирование и изменение напряженно-деформированного состояния массива, особенно при напорных режимах подземных вод, так и на их коррозионную способность по отношению к конструкционным материалам крепления.

На месторождении «Купол» в силу высокой степени дезинтеграции пород, о чем говорилось выше, применяются такие виды крепления, как трубчатые фрикционные анкера в паре с металлической сеткой, торкрет бетон и трос-анкера.

Химический состав подмерзлотных вод - сульфатно–хлоридные натриево-кальциевые, солоноватые с минерализацией 2,5–2,7 г/дм^3, при отборе проб отчетливо ощущается запах H_2S.

Повышенное содержание сульфатов объясняется окислением сульфидов, которые присутствуют в рудном теле. Наличие в водах заметного компонента кальция и магния связано с выщелачиванием не только вмещающих горных пород, но и торкрет бетона, который широко используется в качестве вторичного крепления трещиноватых горных выработок.

Обращает на себя внимание также высокая жесткость воды, которая определяется присутствием щелочноземельных и щелочных ионов. Такая жесткость предполагает значение pH> 8. Однако полевые замеры этого показателя в водопроявлениях в горных выработках свидетельствуют о наличии нейтральной обстановки (pH 7,0). Обычно снижение щелочности в таких условиях наблюдается за счет содержания в воде органических кислот биогенного и абиогенного генезиса. Выполненные лабораторные исследования химического состава подмерзлотных вод по расширенному списку определяемых компонентов доказал присутствие органических соединений - величина перманганатной окисляемости достигает 45 мгO_2/дм^3, химическое потребление кислорода (ХПК) до 138 мгO_2/дм^3.

Подмерзлотные воды приурочены к области затрудненного водообмена, что в сочетании с повышенным содержанием органики предполагает наличие восстановительной (бескислородной) среды с величиной окислительно-восстановительного потенциала Eh<0.

Проявления криопэгов следует учитывать их высокую агрессивность по отношению к металлическим конструкциям при их аномально высокой минерализации. В зоне влияния криопэгов с высокой кислотностью наблюдалась интенсивная коррозия металлических конструкций – анкеров и сетки, что вызвало обрушение выработки на протяжении 40–50 м. Разрушенные анкера представляли «частокол» из обломков охристого цвета.

Восстановительная среда в подмерзлотных водах предполагает развитие определенных видов коррозии металлов - электрохимических процессов $Fe^0 \rightarrow Fe^{2+}$, которые приводят к утончению металлических конструкций (трубчатых фрикционных анкеров и металлической сетки) в зонах разгрузки подземных вод. Анализ химического состава подземных вод подмерзлотного горизонта свидетельствует о их коррозионной способности по отношению к бетонам и цементным растворам по содержанию сульфат-иона и соответственно о возможности развития наиболее опасной химической коррозии – сульфатной с образованием гидросульфоалюмината кальция $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ (эттрингита). Генерация этого цементоподобного минерала в форме кристаллогидрата сопровождается значительным увеличением объема, что приводит к образованию кристаллизационного давления в толще бетона и его дезинтеграции.

Как известно, гарантии надежности крепи, их сохранности во времени, рассматриваются как основа безопасности ведения горных работ в подземных выработках. До настоящего времени в практике проектирования горных выработок, их эксплуатации и ведения специализированного мониторинга по возможности развития биокоррозии различных конструкционных материалов полностью игнорируются. До недавнего времени существовало весьма субъективное мнение о том, что по мере увеличения глубины разработки активность микроорганизмов снижается, а в условиях развития многолетнемерзлых пород их деятельность вообще не рассматривается.

В настоящее время накоплен обширный материал по изучению таксонов микроорганизмов и особенностей их жизнедеятельности в подземном пространстве различных климатических зон. Повсеместное использование различных микробиологических методов позволяет исследовать широкий спектр микроорганизмов, обитающих в подземных водах и водовмещающих породах, а также на коррозионных образованиях материалов, в том числе крепей [3-6].

Начиная с конца 2018 г. микробиологические исследования выполнялись на золотосеребряном руднике «Купол» ниже подошвы мерзлоты на глубине свыше 500 м, где фиксируется повсеместное проявление подмерзлотных вод. Во время проведения специализированных съемок в горных выработках было отмечено активное коррозионное поражение металлических крепей. Кроме того, удалось зафиксировать во времени проявление коррозии на новой металлической крепи, которая находилась под воздействием капежа подземных вод (рис. 1, 2).



Рис. 1. Развитие коррозии на новых (неустановленных) анкерах под влиянием капежа подземных вод (фото автора от 15.05.2020)



Рис. 2. Развитие коррозии на новых опорных шайбах под влиянием капежа подземных вод (фото автора от 15.05.2020)

На первом этапе исследований таксонов микроорганизмов проводились с помощью посевов на питательные среды, а на втором этапе выполнены метагеномные исследования подмерзлотных вод (анализ проводился по нуклеотидным последовательностям гена 16S рРНК), которые дали возможность исследовать достаточно богатый биоценоз в водоносном горизонте. Метагеномные исследования выполнялись на современном диагностическом оборудовании ООО «Бигль» (Санкт-Петербург). Использовались праймеры из протокола metagenomic-library-prep-guide.

Выявлены представители 10 бактериальных фил. Следует отметить, что 86% выявленных микроорганизмов приходится на протеобактерии. В эту группу входят микроорганизмы с различными типами метаболизма (автотрофы и гетеротрофы), а также аэробные и анаэробные бактерии, среди которых заметную роль играют психрофилы[2]. На уровне рода идентифицированы бактерии 43 родов. Неидентифицируемые на уровне рода последовательности составили 29%. Наиболее широко в подмерзлотной воде представлены бактерии родов Rhodoferax, Hydrogenophaga, Acidovorax, известные своей коррозионной активностью и способностью развиваться при пониженных температурах. В зонах разгрузки подмерзлотных вод, как уже отмечалось ранее, отчетливо присутствует характерный запах сероводорода, что свидетельствует об активности сульфатредуцирующих бактерий (СРБ). Культуральными методами было показано, что численность СРБ достигает достаточно высоких значений (10^5 КОЕ на 1 мл воды). При проведении метагеномного анализа в пробе воды выявлены представители Desulfurivibrionaceae, Desulfosporosinus, Desulfurivibrio. Высокое содержание СРБ отмечалось в подмерзлотной воде рудника «Люпин» (Канада), где преобладали представители рода Desulfosporosinus [7], выявленного и на руднике «Купол». Очевидно, что накопление этих строго анаэробных бактерий в подмерзлотной воде указывает на их активность в восстановительной среде и высокую толерантность к низким температурам.

Был проанализирован комплекс факторов, благоприятствующих активности микроорганизмов в подмерзлотных водах месторождения «Купол» (табл. 1).

[2] группы микроорганизмов активно развивающиеся при низких температурах

Таблица 1 Факторы влияющие на условия жизнедеятельности подземных микроорганизмов на руднике «Купол»

Факторы, способствующие развитию микробиоты	Параметры	Оптимальные значения для развития микроорганизмов различных групп	Численные значения показателей в пределах рудника «Купол»	Тип микроорганизмов, характерный для заданных условий
Физико-химические	Температура	+4 °C – 20°C	<+10 °C	Психрофилы (железобактерии) и толерантные к низким температурам мезофильные микроорганизмы Аэробная, факультативная и анаэробная микробиота Развитие широкого спектра анаэробных и аэробных форм Сульфатредуцирующие, железо восстанавливающие и аммонифицирующие формы анаэробных микроорганизмов
	Минерализация воды	1000—10 000 мг / дм^3	2500—2700 мг / дм^3	
	pH	6,0—8,9	7,0—7,2	
	Eh	<50 mV	<50 mV	
Наличие источников питания и энергии	Макрокомпоненты	C; H; O; S; Na; K; Ca; Mg	Присутствуют основные макрокомпоненты	Развитие гетеротрофных форм микроорганизмов
	Микрокомпоненты	Fe; Ni; Co; Cu; Mn; Zn; Se	Присутствуют основные микрокомпоненты	
	Наличие органики	Не лимитируется для гетеротрофных и органотрофных форм	ХПК мг O_2 / дм^3 достигает 138	
Действие слабых доз радиации	Эксгаляция радона	В широких пределах	^{222}Rn 445,80 Бк / дм^3	Активная деятельность различных физиологических групп микроорганизмов

Существование довольно сложного по составу и структуре микробного сообщества, которое вызывает биоразрушение анкерных крепей, диктует необходимость проведения специализированного мониторинга, направленного на определение скорости разрушения конструкционных материалов и разработку мероприятий по обоснованию выбора устойчивых материалов для предотвращения развития опасных гравитационных процессов как следствия преждевременного разрушения крепи.

Список литературы

1. Волков А. В., Гончаров В. И., Сидоров А. А. Месторождения золота и серебра Чукотки. М.: ИГЕМ РАН; Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2006. 221 с.

2. Глухов А. Н. Региональная геологическая позиция, структура и минералого-геохимическая позиция месторождения Купол // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2008. № 3. С. 34–45.

3. Дашко Р. Э. Микробная деятельность в подземных выработках и ее влияние на свойства богатых железных руд и конструкционных материалов / Р.Э. Дашко, А.В. Волкова, Д.Ю. Власов // Записки Горного института. 2006. Т. 168. С. 165–174.

4. Дашко Р. Э. Некоторые случаи биокоррозии крепей в подземных выработках различных климатических зон / Р.Э. Дашко, Д. Ю. Власов, И. С. Романов // Технология металлов. 2023. №4. С. 23–29.

5. Каблов Е. Н. Прогнозирование регионов биоповреждений строительных материалов // Приволжский научный журнал. 2019. № 4. С. 158—166.

6. Колотова О. В., Могилевская И. В. Процессы микробного биоповреждения в подземных горных выработках // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2020. Т. 2. С. 44—66.

7. Onstott T. C., McGown D.J., Bakermans C. et al. Microbial Communities in Subpermafrost Saline Fracture Water at the Lupin Au Mine, Nunavut, Canada // Microb Ecol. 2009. P. 786—807. doi: 10.1007/s00248-009-9553-5.

БАЛАНСОВАЯ СТРУКТУРА ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ТАЛИКАХ РЕЧНЫХ ДОЛИН КРИОЛИТОЗОНЫ

Ершов Г.Е., Олиферова О.А.
АО «ГИДЭК», Москва, info@hydec.ru

Аннотация. Результаты переоценки запасов подземных вод Амбарнинского и Ергалахского месторождений подземных вод в Норильском промышленном районе показали, что условия формирования запасов подземных вод в таликах речных долин криолитозоны определяются ежегодным восполнением сработанных в бессточный период емкостных запасов. Основными источниками формирования запасов подземных вод для этого типа месторождений являются естественные ресурсы (с учетом многолетней изменчивости питания подземных вод) и емкостные запасы (в бессточный период), а также привлекаемые ресурсы поверхностного стока в весенне-летний период.

Ключевые слова. *Водозабор, талик, криолитозона, запасы подземных вод, прогнозное моделирование*

Annotation. The results of the reassessment of groundwater reserves of the Ambarninskoye and Yergalakhskoye groundwater deposits in the Norilsk Industrial District showed that the formation conditions of groundwater storage in the taliks of the river valleys of the permafrost are determined by the annual replenishment of storativity component of the reserves, that were overdrafted during the low flow period. The main sources of groundwater reserves for this type of deposits are natural resources (taking into account long-term variability of groundwater recharge) and storativity component of the reserves (in the low flow period), as well as attracted runoff resources in the spring-summer period.

Key words. *Well field, talik, permafrost, groundwater reserves, predictive modelling*

В области развития многолетнемерзлых пород (ММП) в верхней части геологического разреза развиты таликовые зоны, связанные с отепляющим воздействием поверхностных водных объектов [3]. Таликовые зоны в речных долинах криолитозоны содержат пресные подземные воды, обеспечивающие надежное и устойчивое водоснабжение существующих и планируемых к строительству населенных пунктов, объектов добычи полезных ископаемых, их инфраструктуры [2].

Согласно Классификации основных типов месторождений питьевых подземных вод, разработанной Б.В. Боревским и Л.С. Язвиным [1], в области развития ММП одним из основных типов являются месторождения в таликовых зонах аллювиальных отложений речных долин, которые можно разделить на две группы:

- Талики первой группы под крупными, полностью не замерзающими реками, где условия аналогичны месторождениям в речных долинах, а основные особенности формирования запасов подземных вод связаны с изменением условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод при сезонном промерзании грунтов

- Талики второй группы под полностью промерзающими зимой реками, приуроченные к древним переуглублённым долинам, врезанным в ММП и сложенные хорошо проницаемыми валунно-галечными отложениями. Питание подземных вод происходит за счёт инфильтрации атмосферных осадков в весенне-летний период, разгрузка - родниковым стоком с образованием наледей в зимний период.

В статье рассмотрены условия формирования запасов подземных вод в таликах второй группы на примере двух месторождений Амбарнинского и Ергалахского, расположенных в Норильском промышленном районе (НПР). Минерально-сырьевой комплекс Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский Никель» представлен предприятиями, добывающими и перерабатывающими медно-никелевые руды и расположен на полуострове Таймыр, в северной части Красноярского края. Месторождения подземных вод разведаны для водоснабжения г.Норильска (Амбарнинский и Ергалахский водозаборы принадлежат АО «Норильско-Таймырская энергетическая компания»).

Анализ опыта эксплуатации Ергалахского и Амбарнинского водозаборов показал, что в периоды относительно стабильной работы скважин выделяются ежегодные периоды, в течение которых с наступлением положительных температур воздуха и появлением поверхностного стока уровень подземных вод характеризуется подъёмом. При наступлении холодов, питание подземных вод заканчивается, эксплуатируемый пласт становится изолированным, происходит только сработка емкостных запасов пласта и значительное понижение уровня подземных вод.

Гидрогеологические условия этих двух месторождений практически одинаковые, но условия формирования запасов подземных вод отличаются, поскольку соотношение прогнозного водоотбора и величины питания, определяющее характер восполнения сработанной в меженный период ёмкости, значительно отличаются.

На Амбарнинском месторождении водоотбор (величина запасов подземных вод) составляет 14.9 тыс. $м^3$/сут. Подземное питание реки Амбарной 95% обеспеченности оценивается в 177 л/с или 15,2 тыс. $м^3$/сут, что полностью обеспечивает величину запасов подземных вод Амбарнинского месторождения.

На Ергалахском месторожденим запасы подземных вод составляют 109,7 тыс. $м^3$/сут, годовая величина поверхностного стока 50% обеспеченности р. Ергалах - 1,46 $м^3$/с (126,1 тыс. $м^3$/сут), этой величины питания достаточно для восполнения запасов месторождения. Однако, в процессе цикла маловодного года годовая величина поверхностного стока 95% обеспеченности - 0,96 $м^3$/с (79,8 тыс. $м^3$/сут) не достаточна для восполнение сработанной ёмкости в полноводный период маловодного года.

Рассмотрим две схемы формирования запасов подземных вод в условиях ежегодного восполнения сработанных в бессточный период емкостных запасов и работы водозабора в талике в маловодный год, полученные по результатам работ по переоценке запасов подземных вод Амбарнинского и Ергалахского месторождений, выполненных АО «ГИДЭК» в 2022-23 гг.

Амбарнинское месторождение подземных вод приурочено к сквозному талику древней эрозионной долины р. Амбарной, заполненной четвертичными образованиями (рис. 1). Основным продуктивным горизонтом является водоносный горизонт водно-ледниковых и морских отложений нижне-среднеплейстоценового возраста мощностью около 40 м, сложенный валунно-гравийными отложениями и крупнозернистыми песками с суглинистым или супесчаным заполнителем.

Месторождение расположено на территории, в пределах которой нижне-среднеплейстоценовый водоносный горизонт содержат пресные подземные воды

и с 1979 года эксплуатируется групповым Амбарнинским водозабором для хозяйственно-питьевого водоснабжения городов НПР. Водозабор работает на утвержденных в 1978г. запасах подземных вод, величина которых составляет 14,9 тыс. м^3/сут.

В настоящее время водозабор представляет собой линейный ряд водозаборных скважин длиной 3,0 км и состоит из 8 скважин глубиной до 140 м, расположенных вдоль р. Амбарная. Производительность водозабора в течение 43 лет изменялась от 4730 м^3/сут до 7460 м^3/сут (32-50% величины запасов).

По условиям питания подземных вод долина реки Амбарной относится к мерзлотному типу с кратковременным летним питанием. Питание осуществляется через сквозной талик вдоль русла реки. В летний период инфильтрационное питание происходит за пределами водозабора и носит относительно постоянный характер. Основной источник питания целевого водоносного горизонта - р. Амбарная по стоку во много раз превышает инфильтрацию. В течение года уровень подземных вод характеризуется подъёмом с наступлением положительных температур воздуха и появлением поверхностного стока. При наступлении холодов, питание подземных вод заканчивается и наблюдается спад их уровня. Анализ опыта эксплуатации водозабора показал, что в течение 43 лет эксплуатации при суммарном водоотборе, не превышающем 50% утвержденных запасов, происходит ежегодное полное восстановление уровней до статических летних уровней.

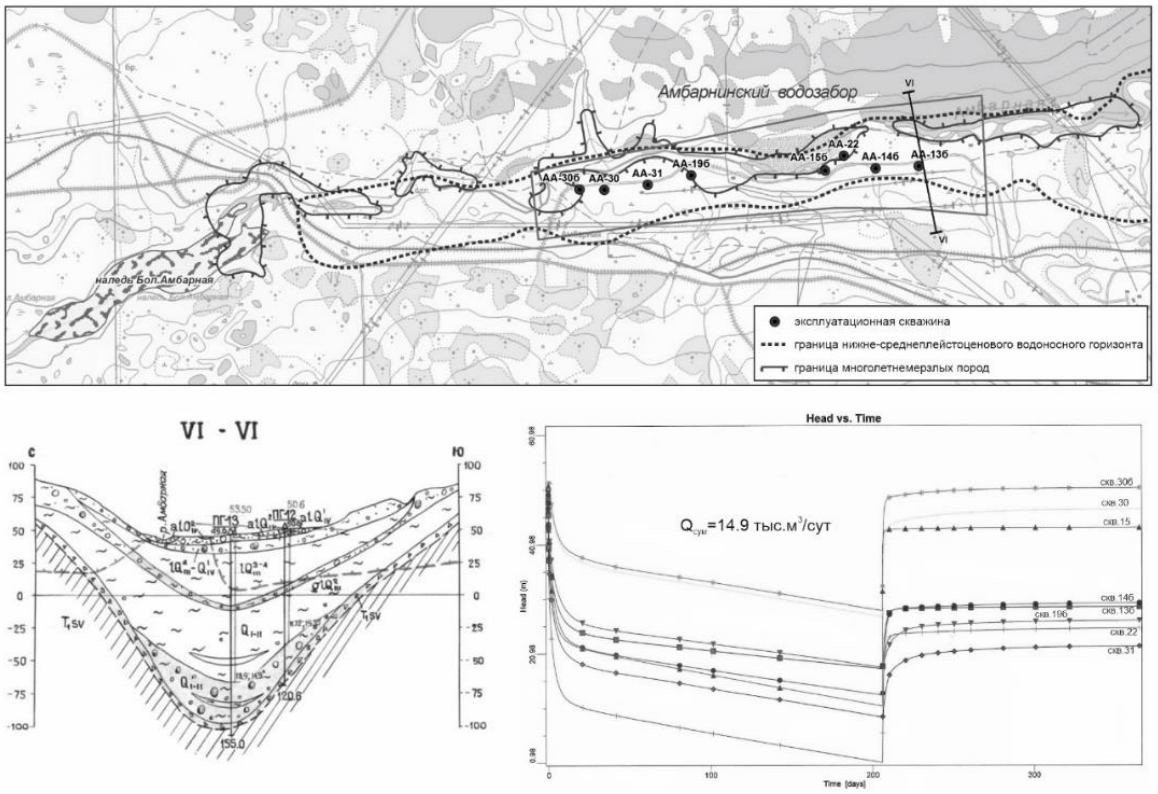


Рис. 1. Схема, разрез Амбарнинского месторождения и результаты прогнозных расчетов работы водозабора в течение гидрологического года.

Численное гидродинамическое моделирование работы Амбарнинского водозабора, выполненное в рамках работ по переоценке запасов месторождения проводилось для расчетного гидрологического года. В критический зимний период в течение первых 210 суток скважины работали в изолированном пласте с отключенными граничными условиями (реки и инфильтрационной питание). В первый месяц интенсивного таяния многолетнемерзлых пород подключалась вся речная сеть и

инфильтрационное питание, соответствующее максимальной за весь год величине, полученной при анализе изменения внутригодового модуля подземного стока. В течение остальной части летнего периода величина инфильтрационного питания задавалась для периода май-сентябрь. Полученные в результате моделирования расчетные уровни подземных вод нижне-среднеплейстоценового водоносного горизонта в эксплуатационных скважинах на конец критического периода располагались выше кровли целевого водоносного горизонта. В летний период происходит восстановление уровней подземных вод в эксплуатационных скважинах на 10-32 м.

Балансовая структура прогнозного водоотбора 14,9 тыс. $м^3$/сут на территории Амбарнинского месторождения, полученная в результате моделирования определяется следующими источниками формирования запасов подземных вод:

- в воднокритический зимний период водоотбор обеспечивается емкостными запасами 13.5 тыс. $м^3$/сут (90%), а также притоком к участку водозабора с восточной части талика – 0.6 тыс. $м^3$/сут (4%), и с западной части - 0,9 тыс. $м^3$/сут (6%).

- при эксплуатации месторождения в летний период водоотбор обеспечивается в основном за счет поверхностных вод р.Амбарной – 13,5 тыс. $м^3$/сут (91%) и за счет инфильтрации атмосферных осадков – 1,2 тыс. $м^3$/сут (8%).

Ергалахское месторождение подземных вод расположено в осевой части долины реки Ергалах и приурочено к сквозному талику древней переуглубленной долины р. Ергалах, заполненной четвертичными образованиями (рис. 2). Целевым является среднеплейстоценовый водоносный горизонт, представленный валунно-галечными отложениями. Ергалахский водозабор представляет собой линейный ряд из 14 скважин длиной 5,7 км. Промышленная эксплуатация месторождения начата в 1976 году, в течение 47 лет водоотбор изменялся от 22,4 тыс. $м^3$/сут (20% от утвержденных запасов) до 65,9 тыс. $м^3$/сут (60% от утвержденных запасов), понижение уровней в работающих скважинах за весь период эксплуатации не превысило допустимое понижение.

Анализ опыта эксплуатации водозабора в течение всего периода его работы с суммарным дебитом не превышающим 60% утвержденных запасов показал, что в течение критического периода происходит снижение уровней в эксплуатационных скважина, достигая в скважинах южной части Ергалахского водозабора понижений 7-13 м, в центральной и северной частях водозабора 10-33 м (при этом зимние уровни не достигают кровли водоносного горизонта). В этот период эксплуатируемый пласт является изолированным и происходит только сработка емкостных запасов пласта. В конце апреля – начале мая, при появлении в реке Ергалах поверхностного стока и оттаивании первого от поверхности слоя четвертичных отложений, происходит резкое восстановление уровня подземных вод до отметок близких к поверхности земли. Таким образом, каждый год в течение 6-7 месяцев происходит значительная сработка емкости пласта, а затем происходит восстановление уровней.

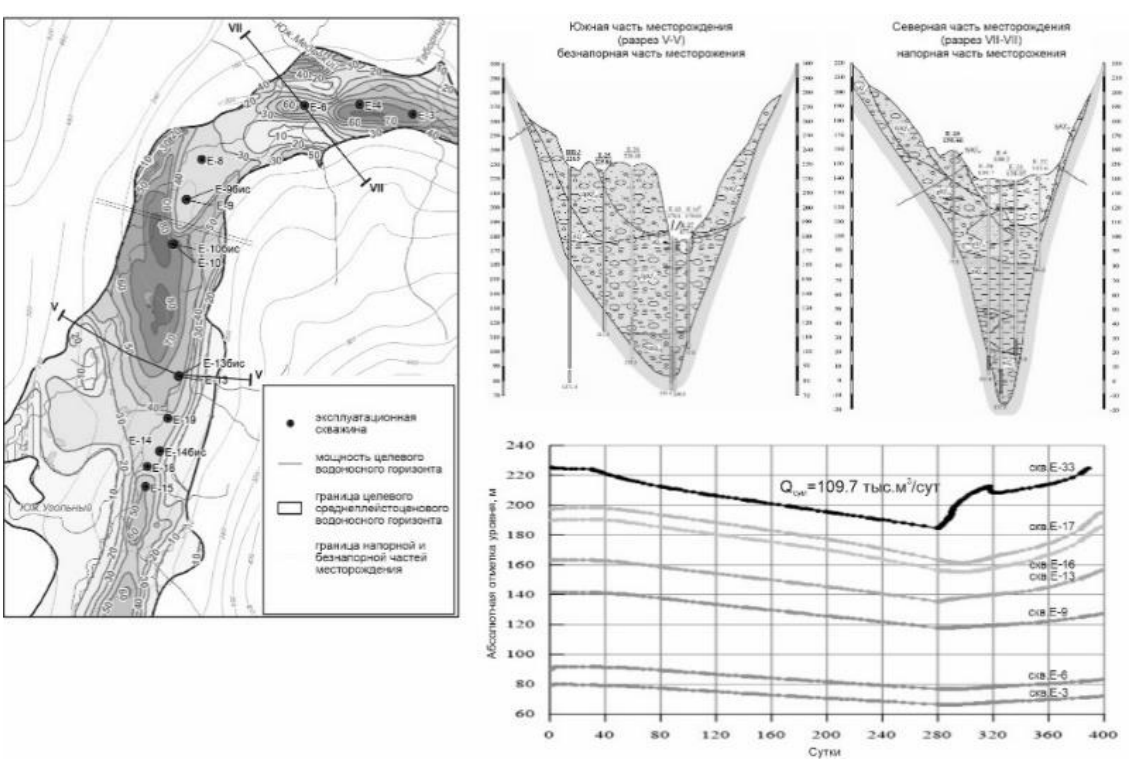


Рис. 2. Схема, разрез Ергалахского месторождения и результаты прогнозных расчетов работы водозабора в течение гидрологического года

Для выполнения переоценки запасов подземных вод Ергалахского месторождения методом численного математического моделирования была специально разработана геофильтрационная модель месторождения, откалиброванная в процессе решения двух обратные нестационарных задач, в которых воспроизводилась работа водозабора в годы разной водности:

год средней водности (дебит водозабора 47,6–52,7 тыс. м^3/сут),

наиболее выраженный маловодный год – 2013 г. с обеспеченностью среднегодового стока порядка 95% (дебит водозабора 33,0–67,6 тыс. м^3/сут). Несмотря на то, что суммарный водоотбор при этом не был самым большим, удельные понижения уровней подземных вод в скважинах на 1 м^3/сут суммарного отбора в этот период являются самыми большими за период эксплуатации водозабора. Рассчитанный при этом режим питания в подобный маловодный год использовался при моделировании прогнозного водоотбора.

Решение обратной задачи на период паводка после длительной межени маловодного года показало, что пропускная способность русла достаточно для инфильтрации необходимых объёмов поверхностных вод при восполнения сработанной за межень ёмкости.

Прогнозные расчёты были выполнены для условий маловодного года – при продолжительной межени длительностью 250 суток. При годовой величине поверхностного стока 50% обеспеченности р. Ергалах в 1,46 м^3/сут (126,1 тыс. м^3/сут) этой величины питания достаточно для полного восполнения сработанной в меженный период ёмкости. Однако, в процессе цикла маловодного года с 95% обеспеченностью (2013-2014 гг.) - 0,96 м^3/с (79.8 тыс. м^3/сут), восполнение сработанной ёмкости в полноводный период маловодного года может происходить не полностью. В эти периоды не происходит полное восстановление уровней, а величина водоотбора регулируется остаточной ёмкостью водовмещающих пород. Недовосполнение отобранного количества воды при этом должно компенсироваться поверхностным стоком в последующие годы.

Выполненные прогнозные оценки определили подход к категоризации оцененных запасов подземных вод Ергалахского месторождения. Запасы категории В обеспечены расходом р. Ергалах в маловодные годы 95% обеспеченности, а суммарные запасы В+С1 – расходом р. Ергалах 50% обеспеченности и регулирующей ёмкостью водовмещающих пород. По результатам работ, выполненных АО «ГИДЭК» в 2022-23 гг., запасы подземных вод среднеплейстоценового водоносного горизонта Ергалахского месторождения переоценены в количестве 109,7 тыс. м^3/сут по категориям В+ С1 (в том числе по категории В - 79,8 тыс. м^3/сут, по категории С1 – 29.9 тыс. м^3/сут).

Условия формирования запасов подземных вод определяются тем, что поглощение поверхностного стока обеспечивает восполнение сработанных в бессточный период емкостных запасов и основными источниками формирования запасов, таким образом, являются естественные ресурсы и емкостные запасы (в бессточный период), а также привлекаемые ресурсы поверхностного стока в весенне-летний период. В зависимости от гидрометеорологических факторов и величины прогнозного водоотбора на месторождениях подземных вод в таликах речных долин криолитозоны формируется самостоятельная балансовая структура запасов подземных, зависящая от величины и многолетней изменчивости питания подземных вод.

Список литературы

1. Боревский Б.В., Язвин Л.С., Дробноход Н.И. Оценка запасов подземных вод. Киев. Высшая школа 1982г.-301 с.

2. Палкин С.С., Боревский Б.В., Козак С.З., Ясеник В.М. Основные результаты выявления и изучения таликовых зон в заполярных широтах полуострова Ямал для питьевого водоснабжения. Подземная гидросфера. Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России. Иркутск: Изд. ООО «Географ», 2012 г.

3. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. Под редакцией проф. Всеволожского В.А. М., Изд-во МГУ, 1983г., 231 с.

МОНИТОРИНГ КРИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ НА НАМЫВНОЙ ТЕРРИТОРИИ Г. ЯКУТСКА

Огонеров В.В.[1], Баишев Н.Е.[1], Полубелова А.В.[2]

[1]Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, vasvas392@yandex.ru

[2] Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, am.xed@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты режимных наблюдений за уровнем надмерзлотных грунтовых вод и температурой грунтов на территории 203 микрорайона г. Якутска, построенного на намывных песках. Установлено, что на рассматриваемой площади сохраняется несливающийся тип мерзлоты. Этому способствуют ряд факторов: 1) низкая влажность намытых песков, препятствующая промерзанию таликов сверху; 2) фильтрация в основании намывной толщи подземных вод и их гидравлическая связь с р. Леной; 3) тепловыделение инженерных сооружений. Обосновывается необходимость дальнейших мониторинговых наблюдений за температурой грунтов и надмерзлотными грунтовыми водами для исключения негативных последствий, связанных с протаиванием грунтов оснований естественного сложения и подтопления цокольных помещений.

Ключевые слова: *намывные грунты, талики, температура грунтов, режим подземных вод.*

Abstract. The paper presents the results obtained from regime observations of suprapermafrost groundwater level and soil temperature in the territory of the 203rd district in Yakutsk, which is built on hydraulic fill. It was established that the observed area retains non-merging permafrost. This is facilitated by a number of factors: 1) the low water content of the hydraulic fill sand prevents the freezing of taliks from above; 2) filtration of groundwater at the base of the fill and its hydraulic connection with the Lena River; 3) heat generation by engineering structures. It necessitates further monitoring of soil temperatures and suprapermafrost waters in order to mitigate negative effects related to thawing of underlying natural soils and basement flooding.

***Key words**: hydraulic fill soil, taliks, soil temperature, groundwater regime.*

Якутск – самый крупный из городов в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Он расположен на левом берегу в среднем течении р. Лена. В конце 1970-х было решено расширить территорию города за счет освоения пойменной части р. Лены. В летние периоды 1977–1985 гг. проводили гидронамыв 202 квартала города. В конце 1980 – начале 1990-х годов был создан намывной массив под строительство 203 квартала. К настоящему времени в пойменной части р. Лена построены и эксплуатируются два жилых микрорайона – 202 и 203 кварталы города. Микрорайон 202 был запроектирован и построен по I принципу использования грунтов в качестве основания в 1980 начале 1990-х [1]. Этот принцип подразумевает, что намытые и подстилающие грунты должны находиться в многолетнемерзлом состоянии в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружений. Согласно математическим расчетам, промерзание намывных песков ожидалось через 12–50 лет после застройки территории [2, 3]. Однако, как показали геотермические измерения в 2005–2010 гг. под многими зданиями на территории 202 квартала сохраняется несливающийся тип мерзлоты. Это стало одним из оснований рекомендовать при застройке 203 квартал использование II принципа строительства, т.е. использование грунтов оснований в талом или оттаивающем состоянии [4]. Перед массовой застройкой 203 квартала, в 2013–2016 г. на его территории были проведены инженерно-геологические изыскания, в которых было наличие таликов разной мощности и обводненности грунтов с глубины 8–10 м. С 2016 г. Институт мерзлотоведения СО РАН начал проводить режимные наблюдения за температурой грунтов и подземными водами в специально оборудованных скважинах. В данной статье приведен анализ полученных данных.

Пойма р. Лены представляет собой выровненную поверхность с абсолютными отметками 85 – 89 м. До намывных работ в районе 203 квартала г. Якутска имелось два старичных озера шириной 100–120 м. Мощность надмерзлотных водоносных таликов под ними составляла 7–10 м. При устройстве намывного основания старичные озера были погребены под 10–15-метровым слоем техногенного грунта.

На межозерных увалах в пределах территории намыва грунты естественного сложения до глубины сезонного оттаивания представлены пылеватыми песками, суглинками с заторфованными и илистыми включениями, ниже залегали вечномерзлые пески. Температура грунтов на глубине нулевых годовых амплитуд (10 м) равнялась минус 0,3–0,8^{O}C [2].

На межозерных увалах за счет высокой температуры пульпы произошло углубление кровли ММП и под 6–8-метровой толщей техногенного грунта сформировались искусственные водонасыщенные талики мощностью до 3–5 м [3].

В 2014-2016 гг. надмерзлотные реликтовые талики на намытой территории 203 квартала обнаружены на всех точках бурения скважин. Мощность сезоннопромерзающего слоя пород над ними 3,8–5,0 м. Грунты обводнены с глубины 8–10 м. На участках погребенных увалов многолетнемерзлые отложения вскрыты на глубине 13,5–14,8 м [5, 6]. В местах засыпанных старичных озер мощность водоносного горизонта достигала 8–10 и более метров. Уровни подземных вод, вскрытых скважинами, имели близкие отметки на разных участках территории 203 квартала, что свидетельствовало о наличии здесь единого водоносного горизонта.

В процессе дальнейших мониторинговых наблюдений 2019-2023 гг. установлена синхронность изменения уровня надмерзлотных грунтовых вод с р. Леной. В мае с началом половодья происходит быстрый подъем уровня воды реки. В течение 7–17 суток абсолютные отметки поверхности речных и надмерзлотных грунтовых вод в скважинах выравниваются. Затем в условиях подпора начинается интенсивное питание подземного водоносного горизонта поверхностными водами р. Лены и повышение зеркала надмерзлотных грунтовых вод на 1,5–3,5 м относительно меженного уровня (рис. 1). В конце июня–начале июля до следующего половодья на фоне общего спада уровня речных вод происходит медленное осушение грунтов намывного массива. Наиболее выраженно на изменение уровня воды в реке реагирует скважина 12, расположенная в 20 м от контура намывного массива. В скважинах 4, 9 и 10 отметки уровня воды практически одинаковы, несмотря на разную их удаленность от р. Лены. Вероятно, это связано с тем, что скважины вскрывают единый водоносный горизонт.

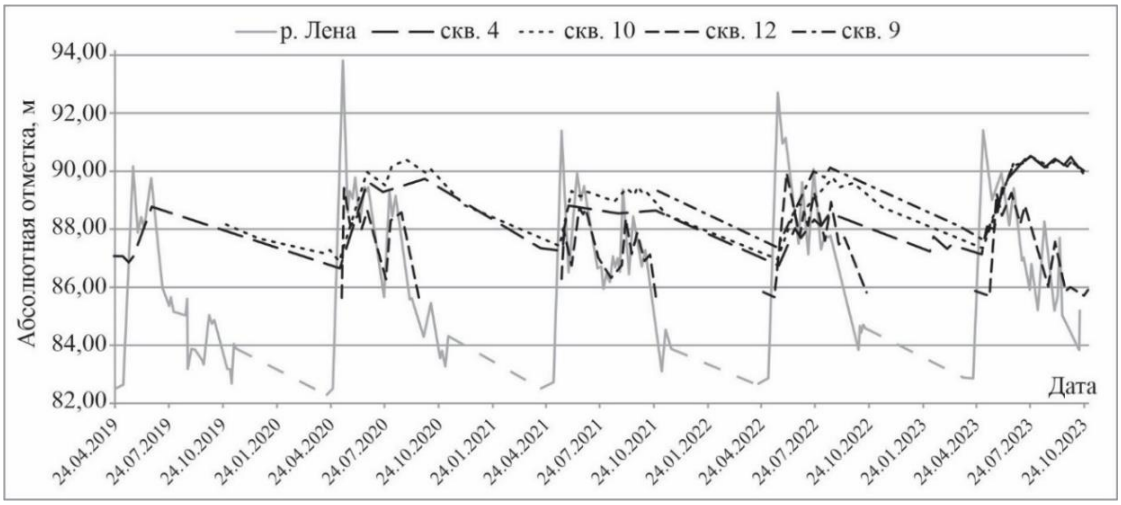


Рис. 1. Изменение уровня воды в скважинах и р. Лене

По данным геотермического мониторинга 2016-2023 гг., слой сезонного промерзания в намывных песках формируется в октябре. Его максимальная мощность отмечается в апреле и достигает 4,5–5,0 м. Надмерзлотные субаэральные талики прослеживаются глубже 10 м. Таким образом, намытый массив после 30-летнего существования находится в талом состоянии. Температура аллювиальных отложений, подстилающих намывные грунты, вне влияния зданий и инженерных сооружений, течение года на глубине 10 м колеблется в пределах от 0,0 ºС до +0,3 ºС (рис. 2). В скважинах, распложенных вблизи зданий, под которыми в подвальных помещениях размещены социальные объекты (магазины, гаражи, парикмахерские и т.д.), температура грунтов до глубины 6-10 м достигает 4-5 ºС.

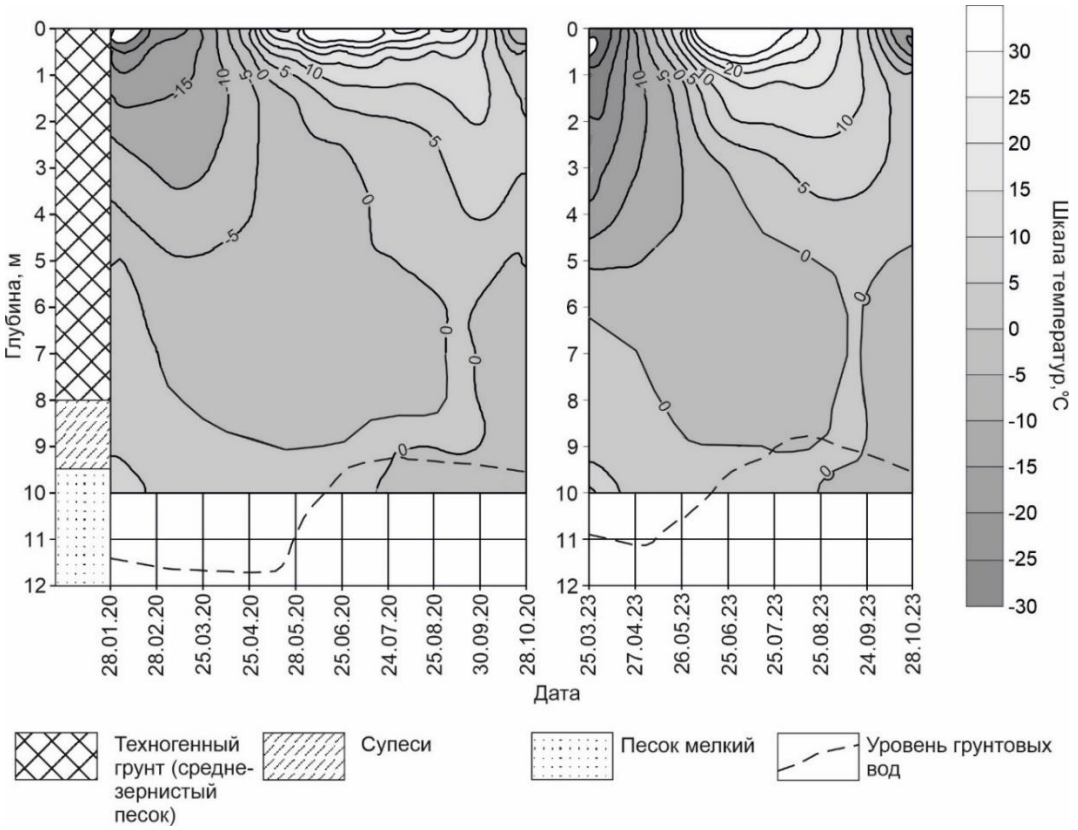


Рис. 2. Изменение температуры грунтов по скважине 5Т (на участке погребенного увала) в 2020 г. и 2023 гг.

Таким образом, на пойменно-намывной территории водоносные талики, сформировавшиеся в период проведения гидромеханизированных работ, при существующих природно-техногенных условиях сохраняются более чем 30 лет. Сохранению таликов до начала строительства способствовали два естественных фактора: теплофизические свойства намытых сухих в верхней части песков, препятствующие зимнему промерзанию, и непрерывная фильтрация воды в подошве намывного массива. После строительства появился техногенный фактор – тепловыделение от инженерных сооружений. Необходимо продолжить мониторинговые наблюдения как за температурой грунтов, так и за уровнями надмерзлотных грунтовых вод, для предупреждения негативных последствий, связанных с протаиванием грунтов оснований естественного сложения и в целях контроля подтопления цокольных помещений.

Список литературы

1. Чжан Р.В., Павлова Н.А., Огонеров В.В., Лобанов А.Л., Данзанова М.В. Инженерное освоение низких пойм рек криолитозоны под гражданское строительство: опыт, проблемы, перспективы // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. Изд-во СО РАН, Новосибирск, 2020. С. 87-95.

2. Роман Л.Т., Полещук В.Л., Цеева А.Н. и др. Обеспечение надежности строительства на намывных грунтах в криолитозоне // Криосфера Земли. №4. Научно-издательский центр ОИГГМ СО РАН, Новосибирск, 1998. С. 72-81.

3. Роман Л.Т. Строительство на намывных грунтах в криолитозоне / Л.Т. Роман, А.А. Цернант, В.Л. Полещук, А.Н. Цеева, Н.И. Леванов. – М.: Издательский дом: Экономика, Строительство, Транспорт, 2008. 323 с.

4. Шестернев Д.М., Чжан Р.В., Кузьмин Г.П. Строительство на намывных грунтах в криолитозоне Якутии. Международная конференция «Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы», Тюмень. Изд-во «Эпоха». – 2015. – С.432-435.

5. Огонеров В.В. Результаты мерзлотно-гидрогеологического мониторинга грунтов оснований на намывной территории г. Якутска.: Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии. Материалы VII Всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием, посвященного 150-летию и 100-летию со дня рождения ученых-мерзлотоведов

Михаила Ивановича Сумгина и Кирилла Фабиановича Войтковского. Якутск, 2023. С. 78-81.
6. Pavlova, N.; Ogonerov, V.; Danzanova, M.; Popov, V. Hydrogeology of Reclaimed Floodplain in a Permafrost Area, Yakutsk, Russia. *Geosciences* 2020, *10*(5), 192; https://doi.org/10.3390/geosciences10050192

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ОДНОЙ ИЗ ПЛОЩАДЕЙ МИРНИНСКОГО УЛУСА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Оцимик А.А.[1], Буддо И.В.[1,2,3], Токарева О.В.[1], Агафонов Ю.А.[1]
1 – ООО «СИГМА-ГЕО», Иркутск, oaa@sigma-geo.ru
2 – Институт земной коры СО РАН, Иркутск
3 – ФГБУВО Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск

Аннотация. На территории Республики Саха (Якутия) широкое распространение имеет толща многолетнемерзлых пород (ММП). Мерзлота имеет различные условия распространения, мощность и динамику, что обуславливает специфичность формирования и режима подземных вод и различную глубину их залегания. ММП осложняют поиск, оценку запасов и эксплуатацию месторождений подземных вод. В статье описана методика исследований, освещены предпосылки определения в геоэлектрическом разрезе ММП, а также особенности их морфологии на примере одной из площадей Мирнинского улуса Республики Саха (Якутия). Составлена карта глубины залегания подошвы ММП, отмечено увеличение мощности и глубины залегания подошвы ММП в северо-восточном направлении. Отмечено неоднородное строение толщи ММП, связанное с распространением линз талых пород и криопэгов. Выявлены участки развития талых пород, перспективные на обнаружение источников пресных вод, определено направление дальнейших исследований. Результаты проведенных исследований имеют научно-практическое значение при прогнозе участков осложнений в ходе бурения скважин, связанных с проходкой ММП, а также при определении участков развития межмерзлотных и подмерзлотных водоносных коллекторов и минимизации рисков бурения гидрогеологических скважин с неудовлетворительным результатом.
Ключевые слова: *подземные воды, многолетнемерзлые породы, талики, удельное электрическое сопротивление*

Abstract. Within the Republic of Sakha (Yakutia), permafrost rocks are widespread. Permafrost has different conditions of distribution, thickness and dynamics, which determines the specificity of the formation and regime of groundwater and different depths of their occurrence. Permafrost complicates the exploration, assessment of reserves and exploitation of groundwater deposits. The article describes the research methodology, highlights the prerequisites for determining permafrost in the geoelectric section, as well as the features of their morphology using the example of one of the areas of the Mirninsky ulus of the Republic of Sakha (Yakutia). A map of the depth of the permafrost base was compiled; an increase in the thickness and depth of the permafrost base in the northeast direction was noted. A heterogeneous structure of the permafrost thickness was noted, associated with the distribution of lenses of thawed rocks and cryopegs. Areas of development of thawed rocks that are promising for the discovery of fresh water sources have been identified, and the direction for further research has been determined. The results of the studies have scientific and practical significance in predicting areas of complications during drilling wells associated with permafrost drilling, as well as in determining areas for the development of inter-permafrost and sub-permafrost aquifer reservoirs and minimizing the risks of dry wells drilling.
Key words: *groundwater, permafrost rocks, taliks, electrical resistivity*

Введение

Актуальность представленного исследования связана с необходимостью поиска источников технического водоснабжения для использования при бурении нефтяных скважин и обеспечения системы поддержания пластового давления (ППД) в северных районах Восточной Сибири. Сложность поисков, оценки запасов и эксплуатации

месторождений подземных вод определяется разнообразием условий распространения и мощности ММП, а также строением отложений, вмещающих водоносные коллекторы. Зачастую верхняя часть разреза на месторождениях углеводородов изучена единичными гидрогеологическими скважинами. На территории Республики Саха (Якутия) распространена проблема бурения «сухих» или низкодебитных скважин. Основные притоки приурочены к нижне-среднекембрийскому водоносному комплексу (ВК), вмещающему минерализованные воды с повышенными концентрациями железа и сероводорода. Для решения задач поиска пресных подземных вод в условиях распространения ММП предлагается применение технологии малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне (мЗСБ), которая позволяет изучать геоэлектрические свойства горных пород до глубин 600 м, получать информацию о распространении и морфологии контрастных геоэлектрических сред, в т.ч. ММП и талых пород.

Объект исследований

Рассматриваемый район расположен в пределах Лено-Анабарской геокриологической провинции в зоне сплошного распространения ММП. Мощность ММП определяется кровлей первого коллектора, который зачастую приурочен к метегерской свите нижне-среднекембрийского ВК. Мощность ММП изменяется от 300 – 400 м вблизи г. Мирный на севере исследуемого района до 100 м на границе с Мирнинского и Ленского улусов на юге. Температуры пород на подошве слоя годовых теплооборотов изменяются от -3 до -1 °С. Влияние мерзлой зоны определяется повсеместной изоляцией подмерзлотных вод. Редкие очаги питания и разгрузки возникают при совпадении таликов с зонами разломов. Большинство таликов, формирующихся под водоемами, не связаны с глубокими подмерзлотными водоносными горизонтами, т.к. имеют в основании водоупорные породы. По гидрогеологическому районированию участок расположен на территории Сибирского сложного артезианского бассейна (I порядка) в западной части Якутского артезианского бассейна II порядка. Главными факторами, определяющими гидрогеологические условия района, являются наличие мощных соленосных толщ и высоко приподнятые области питания. Основными дренажными системами подземных вод являются бассейны крупных рек.

Надсолевая гидрогеологическая формация составляет верхнюю часть разреза от четвертичных отложений до бордонской свиты среднего кембрия включительно, содержит пресные и слабоминерализованные воды <1 г/л без сероводорода, что делает их целевым объектом поиска источников технического и хозяйственно-бытового водоснабжения нефтегазопромыслов. Нижезалегающие отложения относятся к соленосной формации. В верхних горизонтах метегерской свиты (до глубины не более 20 м от кровли свиты) возможно развитие коллекторов слабоминерализованных вод 1–2 г/л без/с пониженными концентрациями сероводорода. Более глубокозалегающие коллекторы метегерской, ичерской и чарской свит содержат воды с повышенной минерализацией от до 32–98 г/л, с железом и сероводородом, что делает их непригодными для обеспечения технических нужд бурения и системы ППД.

Методика исследований

Для изучения распространения и строения ММП использованы результаты электроразведочных работ мЗСБ 2019 г. на одной из нефтегазопоисковых площадей Мирнинского улуса Республики Саха (Якутия), проанализированы результаты предшествующих гидрогеологических исследований, бурения и геофизических исследований глубоких и гидрогеологических скважин района.

Исследование методом мЗСБ выполнялось с применением соосно-разнесенной установки. Размеры генераторных петель составляли 100х100 м, шаг между приемниками – 100, 300 м, между источниками – 500 м объем исследований – 1400 ф.н. на площади 30 км^2. Возможность картирования ММП и прогнозирования таликовых зон по данным мЗСБ основана на высокой контрастности пород в мерзлом и талом

состояниях. Многолетнемерзлые и сезонного промерзания породы имеют повышенную льдистость, что определяет высокие значения удельного электрического сопротивления (УЭС) в сотни Ом·м и может служить индикатором для выявления ММП.

Результаты

По данным мЗСБ многолетнемерзлые породы сопровождаются повышенными значениями сопротивления, образуют контрастную геоэлектрическую границу между мерзлыми породами с УЭС более 100 500 Ом·м и охлажденными терригенными образованиями верхоленской серии (джуктинской и бордонской свит) – 10–60 Ом·м (рис. 1). По данным геофизических исследований глубоких разведочных скважин, фиксируемая толща сопровождается максимумами диаметра скважины. В приведенном ниже примере отмечается увеличение диаметра скважины до 300–450 мм при номинальном 219 мм. В 1976–1977 гг. Б.В. Володько и А.М. Мусиным установлено, что при бурении мерзлых пород диаметр скважины резко меняется вследствие вытаивания льдистых образований, в то время как в талых породах он сохраняется сравнительно постоянным. Кроме того, в 2021 г. нижняя граница ММП, определяемая по геофизическим данным, подтверждена на смежном месторождении несколькими скважинами в виде интервалов притоков пресных вод непосредственно под зоной распространения высокоомных промороженных пород.

Области развития талых пород на геоэлектрических разрезах проявляются в виде локальных зон пониженного сопротивления в первые десятки Ом·м в однородном массиве мерзлых (высокоомных) пород. Известно, что песчаные отложения таликовых зон Центральной Якутии при температуре около 0 °С и пористости 35 – 42 % характеризуются сопротивлением, меняющимся от 70 – 80 до 20 – 25 Ом·м, в зависимости от минерализации, варьирующей от 0.5 до 3 г/л. На основе опыта исследований мЗСБ на Среднеботуобинском месторождении определено, что в исследуемом районе талики сопровождаются значениями УЭС менее 60 Ом·м.

На изучаемой территории, согласно данным мЗСБ, фиксируется неоднородное строение высокоомной толщи, связанной с мерзлыми породами, которая состоит из двух, иногда трех слоев (рис. 2).

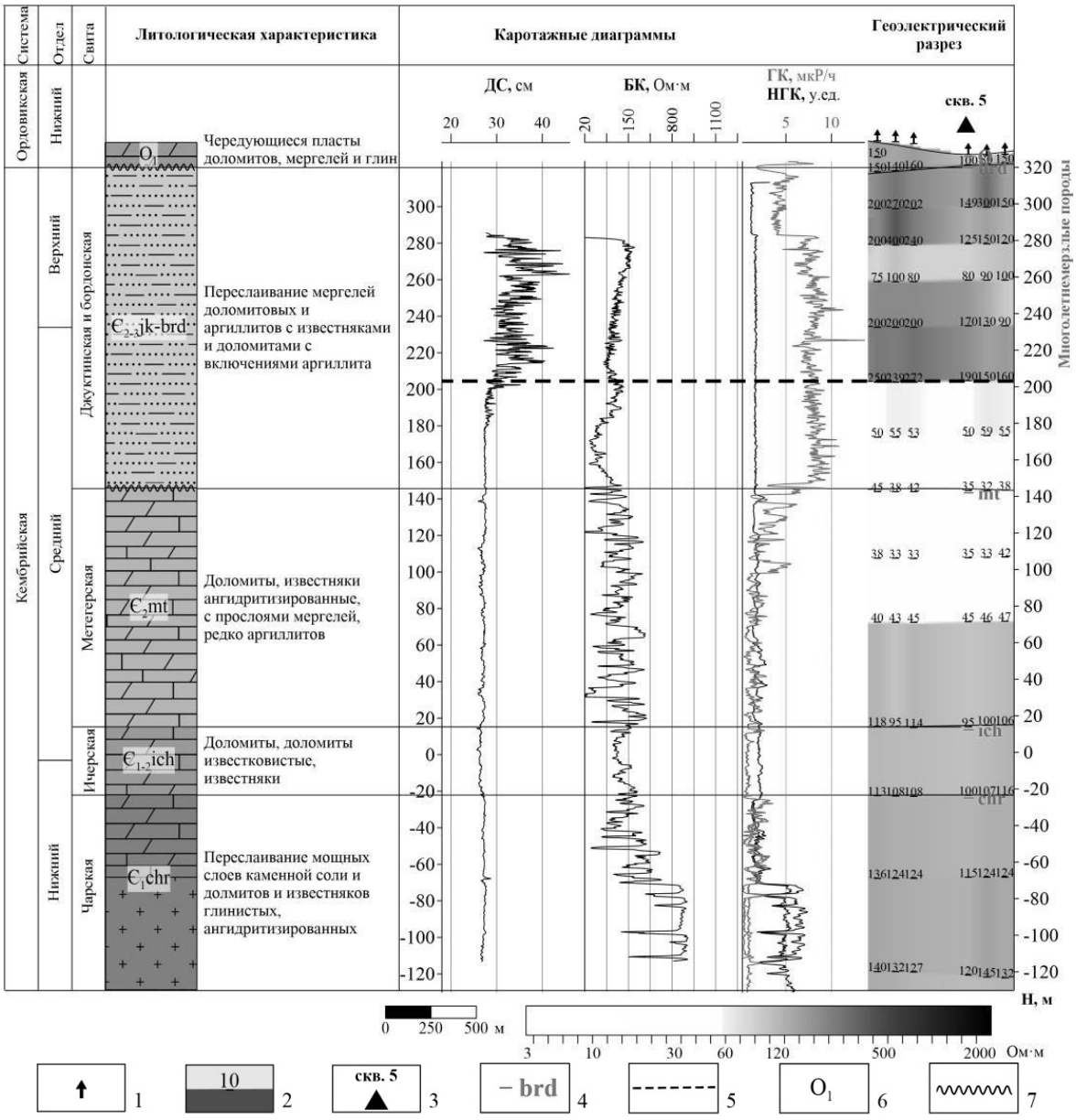


Рис. 1. Отображение ММП в геофизических полях по данным ГИС и мЗСБ. Условные обозначения: 1 – пункты мЗСБ; 2 – геоэлектрические слои и значения продольного сопротивления, Ом·м; 3 – скважина глубокого бурения; 4 – стратиграфические отбивки в скважине; 5 – прогнозная подошва ММП; 6 – стратиграфические индексы; 7 – перерывы в осадконакоплении.

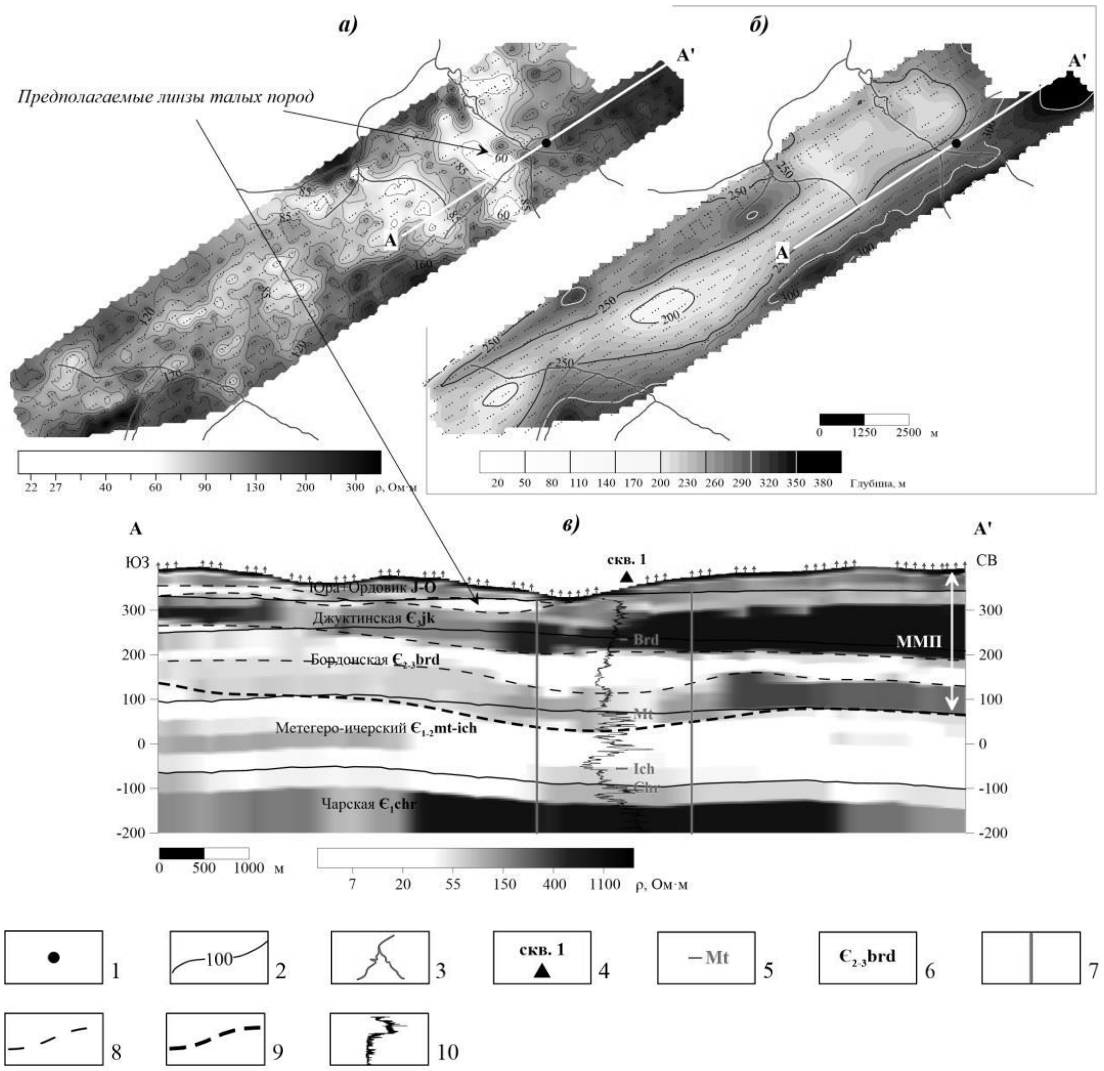


Рис. 2. Определение глубины залегания подошвы ММП: а – отображение зон развития талых пород на карте УЭС отложений юры, ордовика и верхнего кембрия; б – результирующая карта глубины залегания подошвы ММП; в – отображение в разрезе водоупорных и водопроводящих пород по данным мЗСБ. Условные обозначения: 1 – скважины глубокого бурения; 2 – изолинии продольного сопротивления, Ом·м / изогипсы подошвы многолетнемерзлых пород, м; 3 – гидросеть; 4 – скважина глубокого бурения; 5 – стратиграфические отбивки в скважинах; 6 – индексы стратиграфических подразделений; 7 – тектонические нарушения по данным сейсморазведки; 8 – границы горизонтов с пониженными значениями сопротивления по данным мЗСБ; 9 – прогнозная подошва ММП по данным мЗСБ; 10 – диаграмма БК.

Верхний слой характеризуется УЭС 100–350 Ом·м, охватывает юрские, ордовикские отложения и верхние горизонты верхоленского комплекса (джуктинской и бордонской свит) среднего-верхнего кембрия. Глубина залегания подошвы верхнего слоя изменяется от 80 до 200 м. На отдельных участках верхний слой подстилается проводящим интервалом с УЭС 10–20 Ом·м и мощностью 20–50 м в бордонской свите. Пониженные значения УЭС в данном интервале могут быть связаны как с увеличением глинистой составляющей в составе пород, так и с присутствием в разрезе ММП минерализованных подземных вод отрицательной температуры – криопэгов. В ряде скважин района среди пород среднего-верхнего кембрия вскрываются трещинно-пластовые напорные воды. Величина напоров составляет от 20 до 80 м, глубина

залегания – от 82 до 209 м. Воды в них сульфатно-хлоридные натриевые, минерализация – 13 – 32 г/л. Второй слой высокоомных пород картируется на глубинах 200 – 380 м и обладает мощностью 30–100 м, с его подошвой связывается подошва ММП. Погружение подошвы и увеличение общей мощности ММП картируется в северо-восточном направлении. Таким образом, мерзлота охватывает юрские и ордовикские отложения, джуктинскую и бордонскую свиты среднего-верхнего кембрия практически на всю мощность, глубина залегания подошвы ММП варьирует в пределах 200 – 380 м.

В 2019 г. на территории пробурена гидрогеологическая скважина, вскрывшая первый от поверхности водоносный горизонт и соответственно подошву ММП в метегерской свите на глубине 280 м. По результатам термометрии, выполненной в октябре 2023 г., минимальная температура горных пород в данной скважине достигает -2.1 °С (нулевая изотерма не достигнута, т.е. находится глубже забоя скважины – 440 м). Согласно результатам мониторинговых исследований Мало-Ботуобинского алмазоносного района мощность многолетнемерзлых пород в исследуемом районе может достигать 300–400 м, а температура – -2.3…-2.7 °С [0]. Таким образом, результаты мЗСБ подтверждаются данными бурения и согласуются с результатами предшествующих исследований района.

Следует отметить, что внутри верхнего высокоомного промороженного слоя встречаются маломощные линзы пород с пониженными значениями УЭС в первые десятки Ом·м. Линзы располагаются под речными долинами и свидетельствуют о наличии талых пород. Известно, что на территории Среднеботуобинского месторождения подобные геофизические аномалии сопровождают талики с пресными водами без сероводорода, дебиты притоков достигают 126–578 м^3/сут. На описываемой территории данные локальные объекты не изучены бурением. Ввиду небольшого распространения прогнозных линз, ожидается их ограниченная водообильность. Дальнейшее направление исследования – расширение контура изученности мЗСБ на юг с целью выявления более крупных перспективных объектов, а также разработка критериев для определения наиболее водообильных зон.

Заключение

В результате исследования прослежено сокращение глубины залегания подошвы ММП с северо-востока на юго-запад от 380 до 200 м. Отмечено неоднородное строение толщи ММП по разрезу, связанное с распространением линз талых пород и криопэгов. Полученные данные подтверждаются бурением и предшествующими гидрогеологическими исследованиями. Выявлены локальные участки развития талых пород, перспективные на обнаружение источников пресных вод, которые на данный момент не подтверждены скважинами. Определены дальнейшие направления исследований: расширение контура изученности мЗСБ на юг с целью выявления более крупных перспективных объектов, разработка критериев для определения наиболее водообильных зон.

Список литературы

1. Вожов В.И., Сурнин А.И. Криолитосфера и геотермия Сибирской платформы в связи с ее нефтегазоносностью. – М., 1983. 34 с. – (Геол. методы поисков и разведки м-ний нефти и газа. Обзор/ ВИЭМС)

2. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:200 000. Серия Верхне-Вилюйская. Лист P-49-XVIII. Объяснительная записка. Москва, 1990

3. Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России. Альбом мелкомасштабных карт. Новосибирск: Гео, 2005. 54 с.

4. Сидоренко А.В. Гидрогеология СССР, том XX, Якутская АССР. Якутское геологическое управление. Институт мерзлотоведения СО АН СССР. М., изд-во «Недра», 1970, 384 с.

5. Оцимик А.А., Токарева О.В., Буддо И.В., Шелохов И.А., Александрова А.М., Акулова И.В., Шарлов М.В., Елимова В.В., Сабанчин И.В. Малоглубинные электромагнитные зондирования мЗСБ для картирования водонасыщенных горизонтов-коллекторов под зоной распространения ММП на территории Якутии. Геомодель 2019. Геленджик, 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201950153.

6. Валеев Р.Р., Колесников Д.В., Буддо И.В., Ильин А.И., Аксеновская А.А., Черкасов Н.А., Агафонов Ю.А., Гринченко В.А. Подход к решению проблемы дефицита воды для системы поддержания пластового давления нефтяных месторождений Восточной Сибири (на примере Среднеботуобинского НГКМ). Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, январь (1) 2019, 2019. с. 55 – 67, DOI: 10.30713/2413-5011-2019-1-55-67.

7. Мельникановицкий И.М., Ряполова В.А., Хордикайнен М.А. Методика геофизических исследований при поисках и разведке месторождений пресных вод /под ред. А.А. Огильви. М.: Недра, 1982. 239 с.

8. Власова Т.А. Отчет о результатах работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботуобинского алмазоносного района и прилегающей территории за 2007 – 2009 гг. (Режимная партия). – Мирный: АК «АЛРОСА», 2010. – с. 165.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЗАКРЕПЛЕННЫХ ПЕСЧАНЫХ МАССИВОВ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Паламарчук В.А.[1,2,3], Лебедева Л.С.[4], Павлова Н.А.[4], Гинзбург А.П.[2,5], Баишев Н.Е.[4]

[1]Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, palamarchuk97@inbox.ru

[2]ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», Салехард

[3]Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень

[4]Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, lyudmilaslebedeva@gmail.com

[5]Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, alexandrginzburg13154@yandex.ru

Аннотация. В 2021-2023 гг. проведены полевые работы на тукулане Махатта (Центральная Якутия) и урочище «Пески» (Забайкалье). Отмечено, что региональные геолого-тектонические и мерзлотные условия определяют особенности питания и, соответственно, состава подземных вод массивов. Впервые изучен изотопный состав подземных вод урочища «Пески».

Ключевые слова: *песчаные массивы криолитозоны, талики, подземные воды, гидрохимические условия, изотопный состав воды, Восточная Сибирь.*

Abstract. In 2021-2023 field works were carried out on tukulan Mahatta (Central Yakutia) and the massif “Sands” (Transbaikalia). It is noted that regional geological-tectonic and permafrost conditions determine the characteristics of nutrition and, accordingly, the composition of groundwater massifs. The groundwater isotopic composition at the massif "Sands" was studied for the first time.

Key words: *sand massifs of the cryolithozone, taliks, ground waters, hydrochemical conditions, isotopic composition of water, Eastern Siberia.*

В области развития многолетнемерзлых пород (ММП) источники водоснабжения часто связаны с различными типами водоносных таликов. В Восточной Сибири мощные водоносные талики приурочены к широко распространенным эоловым отложениям. Подземные воды таких таликов обладают хорошим химическим качеством и требуют незначительной водоподготовки. Эти мерзлотно-гидрогеологические особенности песчаных массивов были отмечены еще в 1970-80-х гг. [6, 9]. Однако до сих пор подземные воды, приуроченные к таким массивам, до конца не изучены. Возрастающие потребности в качественной воде обуславливают необходимость изучения подземных вод песчаных массивов криолитозоны. В последние десятилетия трансформации природных условий, происходящие на фоне климатических изменений, затрагивают большую часть территории криолитозоны. Эти изменения влияют на водно-тепловой режим как закрепленных песчаных массивов [3], так и перевеваемых тукуланов [8]. В связи с этим, необходима организация гидрорежимных наблюдений на вышеуказанных

территориях. Это позволит охарактеризовать современные гидрогеотермические условия песчаных массивов, а также выполнить прогноз их изменений.

В 2021 г авторами возобновлены исследования на дюнных массивах криолитозоны. В данной работе приведены результаты гидрохимических исследований незакрепленных песчаных массивов - тукулана Махатта (Центральная Якутия) и урочища «Пески» (Забайкалье). В ходе полевых работ в 2021-2023 гг. были отобраны 102 пробы воды, из них 2 – атмосферные осадки; 67 – подземные воды; 18 – поверхностные воды (реки, ручьи, озера); 12 – наледи; 3 – ледяные ядра бугров пучения. Аналитические исследования состава воды выполнены в химической и изотопной лабораториях ИМЗ СО РАН методами титрометрии, капиллярного электрофореза и лазерной абсорбционной ИК-спектрометрии.

Песчаные массивы находятся в области сплошного распространения ММП мощностью 500-600 м [6, 9]. Средняя годовая температура воздуха за последние 20 лет, по данным метеостанции Вилюйск, составляет минус 7,1°С, по данным метеостанции Чара – минус 6,3°С, среднее годовое количество осадков – 315 и 395 мм, соответственно [1]. В пределах тукулана Махатта развит субаэральный надмерзлотно-межмерзлотный талик мощностью 120 м и более. В западной части массива подземные воды талика дренирует долина ручья Мугур-Тарын. Суммарный дебит родников превышает 700 л/с. На поверхность разгружаются подземные воды гидрокарбонатного магниево-кальциевого состава с минерализацией 20-30 мг/л [9]. Под урочищем «Пески» также доказано наличие талика мощностью более 30 м, тип которого до сих пор остается спорным [6, 7]. Основная родниковая разгрузка происходит в северной части массива (руч. Аленушка и Песчаный). Их дебиты составляют 220 и 168 л/с, соответственно. По химическому составу эти воды гидрокарбонатные кальциевые, кальциево-магниевые, кальциево-натриевые с минерализацией 20-100 мг/л [6].

Гидрохимические особенности природных вод песчаных массивов

Атмосферные осадки. В июле 2021 г на тукулане Махатта выпали дожди гидрокарбонатного магниево-кальциевого состава (рис. 1А) с минерализацией 14 мг/л и повышенным содержанием аммония (0,5 мг/л), которое было отмечено в атмосферных осадках и подземных водах массива еще в 1974 г [9]. Высокие концентрации аммоний-иона могут быть связаны с загрязнением воздуха выбросами промышленных и сельскохозяйственных предприятий региона, однако, это предположение требует отдельных исследований. В июле 2023 г на урочище «Пески» дождевые воды имели гидрокарбонатный кальциево-натриевый состав с минерализацией 14 мг/л, также в них было отмечено повышенное содержание калия (1,4 мг/л). Атмосферные осадки на тукулане Махатта отличаются более «легким» изотопным составом относительно осадков на урочища «Пески» (рис.1Б), что связано с фракционированием атмосферной влаги в ходе ее более протяженного переноса с запада на восток [2].

Подземные воды. Воды родников тукулана Махатта гидрокарбонатные кальциево-магниевые с минерализацией до 50 мг/л (рис. 1 А). Минимальная минерализация (8-19 мг/л) отмечена у родников, сформированных надмерзлотными водами сезонноталого слоя. Надмерзлотно-межмерзлотные воды таликов в очагах разгрузки имеют минерализацию 13-50 мг/л. Их ионный состав за более чем 45-летний период значительных изменений не претерпел [8]. Изотопный состав подземных вод тукулана Махатта близок к средневзвешенному составу атмосферных осадков региона (рис. 1Б). Это свидетельствует об их метеоинфильтрационном происхождении. Также полученные данные согласуются с результатами опробования источников тукуланов Кысыл-Сырский и Махатта в 2015-2018 гг. [4], что указывает на стабильность их изотопного состава.

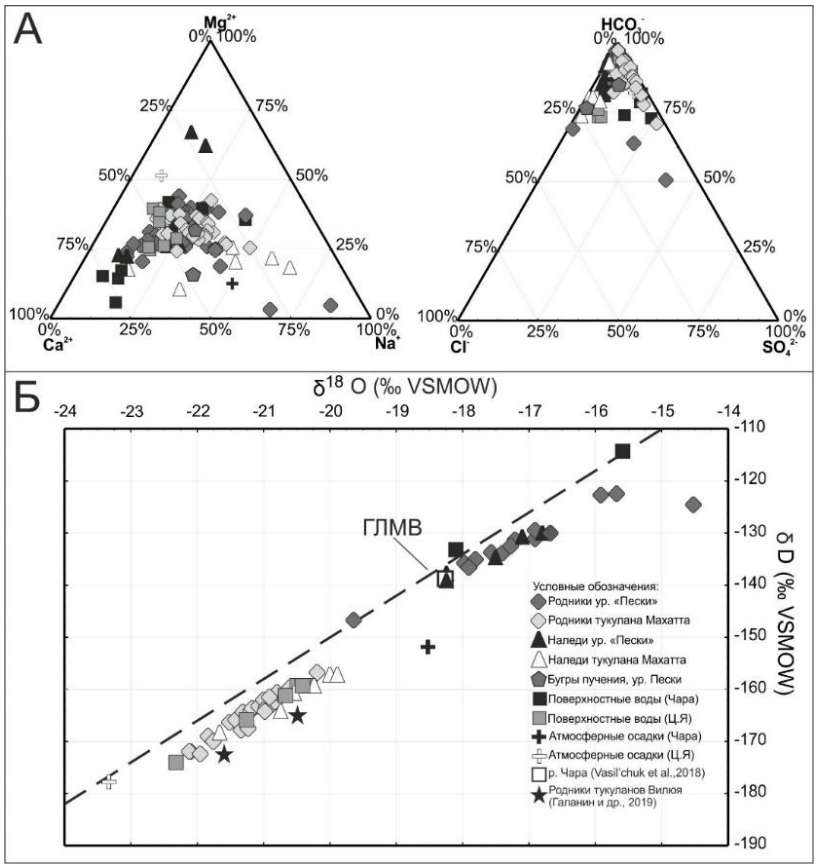


Рис. 1. Химический (А) и изотопный (Б) составы природных вод урочища «Пески» и тукулана Махатта (А)

На правобережье р. Чара были опробованы трещинно-жильные воды родника «Беленький». Химический состав вод родника по данным «Читагеология» на 4.05.1979 г – гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-натриевый с минерализацией 162 мг/л. В июле 2022-2023 гг. воды родника имели гидрокарбонатно-сульфатный натриевый и натриево-кальциевый состав с минерализацией 116-159 мг/л. Также отмечалась высокая концентрация фтора до 4-5 мг/л. В питании вод родника участвуют поверхностные воды, поглощаемые разломами, атмосферные осадки и подземные воды вышележащих водоносных горизонтов, вероятно, их соотношение из года в год претерпевает изменения, влияя тем самым на химический состав вод родника. В 1980-х гг. на урочище «Пески» в группе родников руч. Песчаный пробурена и оборудована для режимных наблюдений гидрогеологическая скважина глубиной 96,5 м, которая фонтанирует до настоящего времени. Пьезометрический уровень вод глубоких водоносных горизонтов установился выше поверхности земли (+5,25 м), дебит самоизлива составлял 87,5 л/с [6]. Химический состав подземных вод был гидрокарбонатным кальциево-магниевым с минерализацией 64 мг/л [6]. В июле 2023 г уровень подземных вод составлял примерно 3,0-3,5 м выше поверхности земли, воды были гидрокарбонатными кальциевыми с минерализацией 83 мг/л. Отмечалось высокое содержание фтора (3,8 мг/л) и бария (0,3 мг/л). В летние периоды 2022-2023 гг. опробованы родники руч. Аленушка и Песчаного, а также родники на периферии массива. Подземные воды гидрокарбонатные преимущественно кальциево-магниевые, реже магниево-кальциевые, кальциевые, кальциево-натриево-магниевые и кальциево-натриевые с минерализацией 43-160 мг/л и с содержанием фтора от 0,01 до 4 мг/л. Химический состав большинства родников близок к составу вод скважины. Однако, за два года наблюдений в некоторых родниках произошли изменения в катионном составе и содержании фтора. Для выявления связей были построены корреляционные зависимости содержания фтора от минерализации вод, водородного

показателя (pH), а также содержаний ионов Ca^{2+}, Mg^{2+} и Na^{+} (n=58). Тесная корреляционная связь наблюдается с минерализацией ($R^2 = 0,76$), отсутствие связи с pH ($R^2 = 0,04$), средняя – с Ca^{2+}, Mg^{2+} и Na^{+} ($R^2 = 0,44$; 0,4; 0,3, соответственно). Повышенные значения минерализации и, соответственно, содержания фтора, вероятно, указывают на участие высоконапорных подмерзлотных вод в формировании родников, однако, из года в год степень их участия изменяется, меняя тем самым химический состав родниковых вод. Таким образом, на участках разгрузки подземных вод урочища «Пески» происходит смешение вод метеорного и глубинного происхождения. Вероятно, многочисленные тектонические разломы [5] способствуют активной взаимосвязи между подземными водами различных водоносных комплексов. Для выявления изменений режима химического состава родниковых вод необходимы данные многолетних, включая сезонные, исследований. Точки на графике δD – $\delta^{18}O$, соответствующие значениям подземных вод урочища «Пески», расположены достаточно кучно, их изотопный состав более «тяжелый» по сравнению с водами родника «Беленький» (рис. 1Б). Для вод глубинных горизонтов характерны более «легкие» составы за счет большего периода фракционирования и облегчения их состава [2]. А воды родников Аленушка и Песчаный, видимо, в большей степени связаны с атмосферными осадками, что «утяжеляет» их состав.

Поверхностные воды. Воды р. Вилюй напротив тукулана Махатта в летний период имели хлоридно-гидрокарбонатный смешанный по катионам состав и минерализацию 128-138 мг/л. Воды ручья Кысыл-Юрях, протекающего вдоль восточной периферии тукулана, гидрокарбонатные кальциево-магниевые с минерализацией 58-79 мг/л (рис. 1А). Более «легкий» изотопный состав руч. Кысыл-Юрях связан с разгрузкой подземных вод в русло ручья. Изотопный состав июльских проб воды в нижнем течении р. Вилюй согласуется с ранее полученными сотрудниками ИМЗ СО РАН данными (рис. 1Б) [4].

Поверхностные воды Чарской котловины отличаются пониженной минерализацией. Химический состав вод р. Средний Сакукан в июле 2022-2023 г был гидрокарбонатным кальциевым с минерализацией 29-46 мг/л. Относительно высокая концентрация в них фтора (1,0-1,5 мг/л) наблюдается как в месте впадения в реку руч. Аленушка, так и в 7 км выше по течению, что может свидетельствовать о разгрузке глубинных подземных вод и в подрусловой талик и в талик под песчаным массивом. Воды р. Чара гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией 48-60 мг/л. В июле 2023 г отмечались повышенные концентрации сульфатов (до 7 мг/л), что, вероятно, связано с активным таянием высокольдистых отложений ледового комплекса, богатых органическим веществом. Воды р. Средний Сакукан отличаются «легким» изотопным составом относительно вод р. Чара (рис. 1Б), возможно, за счет участия в поверхностном стоке реки изотопически более «легких» атмосферных осадков, формирующихся под влиянием высотного изотопного эффекта [2] в горах Кодара. Воды р. Чара, вероятно, в большей степени связаны с более «тяжелыми» осадками, выпадающими в котловине. Полученные данные согласуются с ранее полученными данными сотрудниками МГУ [10].

В июле 2023 г на урочище «Пески» были отобраны пробы из двух озер – оз. Аленушка (северо-западная часть массива) и озеро 1 (юго-восточная периферия массива). Воды озер гидрокарбонатные магниево-кальциевые с минерализацией 25-44 мг/л. Повышенные концентрации в них фтора (0,6-1,0 мг/л) указывают на их связь с подземными водами. В водах оз. Аленушка также повышено содержание нитратов (до 3 мг NO_3^-/л), предположительно, в результате рекреационной нагрузки.

Наледи. В начале июля 2021 года на тукулане Махатта в долинах р. Кысыл-Юрях и р. Безымянный были обнаружены останцы наледей мощностью 80-90 см. Пробы льда отобраны из верхних, средних и нижних частей. Наледный лед гидрокарбонатного кальциевого и натриевого состава (рис. 1А). Отмечается уменьшение минерализации сверху вниз с 35 до 8 мг/л. В обеих наледях наблюдаются повышенные содержания

аммония (до 1 мг/л). Как было отмечено выше, это природная особенность формирующих наледь вод. Изотопный состав наледных льдов варьирует в достаточно узком диапазоне (рис.1Б) и практически идентичен осреднённому составу источников подземных вод, но, по сравнению с родниками, имеет немного утяжеленный состав, вероятно, из-за процессов изотопного фракционирования при замерзании воды [2].

На урочище «Пески» также опробованы два останца наледей. Их мощности составляли порядка 80-85 см. Наледные воды гидрокарбонатного кальциевого, кальциево-магниевого и магниевого составов. Отмечается увеличение минерализации льда сверху вниз с 9 до 35 мг/л. Повышенные концентрации фтора (до 0,5 мг/л) указывают на участие глубинных вод в формировании наледей. Изотопный состав наледных вод урочища «Пески» также близок к составу формирующих их родников (рис. 1Б), более «тяжелые» воды свойственны для наиболее минерализованных средних и нижних частей наледей.

Ледяные ядра бугров пучения. В пределах заболоченных ложбин, примыкающих к урочищу «Пески», широко распространены сезонные и многолетние бугры пучения. Их образование в основном происходит в результате интенсивного подтока вод талика, переувлажняющих участки, примыкающие к песчаному массиву [6]. В июле 2022 г на северной периферии урочища «Пески» в долине небольшого ручья были обнаружены два бугра пучения высотой до 3 м и диаметром 10-15 м, в июле 2023 г ледяное ядро одного бугра вытаяло полностью, во втором бугре наблюдались остатки льда мощностью около 40 см. Этот лед в верхней части был прозрачным, с горизонтальной и субгоризонтальной слоистостью, между слоями наблюдались крупные пузырьки льда. В нижней части лед мутный с включениями торфа, слоистость не проявлялась. Химический состав льда этого бугра гидрокарбонатный кальциево-магниевый и кальциево-натриево-магниевый с минерализацией 11-32 мг/л и содержанием фтора – до 0,02 мг/л. Вероятно, образование бугра происходило за счет периодических инъекций подземных вод, формирующих ручей. Еще один вытаивающий бугор пучения был обнаружен в русле руч. Песчаный недалеко от выхода подземных вод. Бугор имел высоту 1,5 м и диаметр около 10 м. Видимая мощность льда составила 55 см. Лед чистый и прозрачный, без примесей с вертикальной слоистостью, подчеркнутой пузырьками воздуха диаметром от 1 до 5-10 мм. По химическому составу лед второго бугра гидрокарбонатный кальциевый с минерализацией 7 мг/л и содержанием фтора 0,1 мг/л. Этот бугор, видимо, образовался в результате мощной инъекции подземных вод, формирующих крупные родники песчаного массива.

Выводы

Подземные воды песчаных массивов Восточной Сибири ультрапресные, по анионному составу гидрокарбонатные, по катионному – преимущественно кальциево-магниевые, реже магниево-кальциевые, кальциевые, кальциево-натриево-магниевые и кальциево-натриевые с минерализацией 13-160 мг/л. Отмечены некоторые особенности подземных вод рассмотренных массивов. Так, подземные воды тукулана Махатта формируются метеорными водами, на это указывает общность химического и изотопного составов опробованных вод (подземные и поверхностные воды, наледи, дождевые осадки). Подземные воды урочища «Пески», вероятно, формируются как метеорными, так и высоконапорными подмезлотными водами, причем их соотношение из года в год меняется. Отличительными особенностями вод урочища являются повышенная минерализация и высокие содержания фтора (до 4 мг/л).

Изотопный состав подземных вод тукулана Махатта более «легкий» относительно вод урочища «Пески». Эти различия в первую очередь связаны с географическим положением и климатическими особенностями территорий, которые определяют изотопный состав атмосферных осадков, играющих важную роль в формировании подземных вод.

Полученные выводы основаны на результатах краткосрочных наблюдений за период с 2021 по 2023 гг. Они характеризуют изученность химического состава подземных вод песчаных массивов на данном этапе исследований и впоследствии будут уточнены и дополнены.

Исследования проведены при частичной поддержке фонда имени Геннадия Комиссарова.

Список литературы

1. Архив погоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://meteo.ru/ (дата обращения 10.01.2024).

2. Васильчук, Ю.К., Буданцова, Н.А., Васильчук, А.К., Чижова, Ю.Н. Изотопные методы в географии. Ч. 3. Геохимия стабильных изотопов атмосферы и гидросферы: Учебное пособие. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2013. – 216 с.

3. Гагарин, Л. А. О причинах затухания термосуффозионных процессов на бестяхской террасе р. Лены в центральной Якутии / Л. А. Гагарин, В. В. Оленченко, Н. А. Павлова // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2023. – № 5. – С. 28-42.

4. Галанин, А.А., Павлова, М.Р., Папина, Т.С. Стабильные изотопы 18O и D в ключевых компонентах водного стока и криолитозоны Центральной Якутии (Восточная Сибирь) / А. А. Галанин, М. Р. Павлова, Т. С. Папина [и др.] // Лёд и снег. – 2019. – Т. 59, № 3. – С. 333-354.

5. Геологическая карта масштаба 1:200 000 листа O-50-XXIX. - СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1975.

6. Еникеев, Ф. И. Урочище пески Чарской впадины (Северное Забайкалье) / Ф. И. Еникеев // География и природные ресурсы. – 2014. – № 4. – С. 73-80.

7. Замана, Л. В. Глубокозалегающие многолетнемерзлые породы во впадинах Северного Прибайкалья / Л. В. Замана // Геокриологические условия зоны Байкало-Амурской магистрали: Издание института мерзлотоведения СО АН СССР. – 1980. – С. 31-37.

8. Паламарчук В.А., Лебедева Л.С., Павлова Н.А., Хайруллин Р.Р., Баишев Н.Е. Современное состояние источников подземных вод песчаного массива Махатта, Восточная Сибирь // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 4, с. 24–36.

9. Шепелев, В.В. Особенности формирования и режима подземных вод тукуланных массивов Центральной Якутии (на примере массива Махатта) / В.В. Шепелев, А.В. Бойцов. – ИМЗ СО РАН: Якутск, 1975. – 238 с.

10. Vasil'chuk, Y. K. Early Holocene climate signals from stable isotope composition of ice wedges in the Chara Basin, northern Transbaikalia, Russia / Y. K. Vasil'chuk, A. C. Vasil'chuk, J. V. Stanilovskaya // Geoscience Frontiers. – 2018. – Vol. 9, No. 2. – P. 431-439.

ВЛИЯНИЕ МЕРЗЛОТНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ В РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

Тугарина М.А.
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск
tugarina_ma@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы влияния мерзлотно-гидрогеологических условий на устойчивость дорожной насыпи автомобильной трассы от БАМ до г. Якутска. По результатам обследования и бурения установлено, что причинами деформаций дороги является избыточное увлажнение грунтов основания и дорожной насыпи грунтовыми надмерзлотными и талыми водами, которые локализуются у основания насыпи и частично в теле насыпи. Грунты в основании насыпи преимущественно песчано-глинистые, нередко с примесью торфа, в переувлажненном состоянии обладают просадочными свойствами.

Ключевые слова: *многолетняя мерзлота, грунтовые воды, трещина, проседание поверхности*

Abstract. The issues of the influence of permafrost and hydrogeological conditions on the stability of the road embankment of the highway from the BAM to the city of Yakutsk are considered in the article. Based on the results of the survey and drilling, it was established that the causes of road deformations are excessive moistening of the foundation grounds and road embankment with ground supra-permafrost and melt water which are localized at the base of the embankment and partially in the body of the embankment. The grounds at the base of the embankment are predominantly sandy-clayey, often with an admixture of peat, and in a waterlogged state they have subsidence properties.

Key words: *permafrost, groundwater, fracture, surface subsidence*

Освоение северных территорий связано с необходимостью решения ряда проблем, вызванных особенностями их природно-климатических условий и геологического строения. Суровые климатические условия и наличие многолетнемерзлых грунтов оказывают определяющее влияние на работу различных объектов. В значительной мере это касается развития транспортной инфраструктуры и поддержания в надлежащем состоянии автомобильных дорог, которые испытывают разрушительное воздействие сезонной и многолетней мерзлоты. Эксплуатация автомобильных дорог в условиях севера приводит к появлению серьезных дефектов (просадка дорожного полотна, образование сетей трещин в дорожном покрытии и обочинах, заметные провалы и ямы).

Участок исследуемой автодороги проходит по южной части Алданского плоскогорья в пределах Приленского плато, находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород в сложных климатических, геологических, гидрогеологических и мерзлотных условиях [1].

Климат района резко континентальный, среднегодовая температура изменяется от $-4{,}7^0$ С (пос. Сковородино) до $-6{,}5^0$С (г. Тында) и $-11{,}5^0$С (Якутия).

В геоморфологическом отношении рельеф исследуемой территории представляет собой средне холмистое слаборасчлененное низкогорье с широкими днищами долин и пологими склонами плоских водоразделов [2]. Трасса автодороги проходит с юга на север от железной дороги БАМ до г. Якутска и часто пересекает многочисленные водотоки бассейнов р. Амура и р. Лены. В северном направлении абсолютные отметки поверхности постепенно понижаются от 540-750 м на южном конце трассы до 100-200 м на северном.

В геологическом строении принимают участие осадочные, метаморфические и магматические породы протерозоя (серицитовые и серицит-хлоритовые сланцы с прослоями метапесчаников и эффузивов) и архея (гнейсы, амфиболиты, кристаллические сланцы, кварциты). В верхней части геологического разреза все породы выветрены до состояния суглинка и супеси с примесью дресвы и щебня, переходящие с глубиной в глыбовую зону коры выветривания, мощность которой достигает 20 и более метров.

Особое место среди грунтов исследуемой трассы занимают специфические грунты – многолетнемерзлые супеси и суглинки льдистые, нередко с примесью органических веществ, техногенные – щебенистые грунты дорожной насыпи и биогенные – слабозаторфованные суглинки.

С многолетней мерзлотой часто связаны проявления многочисленных наледей, термокарста и бугров пучения вдоль трассы. Наледи обычно образуются по водотокам, у подножий подрезанных склонов и местах разгрузки подземных вод, которые тяготеют к основаниям склонов. Термокарст часто развивается вдоль насыпей дорог по кюветам и канавам.

Геокриологические условия с учетом геоморфологических и геологических особенностей территории обусловили наличие двух основных типов районов: коренные склоны, покрытые делювиальными отложениями, где многолетняя мерзлота отмечается на глубине 1,2-4,3 м, и поймы рек и ручьев, где многолетняя мерзлота распространена с глубины 0,5-1,9 м.

Мощность слоя сезонного промерзания-оттаивания на открытой местности составляет 1,5-4,0 м, на залесенных и заболоченных участках – не превышает 0,5-1,5 м.

Многолетняя мерзлота оказывает определяющее влияние на гидрогеологические условия территории. Основной грунтовый надмерзлотный водоносный горизонт, который формируется в сезонно-талом слое, оказывает существенное влияние на строительство и эксплуатацию дороги.

Мощность водоносной зоны изменяется от 0,2 до 5,8 м и практически повсеместно соответствует мощности сезонно-талого слоя. Нижним водоупором часто служат многолетнемерзлые породы или талые глинистые грунты независимо от их температурного состояния. Грунтовые и талые воды часто насыщают грунты основания дорожной насыпи.

Уровень грунтовых вод отмечается на глубине от 0,2 до 2,2 м и его положение зависит от времени года. Наибольшая водообильность горизонта и высота стояния уровня приходится на летний и летне-осенний период, когда деградирует сезонная мерзлота и выпадают жидкие атмосферные осадки. Уровень подземных вод в это время нередко достигает дневной поверхности.

Надпойменные террасы в летнее время сильно увлажняется и заболачивается, они покрыты угнетенной древесной растительностью, кустарниками и кочкарником. Пойменные участки часто заболочены и в холодный период нередко покрываются наледями.

При рекогносцировочном обследовании различных отрезков трассы отмечены участки с различными дефектами: по дорожному полотну и обочинам – продольные трещины, параллельные оси дороги, которые могут быть классифицированы как трещины отрыва, возникшие при растягивающих напряжениях в стороны к краям дорожной насыпи; сети поперечных трещин, появившиеся на участках просадки дорожного полотна; отмечаются системы трещин в полотне дороги, которые локализуется в разрывы шириной до 3 см в дорожном покрытии. Эти трещины «перерезают» насыпь, сложенную щебенистым материалом, и отчетливо видны в обоих ее бортах.

На откосах дорожной насыпи отмечаются трещины отрыва и оползание грунтовой массы под влиянием просадки грунта у основания насыпи (рис.1). При этом деформируется и смещается дорожное ограждение; проседание дорожного полотна, ямы и разрушения обочин.

Причина большинства этих проблем в основном заключается в локальных просадках основания дорожной насыпи, усиленных дополнительным увлажнением грунтов под насыпью, представленных песчано-глинистыми отложениями, нередко с примесью торфа.

При незначительной высоте насыпи или на участках дороги в дорожных выемках близкое положение уровня подземных вод приводит к избыточному увлажнению тела насыпи, просадкам в дорожном покрытии и трещинам на откосах. Этому же способствует наличие значительных объемов снега, скопившегося в кюветах в виде валов мощностью до 1 м, и его таяние. На некоторых участках в кюветах с обеих сторон дороги отмечаются наледи, причем значительно бóльшие с нагорной стороны.

В весеннее время (период обследования) вследствие неустойчивых положительных температур воздуха эта водно-ледяная масса начала слабое течение в сторону пониженных участков рельефа.



Рис. 1. Разрушение откосов дорожной насыпи

Наличие дорожных берм и изгибов трассы в плане становятся своеобразными «ловушками», где скапливается и длительное время сохраняется значительный объем снежно-ледяной массы, что также препятствуют активному перетоку воды по кювету к водопропускным трубам. Учитывая факт частичного подтаивания скопившегося льда и невозможность его быстрого оттока, а также мерзлое состояние грунтов, которые не способны к фильтрации, талая вода перетекает лишь частично через водопропускные трубы, а в основном – по основанию и нижней части насыпи (рис.2), вызывая ее деформации.

По материалам бурения установлено, что подземные воды вскрываются на глубине контакта насыпных грунтов и грунтов основания природного сложения, представленных преимущественно супесчаными и суглинистыми отложениями. В условиях постепенного таяния наледей поток талых вод проходит над мерзлым грунтовым основанием частично через нижнюю часть насыпь.

Незначительные уклоны элементов рельефа также способствуют медленному оттоку грунтовых и поверхностных вод с площади, особенно в зимне-весенний период, когда грунты мерзлые и фильтрация воды затруднена.



Рис. 2. Многочисленные участки разгрузки воды в теле насыпи

Выводы

1. Грунты в основании дорожной насыпи преимущественно песчано-глинистые, нередко с примесью торфа, в переувлажненном состоянии обладают просадочными свойствами, что, очевидно, является основной причиной просадки дорожного полотна и различных его деформаций.

2. На всех изученных участках трассы основной причиной избыточного увлажнения грунтов основания и дорожной насыпи являются грунтовые надмерзлотные и талые наледные воды, которые локализуются в приповерхностной части у основания насыпи как в плане, так и в разрезе, и движутся по основанию и частично сквозь тело насыпи.

Список литературы

1. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 414 с.

2. Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР / под ред. А.И. Ефимова, И.К. Зайцева – М.: Недра, 1970. 384 с.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДМЕРЗЛОТНЫХ ВОД ДЛЯ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ЧУРАПЧИНСКОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Федоров М.А., Федоров А.А., Павлова Н.А., Федорова Н.Е.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск,
FedorovMA@mpi.ysn.ru

Аннотация. Приведены основные результаты поисково-оценочных работ, выполненных в разные годы на территории Чурапчинского района Республики Саха (Якутия). Рассмотрены мерзлотно-гидрогеологические условия территории. Дана характеристика субкриогенных юрского терригенного и нижнекембрийского карбонатного водоносных комплексов. Выявлено, что наиболее водообильные интервалы пород приурочены к маломощной (3-11 м) приконтактной зоне разновозрастных отложений севернее с. Чурапча. Обосновывается перспективность использования подмерзлотных вод в качестве источника питьевого и хозяйственного водоснабжения населения района.

Ключевые слова. *Чурапчинский район, Республика Саха (Якутия), поисково-оценочные работы, подмерзлотные воды.*

Аннотация. The article presents the major results of survey and assessment works carried out in the Churapcha district of Sakha (Yakutia) Republic in different years. Permafrost and hydrogeological conditions of this territory are considered. Subpermafrost Jurassic terrigenous and Lower Cambrian carbonate aquifers are characterized. The most water-abundant horizons are confined to the thin, from 3 to 11 m in thickness, near-contact zone of different-age sediments to the north of the Churapcha village. The prospect of using subpermafrost groundwater as a source of drinking and household water supply is justified.

Ключевые слова. *Churapchinsky district, Republic of Sakha (Yakutia), survey and assessment work, subpermafrost groundwater.*

В Центральной Якутии на Лено-Амгинском междуречье отмечается острый дефицит в качественной питьевой воды. Особенно актуальна эта проблемы для населения территории Чурапчинского района Республики Саха (Якутия), где проживает около 21160 человек. Основная часть населения района сосредоточена в административном центре с. Чурапча. Водоснабжение в районе осуществляется в основном за счет поверхностных вод озер. В зимний период население заготавливает лед. Использование подземных вод подозерных таликов для покрытия питьевых нужд затруднено по целому ряду факторов [1, 2]: наличие суглинистых отложений в геологическом разрезе территории обуславливает невысокие фильтрационные свойства пород; химический состав подозерных вод чаще всего не отвечает нормам, предъявляемым к питьевым водам; проблематична организация зон санитарной охраны водозаборов из-за близкого расположения населенных пунктов к озерам, а использование воды из удаленных от потребителей водоемов и таликов под ними экономически затратно; эксплуатация подозерных таликов приводит к деградации (высыханию) озер.

В связи с этим изучение подмерзлотных вод, защищенных от бактериологического и техногенного загрязнения, в качестве альтернативного (и не редко основного) источника питьевого водоснабжения становится необходимым. Качество этих вод, как правило, не претерпевает существенных сезонных изменений, что позволяет проводить качественную водоподготовку, несмотря на высокие концентрации отдельных химических элементов. Так, на скважинных водозаборах Якутии имеется положительный опыт применения обратного осмоса для доведения качества подмерзлотных вод с повышенными концентрациями фтора, лития и натрия до требований, предъявляемым к питьевым водам.

Территория Чурапчинского района расположена в восточной части Центрально-Якутской низменности, в области сочленения абалахской эрозионно-аккумулятивной равнины с тюнгюлюнской псевдотеррасой [3, 4]. Отличительная особенность этих

геоморфологических уровней – широкое распространение термокарстовых котловин с булгунняхами. Морфологически территория расположена в пределах Нижне-Алданской депрессии, сложенной образования нижнего палеозоя, мезозоя и кайнозоя [5]. В нижней части разреза, вскрытого пробуренными скважинами в районе работ, залегают породы среднего кембрия. Они представлены плотными доломитами с прослоями известняков. Выше по разрезу, на размытой кровле карбонатных пород, залегают терригенные отложения юрского возраста, сложенные разнозернистыми песчаниками кварц-полевошпатового состава с редкими прослоями глинистых сланцев. В основании песчаников залегает толща базальных конгломератов мощностью от единиц до первых десятков метров, иногда с глинистыми прослоями. С юга на север и северо-запад происходит моноклинальное погружение нижнекембрийских и юрских пород. В этом же направлении наблюдается увеличение толщи кайнозойских образований, которые представлены разнозернистыми песками и глинами неогенового возраста, а также песчано-суглинистыми четвертичными отложениями [6, 7]. В приповерхностной части разреза аллювиальные и озерно-аллювиальные четвертичные образования отличаются высокой льдистостью за счет текстурообразующих и повторно-жильных льдов.

Чурапчинский район расположен в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), подошва которых залегает на глубине 313 и более метров. Максимальные мощности криогенного водоупора, перекрывающего подмерзлотные водоносные горизонты и надежно изолирующего их от поверхностного загрязнения, отмечены в центре Таттинской впадины, где они составляют 500-585 м. Одна из скважин глубиной 650 м, пробуренная вблизи с. Дябыла в 2014 г. На территории Чурапчинского района широко развиты термокарстовые озера. Площади большинства озер не превышают 1 км^2. Мощность талых пород под ними не более 50 м, реже достигает 100 м. Верхние слои в таликах под термокарстовыми озерами сложены слабопроницаемыми суглинками. Это приводит к застойному режиму подземных вод в таликовых зонах, небольшим запасам и неудовлетворительному качеству воды.

Изучение подмерзлотных вод в рассматриваемом районе началось во второй половине 20-го века. В 1950-х годах в связи с постановкой работ по водоснабжению сельского хозяйства, здесь были пробурены первые скважины глубиной до 550 м, которыми вскрыты подмерзлотные воды в мезозойских и палеозойских отложениях. Опытно-фильтрационные работы были проведены примитивно – тартанием желонкой, поэтому гидрогеологические параметры были оценены приближенно, а применение в процессе бурения рассола не дало возможность полноценно изучить качество подмерзлотных вод.

В конце 1980-х – начале 1990-х годов на территории возобновились работы по изучению подмерзлотных вод. К перспективным для водоснабжения населённых пунктов Чурапчинского района рассматривались подмерзлотные воды субкриогенного юрского терригенного комплекса и субкриогенного среднекембрийского карбонатного комплекса. Точки бурения гидрогеологических скважин были приурочены к конкретным населенным пунктам и распределены неравномерно по площади исследований. Основные объемы поисково-оценочных работ выполнялись ГУП РС (Я) ЯПСЭ, впоследствии преобразованном в АО «Якутскгеология».

В 1981 г. в с. Чурапча пробурена скважина глубиной 600,4 м. Ею под многолетнемерзлыми породами на глубине 563 м были вскрыты подмерзлотные воды в юрских песчаниках и конгломератах мощность 7 м и подстилающих их среднекембрийских известняках. Наиболее водопроницаемые породы приурочены к приконтактной зоне юрских и кембрийских отложений. Опытной откачкой была подтверждена незначительная обводнённость пород разреза. Так, при дебите скважины 0,68 л/с понижение составило 37,9 м. По химическому составу воды гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатные магниево-натриевые умеренно-солоноватые с минерализацией 1,5 г/дм^3. Запасы подземных вод по данной скважине не оценивались.

В 1988 г. проведены поиски подземных вод в с. Диринг. Скважиной глубиной 585 м вскрыт водоносный субкриогенный среднекембрийский карбонатный комплекс с глубины 380 м, а вышезалегающие юрские отложения полностью промерзлые. По скважине оценены запасы подземных вод в объеме 64 м^3/сут, что было значительно меньше заявленной потребности.

В период 1990-1993 гг. проводились поисково-оценочные работы на подмерзлотные воды в различных селах Чурапчинского района (рис., табл.). В с. Маралайы скважиной глубиной 600 м под толщей ММП мощностью 415 м вскрыт субкриогенный водоносный комплекс юрских терригенных отложений и подстилающий его с глубины 490 м водоносный комплекс кембрийских карбонатных отложений. При совместном опробовании этих комплексов пьезометрический уровень подземных вод установился на глубине 192 м. Дебит скважины составил 1,47 л/с при понижении уровня 42 м, а удельный дебит скважины – 0,04 л/с·м. По химическому составу воды сульфатно-хлоридные кальциево-натриевые пресные с минерализацией 1,0 г/дм^3. В настоящее время запасы по данному водозабору оценены в количестве 90 м^3/сут по категории В.

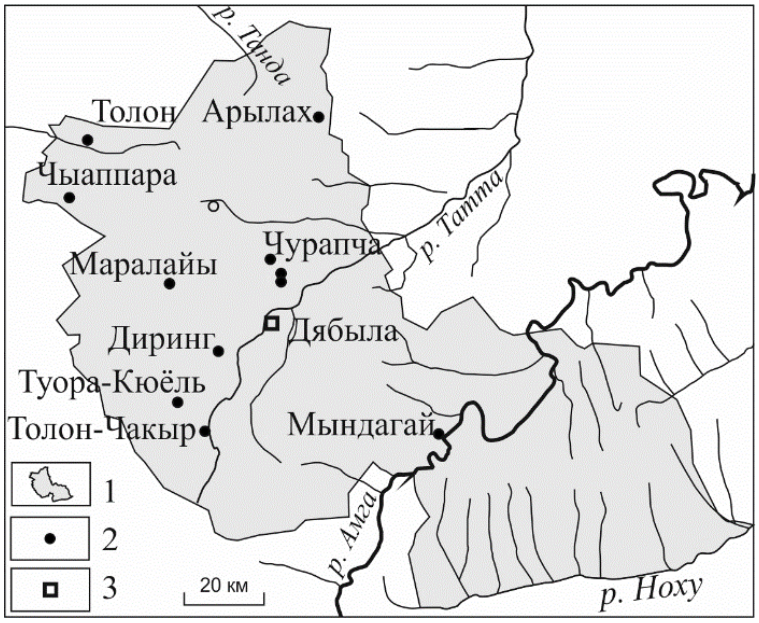


Рис. Схема расположения скважин в районе исследований: 1 – территория Чурапчинского района; 2 - гидрогеологическая скважина; 3 - скважина, не вскрывшая водоносный комплекс.

В сс. Арылах, Толон и Чыапыра скважинами был вскрыт субкриогенный юрский водоносный комплекс, а в сс. Толон-Чакыр, и Туора-Кюель – субкриогенный водоносный комплекс нижнекембрийских отложений. Из-за недостаточной изученности подмерзлотных вод их запасы на этих участках в государственном балансе не учтены.

Следующий этап гидрогеологический исследований подмерзлотных вод начался в 2012 г. с бурения гидрогеологической скважины глубиной 600,2 м в с. Чурапча. Подмерзлотные воды нижнеюрских-среднекембрийских отложений вскрыты в интервале 561-600,2 м. Водовмещающие породы представлены песчаниками и конгломератами мощностью 8 м и известняками. Дебит скважины составил 0,6 л/с при понижении уровня подземных вод 121 м. По химическому составу воды имеют смешанный состав (с преобладанием среди анионов сульфат-иона, а среди катионов – иона натрия), по величине минерализации (0,9 г/дм^3) пресные. Опытно-фильтрационные работы показали слабую обводнённость вскрытого комплекса, оцененные запасы составили 54 м^3/сут по категории В.

В 2014 г. поисковые работы проводились в с. Дябыла, в 10 км к югу от с. Чурапча. Скважина глубиной 650 м подошву многолетнемерзлых пород не вскрыла. По данным геотермических наблюдений, выполненных сотрудниками ИМЗ СО РАН, температура пород на забое составила минус 1,3 ºС [8]. По характеру геотемпературной кривой и рассчитанному геотермическому градиенту, нулевая изотерма на участке расположена на глубине 750-780 м.

Таблица. Каталог гидрогеологических скважин на подмерзлотные воды

Местоположение скважины год бурения	Абс.отм скв. / Глубина скв.	Интервал вскрытия комплекса, м	Глубина пьезометрического уровня, м / Абс. отм. уровня п.в.	Удельный дебит, л/с·м	km, $м^2$/сут	Оцененные запасы, $м^3$/сут / Категория
Водоносный субкриогенный юрский терригенный комплекс						
Арылах 1991	205,0 / 600,0	480,0-600,0	225,0 / -20,0	н/о*	н/о	не оценивались
Толон 1991	165,0 / 495,0	420,0-495,0	204,5 / -39,5	0,12	21,0	не оценивались
Чыаппара 1990	180,0 / 554,0	410,0-554,0	206,0 / -26,0	0,11	15,0	не оценивались
Водоносный субкриогенный среднекембрийский карбонатный комплекс						
Диринг 1988	208,0 / 585,0	380,0-585,0	107,4 / 106,6	0,01	0,7	64 / C_1
Толон-Чакыр 1991	228,0 / 601,0	320,0-601,0	35,0 / 193,0	0,01	3,0	не оценивались
Мындагай 1991	130,9 / 454,0	322,0-454,0	14,1 / 117,0	0,07	26,0	не оценивались
Туора-Кюель 1991	228,0 / 602,0	313,0-602,0	9,2 / 219,0	0,003	0,4	не оценивались
Водоносный субкриогенный юрско-среднекембрийский терригенно-карбонатный комплекс						
Маралайы 1993	207,0 / 600,0	415,0-600,0	192,0 / 15,0	0,04	4,3	90 / B
Чурапча 1965	170,9 / 577,0	563,6-577,0	169,3 / 1,6	0,04	0,03	не оценивались
Чурапча 1981	170,9 / 600,4	563,0-600,4	169,9 / 1,0	0,02	0,8	не оценивались
Чурапча 2012	181,0 / 600,2	561,0-600,2	169,2 / 12,0	0,01	0,9	54 / B
Чурапча 2017	181,0 / 600,0	535,0-600,0	167,2 / 14,0	0,07	33,0	267 / C_1
Дябыла 2014	183,0 / 650,0	скважина мёрзлая				

*н/о – параметр не определялся

В 2017 г. при смещении поискового участка на 2 км к северо-востоку от с. Чурапча субкриогенный водоносный комплекс юрско-среднекембрийских терригенно-карбонатных отложений был вскрыт скважиной в интервале глубин 535,0-600,0 м. Подмерзлотные воды приурочены к кварцево-полевошпатовым мелкозернистым песчаникам мощностью 11 м и окварцованным трещиноватым известнякам с прослоями доломитов, вскрытых с глубины 546 м до забоя скважины. В процессе проведения опытно-фильтрационных работ при откачке с дебитом 3,1 л/с понижение уровня воды в скважине составило 42,03 м. Подмерзлотные воды комплекса хлоридно-сульфатные, натриево-магниевые, слабосолоноватые, с минерализацией 2,4 г/л. По результатам

проведенных поисково-оценочных работ запасы подземных вод оценены по категории C_1 в объеме 267 $м^3$/сут. В настоящее время водозабор эксплуатируется для нужд населения с. Чурапча.

Таким образом, на рассматриваемой территории развиты два субкриогенный водоносных комплекса. В ее северной части под многолетнемерзлыми породами водоносными породами являются терригенные образования юры. При постановке поисково-оценочных работ на подмерзлотные воды юрского водоносного комплекса, залегающего на глубине 415-480 м, следует учитывать низкие пьезометрические уровни подмерзлотных вод, которые устанавливаются на абсолютных отметках ниже уровня мирового океана, что свидетельствует о высокой гидродинамической закрытости этого комплекса в пределах рассматриваемого района. С практической точки зрения, при эксплуатации подземных вод на этой территории необходимо учесть, что при оборудовании скважин потребуется насосное оборудование, способное понимать воду с большей глубины.

В южной части Чурапчинского района распространен водоносный субкриогенный среднекембрийский комплекс, который залегает на глубине 312-380 м под многолетнемерзлыми отложениями юры. Пьезометрические уровни подмерзлотных устанавливаются здесь близко к поверхности земли (глубина от 9-35 м до 107 м). Однако опытными откачками выявлена незначительная обводненность кембрийских карбонатных пород, позволяющая получить дебиты скважин не более 50 $м^3$ в сутки.

В центральной части рассматриваемой площади подземные воды приурочены к приподошвенной части юрских отложений и кембрийским образованиям. Водоносные породы залегают на глубине 415-563 м, а пьезометрические уровни подземных вод устанавливаются на глубинах 167-192 м. Наиболее водопроницаемые интервалы отмечены в маломощной (3-11 м) приконтактной зоне разновозрастных отложений севернее с. Чурапча. Результаты опытно-фильтрационного опробования скважин позволяют рекомендовать постановку дальнейших поисково-оценочных и разведочных работ, для обеспечения водоснабжения населенных пунктов Чурапчинского района, на участках распространения совместного субкриогенного юрского терригенного – среднекембрийского карбонатного комплекса. При этом необходимо учесть, что повышенная минерализация подмерзлотных вод для доведения их качества до соответствующих норм потребует водоподготовительных мероприятий.

Список литературы

1. Анисимова, Н.П. Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере Центральной Якутии) / Н.П. Анисимова. – М.: Наука, 1971. – 195 с.

2. Федоров, А.М. Об условиях восполнения подозерного талика в зоне действующего водозабора / А.М. Федоров, А.А. Лаврентьев // Криогидрогеологические исследования. Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1985. – С. 55-61.

3. Камалетдинов, В.А. Рельеф цоколя и строение четвертичного покрова Лено-Амгинского междуречья / В.А. Камалетдинов // Геология кайнозоя Якутии. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1982. – С. 94-103.

4. Гриненко, В.С. Геологическое строение большого Якутска / В.С. Гриненко, В.А Камалетдинов., Ю.Л. Сластенов, О.И. Щербаков // Региональная геология Якутии. Якутск, Изд-во Якутского гос. университета, 1995. – С. 3-20.

5. Геологическая карта Якутии масштаба 1:500 000, Центрально-Якутский блок / под ред. В.А. Камалетдинова, В.С. Гриненко и др. СПб.: Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2000.

6. Иванов, М.С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины / М.С. Иванов. – Новосибирск, Наука, 1984, 126 с.

7. Спектор, В.Б., Спектор В.В. О происхождении высокой Лено-Амгинской перигляциальной равнины / В.Б. Спектор, В.В. Спектор // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 4. – С. 3-12.

8. Кириллин, А.Р. Новые данные о мощности многолетнемерзлой толщи на Лено-Алданском междуречье / А.Р. Кириллин, М.Н. Железняк, В.И. Жижин // Криосфера Земли, 2022, т. 26, № 3. – С. 3-11.

IV. МИНЕРАЛЬНЫЕ, ТЕРМАЛЬНЫЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

ФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНОГО СТОКА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНОГО САЯНА

Бадминов П.С.[1], Паршин А.В.[2]
[1]*ФГБУН Институт земной коры СО РАН, Иркутск, prokop_sbad@mail.ru*
[2]*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, sarhin@geo.istu.edu*

Аннотация. В настоящей работе рассмотрены результаты применения факторного анализа как эффективного метода изучения закономерностей формирования подземного стока горно-складчатых областей на примере центральной части Восточного Саяна. Факторный анализ позволяет выявить и оценить влияние комплекса природных условий на формирование и пространственное распределение подземного стока. В результате построения факторной модели для исследуемой территории выделен один главный, три второстепенных и один несущественный фактор. Главный фактор сформирован характеристиками, выражающими условия питания (восполнения) и движения, а второстепенные условия разгрузки подземных вод. На основании карты поверхности главного фактора выделены два округа – Окинский и Присаянский. Первый охватывает высокогорную часть складчатого сооружения, второй выступ фундамента Сибирской платформы.

Ключевые слова: *подземный сток, признаковое пространство, факторные нагрузки, дисперсия, районирование территории.*

Abstract: This paper examines the results of using factor analysis as an effective method for studying the patterns of formation of underground runoff in folded mountain regions using the example of the central part of the Eastern Sayan. Factor analysis makes it possible to identify and evaluate the influence of a complex of natural conditions on the formation and spatial distribution of underground runoff. As a result of constructing a factor model for the study area, one main, three minor and one insignificant factor were identified. The main factor is formed by characteristics expressing the conditions of nutrition (replenishment) and movement, and the secondary ones with the conditions of groundwater discharge. Based on the surface map of the main factor, two districts were identified - Okinsky and Prisayansky. The first covers the high-mountainous part of the folded structure, the second protrusion of the foundation of the Siberian platform.

Key words: *underground flow, feature space, factor loads, dispersion, zoning of territory.*

Формирование подземного стока в горно-складчатых областях во многом процесс стихийный, зависящий от комплекса природных условий и выделить отдельные процессы достаточно сложно в связи с высокой степенью их динамичности. Такие системы [1] называются диффузными, в которых нельзя выделить в чистом виде процессы одной физической природы, зависящие от малого числа признаков. Для описания таких систем необходимо большое число переменных (признаков) и наиболее эффективными в этом случае являются методы многомерной статистики [2]. К разряду таких методов относятся: факторный (метод главных компонент), кластерный, регрессионный анализы и другие. Речной водосбор представляется как многопараметрическая динамическая система, в которой могут быть выделены взаимосвязанные элементы различных уровней. Он имеет выраженные границы – хребты, речную сеть через которую осуществляется взаимосвязь поверхностных и подземных вод и ряд других характеристик, являющихся его отличительными чертами. Подземный и поверхностный сток в замыкающем створе являются интегральной характеристикой взаимодействия комплекса природных факторов

Использование многомерных моделей и полученные результаты зависят от информативности признаков, используемых для построения моделей. С позиции

формирования подземных вод Монголо-Байкальского региона вся совокупность признаков разделена на четыре группы [3]. К первой группе отнесены основные параметры подземного стока (модуль подземного стока $M_{пс}$, *л/(с*км²),* среднемноголетний расход $Q_{ср.мнг.}$, $м^3/с$, коэффициент подземного стока $K_{пс}$). Вторую группу составят метеорологические признаки (количество атмосферных осадков *X мм*), третью группу - геолого-структурные (плотность тектонических нарушений $K_{тр}$, *к/км²*), четвертую группу – морфометрические и геоморфологические признаки (площадь речного водосбора *F*, *км²*, средняя высота речного бассейна $H_б$, *м*, средняя отметка продольного профиля русла $H_р$, *м*, средний уклон бассейна $I_б$, ‰, средний уклон реки $I_р$, ‰, расстояние до наиболее удаленной точки бассейна *l*, *км*, длина реки $L_р$, *км*, порядок водотока *N*, частота потоков *S*, $км^{-2}$, густота речной сети *D*, *км/км²*, мощность эрозионного среза рек $H_{вр}$, *м*, комплексный показатель расчленения рельефа *K*).

Таким образом, для построения моделей исходные данные представлены в виде матрицы объект – признак, где объектами являются 89 речных водосбора, а признаками - совокупность из 17 переменных, характеризующих условия питания, движение и разгрузки подземных вод.

Теоретическое обоснование и методика его применения при оценке и прогнозе подземного стока горно-складчатых областей достаточно подробно изложены в специальных работах [4, 5].

В основе построения факторной модели использован метод разложения информации по ортогональным составляющим (МГК). Главная идея метода заключается в математически обоснованной замене большего числа переменных, характеризующих объект исследований меньшим числом комплексных параметров-факторов [6]. Матрица признаков размером n x m (где m – число признаков, а n – число членов ряда) преобразуется в факторную матрицу axm (где a – количество факторов, причем a<m). Основная модель факторного анализа записывается в следующем виде:

$$\overline{\mathrm{X}}j = \sum_{p=1}^{k} x_{jp} \times f_p + e_j$$

Где $\overline{\mathrm{X}}j$ - нормированный исходный признак; $f_1\ f_2\ f_3\ \ldots,\ f_p$ – некоррелированные факторы; x_{jp} – нагрузка *j* – го признака на *p*-й фактор; e_j – остатки; *k* – число факторов.

Вес фактора пропорционален его вкладу в общую дисперсию, а факторные нагрузки отражают вклад каждого признака в дисперсию, приходящуюся на соответствующий фактор.

До выполнения анализа методом ГК с целью повышения устойчивости получаемых статистических оценок к случайным выбросам, ошибкам или низким пределам обнаружения, была произведена предобработка данных. Она заключалась в Z-стандартизации значений параметров путем нормирования на дисперсию, при этом в отличие от классического подхода, в качестве математического ожидания использовалось не среднее арифметическое признака, а его медиана. Матрица стандартизованных значений затем анализировалась по стандартному варианту метода главных компонент [7]. В результате были выделены пять главных факторов с суммарным вкладом 85,13% в общую дисперсию 17 исходных признаков. Распределение дисперсии по факторам неравномерно: на первый – 41,96%, на второй – 14,02%, на третий – 12,5%, на четвертый – 10,3%, на пятый – 6,35%.

Такое неравномерное распределение дисперсий признаков на главные факторы свидетельствует о наличии одного главного, трех практически равнозначных, но второстепенных и одного несущественного факторов формирования подземного стока, выделенных по «критерию каменистой осыпи» [8]. Выделением пяти общих факторов объясняется 85,13 % общей дисперсии, что вполне достаточно для дальнейших исследований (табл. 1).

Таблица 1. Матрица факторных нагрузок после вращения

Признаки	Факторы				
	1	2	3	4	5
F	-0,777	0,005	0,186	0,539	0,140
$H_б$	-0,800	0,276	-0,062	-0,460	0,116
$H_р$	-0,616	0,443	-0,103	-0,523	0,138
$I_б$	-0,171	-0,749	0,033	-0,337	0,099
$I_р$	0,679	0,031	0,206	0,079	0,540
L	-0,912	0,001	0,114	0,266	0,032
$L_р$	-0,892	0,006	0,123	0,355	0,047
N	-0,873	-0,099	0,046	-0,095	-0,145
S	0,422	-0,544	0,149	0,100	0,453
D	-0,059	-0,872	0,024	-0,226	-0,008
$H_{вр.}$	-0,912	-0,183	0,048	-0,159	0,028
K	-0,773	-0,475	0,089	-0,260	0,048
$K_{тр.}$	0,177	-0,426	-0,277	0,284	-0,620
X	0,640	-0,114	0,474	0,095	-0,031
$M_{пс}$	0,245	0,118	0,904	-0,169	-0,216
$K_{пс}$	-0,049	0,097	0,863	-0,263	-0,220
Q	-0,711	-0,050	0,321	0,550	0,101
Вклад факторов в общую дисперсию в %	41,96	14,02	12,50	10,30	6,35
Кумулятивный вклад факторов в %	41,96	55,98	68,48	78,78	85,13

Анализ матрицы факторных нагрузок показывает, что максимальные положительные нагрузки на первый фактор имеют уклон речного русла $I_р$ (r = 0,68) и количество атмосферных осадков *X* (r = 0,64), умеренные - частота речных потоков *S* (r = 0,42), слабые - модуль подземного стока *M* (r = 0,24) и коэффициент трещиноватости $K_{тр}$ (r = 0,18). Можно сделать вывод, что первый фактор сформирован характеристиками, выражающими условия питания (восполнения) и движения подземных вод. Он характеризует подземный сток как природный процесс и отражает горизонтальное расчленение рельефа, обусловленное количеством атмосферных осадков, частотой потоков и уклонами русел рек. Сильные отрицательные нагрузки имеют морфометрические признаки *F, $H_б$, L, $L_р$, N, $H_{вр}$, K*. Первые пять признаков свидетельствуют о том, что не всегда размеры бассейна и его высотное положение обеспечивают благоприятные условия питания подземных вод, а также подчеркивают роль малых водосборов. Последующие два признака связаны с вертикальным расчленением рельефа и как следствие не с условиями питания, а наоборот, с условиями разгрузки.

Второй фактор имеет положительные факторные нагрузки на признаки, отражающие высотное положение речных систем – среднюю высоту водосборов $H_б$ (r = 0,28) и среднюю высоту продольного профиля русла $H_р$ (r = 0,44). Разностная характеристика этих признаков – мощность эрозионного вреза $H_{вр}$ отражает вертикальное расчленение рельефа, следовательно, дренированность территории. Высокие отрицательные нагрузки имеют признаки *S, D*, характеризующие развитие поверхностного стока на рассматриваемой территории.

Третий фактор формируют параметры подземного стока – модуль подземного стока $M_{пс}$ (r = 0,90), коэффициент подземного стока $K_{пс}$ (r = 0,86), среднемноголетний

расход Q (r = 0,32) и количество атмосферных осадков (r = 0,47). Он характеризует условия питания и разгрузки подземных вод. Этот фактор связан со стоковыми характеристиками бассейна в целом. Положительные значения нагрузок приходится на бассейны с высокими значениями величин модуля и коэффициента подземного стока, а отрицательные с низкими значениями. Все положительные значения приурочены к склоновой части, за исключением реки Жомболок, которая расположена в краевой части Окинского плоскогорья и имеет свои исключительные особенности формирования подземного стока.

Четвертый фактор можно трактовать как гидроморфологический, так как наибольшие факторные нагрузки имеют среднемноголетний расход реки Q (r = 0,55), площадь водосбора $F_б$ (r = 0,54), длина реки $L_р$ (r = 0,36).

Пятый фактор с наименьшим вкладом в общую дисперсию, возможно, связан с большим количеством малых водосборов в наших исследованиях. Наибольшие нагрузки имеют уклон реки $I_р$ (r = 0,54) и частота потоков S (r = 0,45). Малый водосбор может содержать столько же элементарных притоков на единицу площади, как и большой. Частота потоков и уклон русла увеличиваются на более крутых склонах присущих малым водосборным бассейнам [9].

Проведем построение карты поверхности главного (первого) фактора для исследуемой территории, которая отражает наиболее существенные особенности формирования подземного стока и дает возможность отобразить изменения по территории одновременно комплекса переменных. Положительные значения первого фактора тяготеют к склоновой части исследуемой территории, которому свойственно наибольшее количество атмосферных осадков, высокая расчлененность рельефа, значительные уклоны. Эти признаки, а также отсутствие сплошного распространения многолетнемерзлых пород создают условия для формирования максимальных значений параметров подземного стока. Величины модуля подземного стока бассейнов рек склоновой части, прилегающей к Ангаро-Ленскому артезианскому бассейну значительно выше по сравнению с бассейнами рек Окинского плоскогорья, расположенного в высокогорье, к которому приурочены отрицательные значения первого фактора. Эти отклонения связаны с закрытостью территории плоскогорья от влагонесущих воздушных масс, относительно небольшими уклонами русел рек, наличием многолетнемерзлых пород и характеризуют наиболее неблагоприятные условия для формирования ресурсов подземных вод. На основании карты поверхности первого фактора в центральной части Восточного Саяна можно выделить два округа – Окинский и Присаянский. Первый охватывает высокогорную часть складчатого сооружения, второй выступ фундамента Сибирской платформы. Естественная граница между округами проходит по зоне Главного Санского разлома (рис. 1).

Факторный анализ дает возможность провести классификационные построения без использования мер сходства и разграничения группировок, а использование факторных поверхностей для районирования территории по условиям формирования подземного стока выглядит целесообразным, так как такие поверхности носят комплексный характер и отражают комбинации признаков. Первые факторные поверхности с наибольшим вкладом факторов в общую дисперсию признаков характеризуют крупномасштабные процессы, влияющие на формирование и распределение подземного стока, и могут послужить основой для выделения округов при районировании территории, а также выявить закономерности формирования подземного стока.

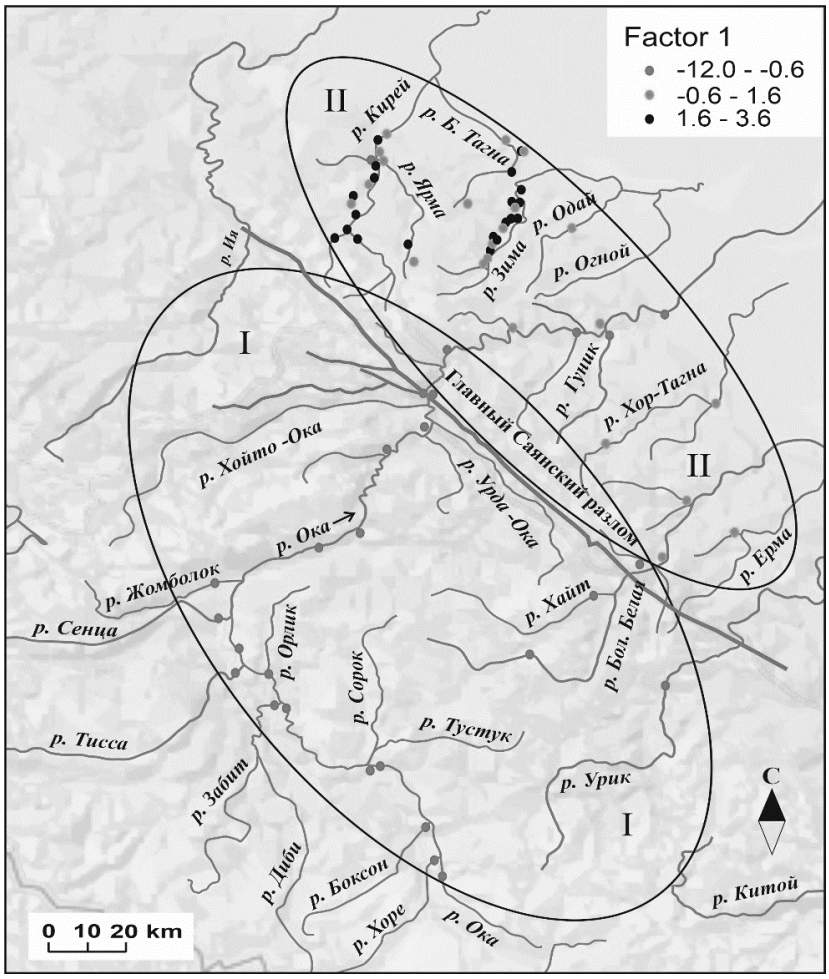


Рис. 1. Поверхность первого фактора и его значения. I – Окинский округ; II – Присаянский округ

Работа выполнена в рамках Базового проекта НИР (Гос. задание) № 0280-2021-0008 и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. Налимов В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 207 с.

2. Белонин М.Д. Факторный анализ в геологии. геологии / М.Д. Белонин, В.А. Голубева, Г.Т. Скублов – М.: Недра, 1982. – 269 с.

3. Писарский Б.И. Закономерности формирования подземного стока бассейна озера Байкал / Б.И. Писарский. – Новосибирск: Наука, 1987. – 156 с.

4. Писарский Б.И. Применение факторного анализа для районирования горноскладчатых областей по условиям формирования подземного стока / Б.И. Писарский, А.П. Хаустов // Водные ресурсы. – 1982. – № 4. – С. 68-76.

5. Хаустов А.П. Многомерный анализ гидрогеологических систем горноскладчатых областей / А.П. Хаустов. – Новосибирск: Наука. – 1986б. – 111 с.

6. Белонин М.Д. Факторный анализ в геологии / М.Д. Белонин, В.А. Голубева, Г.Т. Скублов – М.: Недра, 1982. – 269 с.

7. Наследов А.Д. IBM SPSS 20 Statistics и Амос [Текст]: профессиональный статистический анализ данных / Андрей Наследов. - Санкт-Петербург [и др.]: Питер, 2013. - 413 с.: ил., табл.; 23 см.; ISBN 978-5-496-00107-6

8. Cattell, R.B. "The Scree Test for the Number of Factors." Multivariate Behavioral Research, v.1(2), 1966. – p. 245-276.

9. Хортон Р.Е. Эрозионное строение рек и водосборных бассейнов / Р.Е. Хортон. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1948. – 159 с.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ НАЛЕДИ В ДОЛИНЕ Р. БОЛЬШОЙ ДУРАЙ (ЮЖНАЯ ЯКУТИЯ)

Баишев Н.Е.*, Огонеров В.В.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск,
**nyurgunbaishev@mail.ru*

Аннотация. В настоящей статье приводятся данные гидрохимического исследования природно-техногенной наледи, сформировавшейся на подрезанном склоне, на участке 449-450 км федеральной автодороги А-360 «Лена». В природно-техногенной наледи изменения концентрации солей, происходят за счет криогенной метаморфизации состава наледеобразующих вод, выщелачивании солей из поверхностного слоя и миграции компонентов химического состава в ее толще. Исследуемая природно-техногенная наледь растет за счет периодического выхода и замерзание источника из подрезанного склона, а также выпадением зимних твердых атмосферных осадков. Из-за последнего концентрация алюминия, титана, ванадия, железа, меди, стронция и бария в разрезе наледи разбавляется.

Ключевые слова: *природно-техногенная наледь, наледный лед, наледь, гидрохимические исследования, Южная Якутия*

Abstract. This article presents the data of a hydrochemical study of natural-technogenic aufeis formed on a clipped slope, on a section of 449-450 km of the Lena Highway. In natural-technogenic aufeis, changes in salt concentration occur due to cryogenic metamorphosis of the composition of aufeis-forming waters, leaching of salts from the surface layer and migration of mineralization components in its thickness. The studied natural-technogenic aufeis is growing due to the periodic release and freezing of the source from the clipped slope, as well as the precipitation of winter solid precipitation. Because of the latter, the concentration of aluminum, titanium, vanadium, iron, copper, strontium and barium in the natural-technogenic aufeis section is decreases.

Key words*: natural-technogenic aufeis, aufeis ice, aufeis, hydrochemical research, South Yakutia*

В криолитозоне техногенное воздействие часто приводит к перегораживанию стока поверхностных и подземных вод в результате чего могут активизироваться наледеобразовательные процессы на тех участках, где раньше наледей не было, а также трансформироваться морфометрические параметры, режимы формирования и стаивания существующих природных наледей. Такие наледи были отнесены к природно-техногенному типу [1, стр. 89; 2].

В настоящее время проблема негативного влияния наледей на линейные инженерные сооружения в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП) и глубокого сезонного промерзания остается актуальной несмотря на то, что имеется обширная методологическая база по изучению режима формирования наледей и способов борьбы с ними. В частных случаях весь объем природно-техногенных наледей (ПТН) или их часть, которые негативно влияют на инженерные сооружения, очищают спецтехникой. В этом случае организация и проведение режимных наблюдений с целью выявления источников питания ПТН, не представляется возможным. Для решения этого вопроса можно использовать анализ гидрохимических данных содержания макро- и микрокомпонентов в наледном льду [3-5]. Зная источники питания и морфометрические параметры природно-техногенных наледей, можно выбрать или разработать противоналедные сооружения и устройства.

Целью выполненных исследований являлось изучение химического состава одной из природно-техногенных наледей на федеральной автодороге А-360 «Лена».

Район исследований расположен в долине р. Большой Дурай (рис. 1А). Природно-техногенная наледь формируется на участке 449-450 км федеральной автомобильной дороги А-360 «Лена» (ФАД «Лена»). Здесь в марте 2022 г. нами наблюдался прорыв ограждающего сооружения наледными водами (рис. 1Б). 8 апреля 2022 г. наледью была покрыта половина проезжей части автодороги (рис. 1В). ПТН имела площадь 4 145 м^2

и мощность до 2 м. 7 апреля 2023 г. размеры наледи были значительно меньше (рис. 1В). Ее площадь была равна 721 кв. м, а мощность – до 1 м.

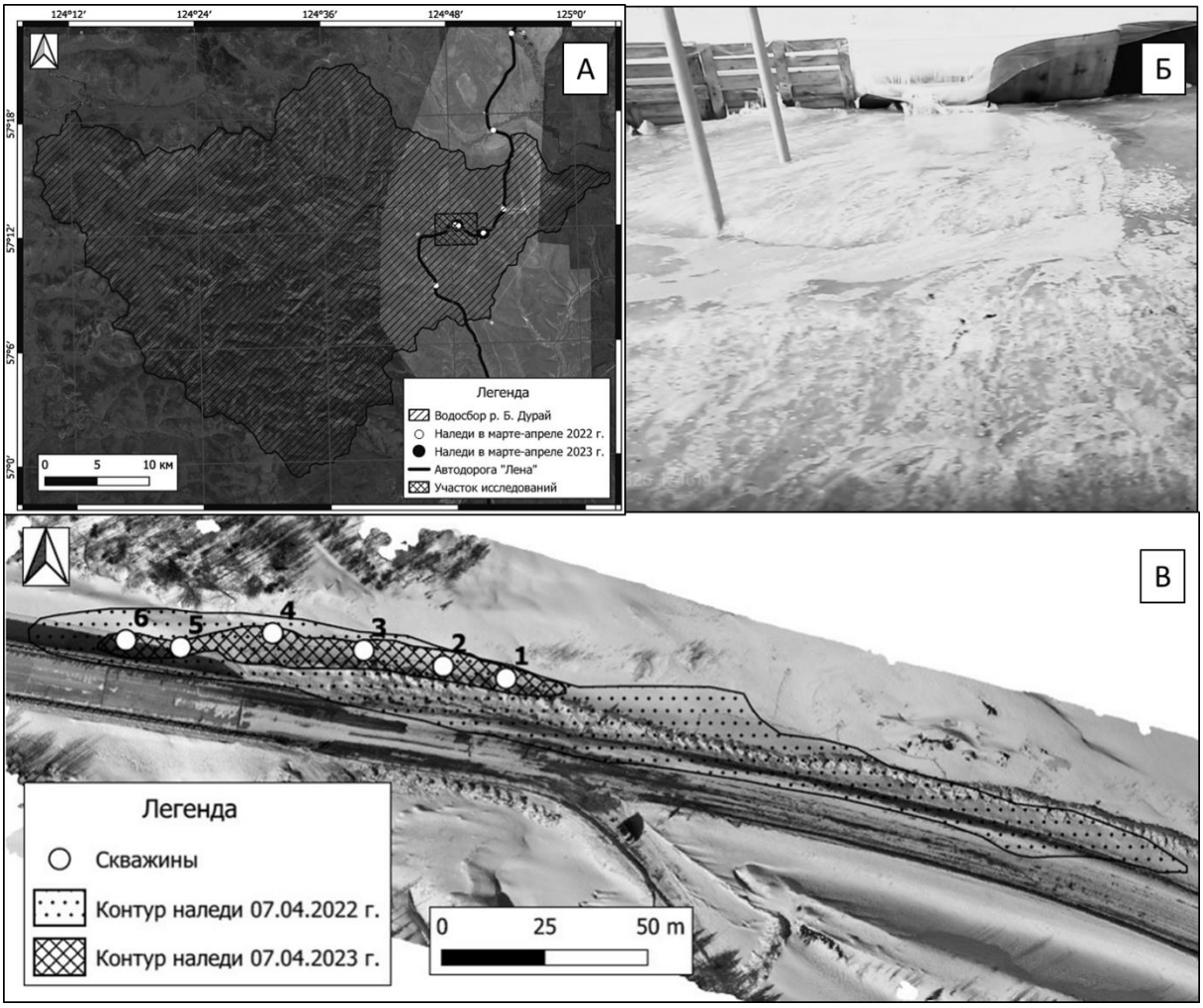


Рис. 1. А) Расположение наледных участков на автодороге «Лена» в марте-апреле 2022 г. и 2023 г. Б) Прорыв заграждающего сооружения наледными водами, фотография Баишева Н.Е. 26 марта 2022 г. В) Ортофотоплан наледного участка и расположение скважин 7 апреля 2023 г.

В июле 2022 г. были отобраны образцы воды из источника, выходящего из подрезанного склона, и атмосферных осадков. В апреле 2023 г. для определения минерализации и химического состава льда природно-техногенной наледи были пробурены 6 скважин (местоположения показаны на рис. 1В) мотобуром «Fubag» с самодельным керноотборником и отобраны 18 образцов по всему разрезу наледного льда, а также вне наледного участка был отобран образец снега. Аналитические исследования состава льда, снега и воды были выполнены в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН методами титрометрии и капиллярного электрофореза, а также в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН масс-спектральным и атомно-эмиссионным методами анализа с индуктивно связанной плазмой.

По результатам обработки данных выяснилось, что минерализация значительно различается по разрезу ПТН (рис. 2А). Такое отличие объясняется тем, что вышедшие на поверхность подземные воды растекаются вниз по наклону местности, при этом происходит частичное их замерзание. Незамерзшая часть воды приобретает более

высокую минерализацию (здесь и далее минерализация приведена по сумме минеральных веществ). Аккумуляция воды происходила на участках перегиба профиля рельефа, в местах резкого уменьшения уклона поверхности.

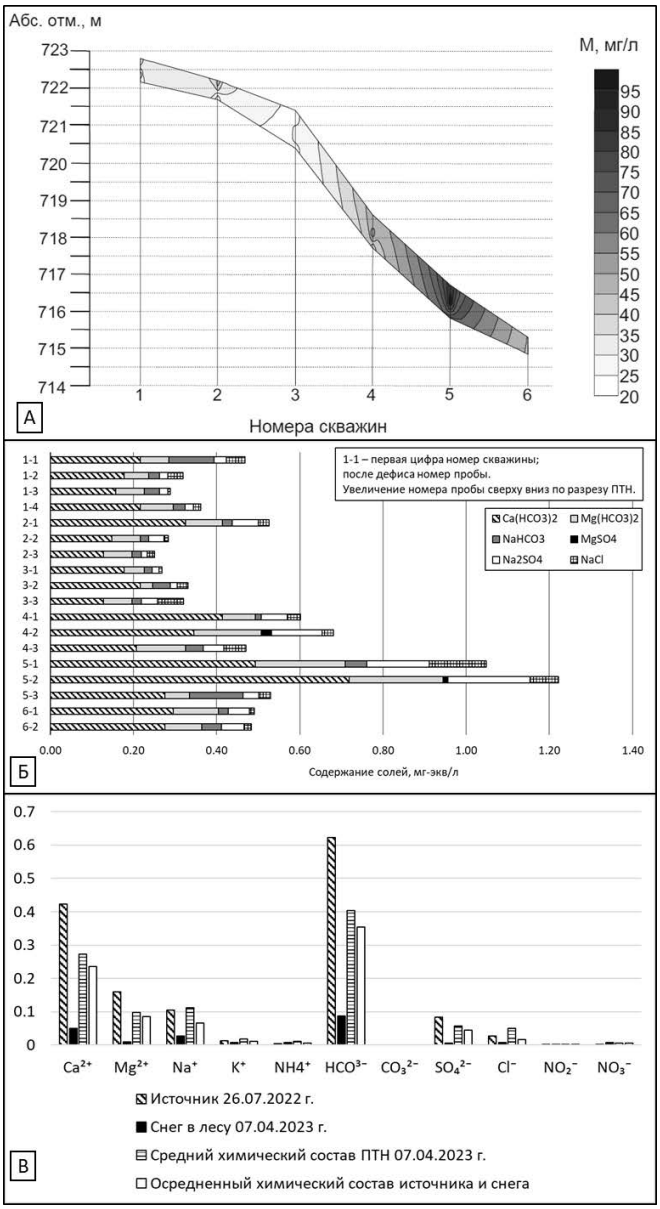


Рис. 2. Распределение минерализации (А), концентрация солей (Б) и средний химический состав льдов в толще природно-техногенной наледи (В)

Установлено, что в ПТН во всех пробах присутствуют соли $Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$, Na_2SO_4 и NaCl и их содержание изменяется 0.13-0.72, 0.03-0.23, 0.01-0.20 и 0.01-0.14 мг-экв/л соответственно. $NaHCO_3$ не содержится только в пробах 4-2 и 5-2 в количестве 0.01-0.13 мг-экв/л. В этих же пробах отмечено незначительное присутствие $MgSO_4$ – 0.02 и 0.01 мг-экв/л соответственно (рис. 2Б).

В природно-техногенной наледи изменения концентрации солей, как и в природных наледях [3-5], происходят за счет криогенной метаморфизации состава наледеобразующих вод, выщелачивании солей из поверхностного слоя ПТН и миграции компонентов минерализации в ее толще. Вдобавок содержание главных ионов в разрезе наледи разбавляется снежным покровом, участвующим в ее росте (рис. 2В).

В толще природно-техногенной наледи максимальные значение алюминия (Al), титана (Ti), ванадия (V), марганца (Mn), железа (Fe), кобальта (Co), меди (Cu), цинка (Zn),

стронция (Sr), бария (Ba) и свинца (Pb) превышают их средние содержания в подземных водах зоны свободного водообмена криолитозоны (табл. 1).

Таблица 1. Концентрация металлов в толще природно-техногенной наледи

Содержание элемента	Al	Ti	V	Mn	Fe	Co	Cu	Zn	Sr	Ba	Pb
	мкг/л										
Сумма	1987.14	44.07	5.14	275.54	3508.90	4.99	72.56	1149.34	806.89	306.65	61.03
Минимум	32.58	0.81	0.12	6.51	55.39	0.12	1.29	22.35	10.33	6.04	1.73
Максимум	231.23	5.53	0.88	23.33	361.57	0.53	6.90	112.69	154.39	35.92	3.84
Среднее	90.32	2.00	0.27	12.52	159.50	0.24	3.30	52.24	36.68	13.94	2.77
Источник	273.43	5.75	0.44	1.30	96.11	0	2.40	9.44	88.66	13.81	0.09
Снежный покров	26.79	0.84	0	4.17	26.45	0	0.97	46.65	1.64	4.36	1.30
Среднее для подземных вод [6]	216	4.09	0.64	12.7	328	0.29	2.44	22.4	20.8	9.09	1.52

Повышенное содержание Al, Ti, V, Fe, Cu, Sr и Ba в разрезе ПТН объясняется приуроченностью их к источнику питания, что свидетельствует об их взаимосвязи. Однако, в диапазонах концентраций Al, Ti, V, Fe, Cu, Sr и Ba в пробах льда наблюдается большой размах (табл. 1), вызванный их низким содержанием в снежном покрове. Причиной большого сосредоточения Mn, Co, Zn и Pb в теле наледи вызвана под загрязняющим влиянием сильного потока автотранспортных средств.

Таким образом, химический состав природно-техногенной наледи наследует состав подземных вод, разгружающихся в долине р. Б. Дурай, и разбавлением за счет снежным покровом. Вдобавок к этому в теле наледи концентрируются тяжелые металлы под влиянием автотранспорта.

Список литературы

1. Якутия: Природа. История. Этнография. Современность: историко-культурный атлас / Правительство Респ. Саха (Якутия), Ин-т гуманитар. исслед. АН Респ. Саха (Якутия); отв. ред. И.Ю. Стрикалов, Е.В. Корниенко, Т.Л. Демидова. – Москва: Изд-во «Феория», «Дизайн. Информация. Картография», 2007. – 869 с.

2. Иванова, Л.Д. Формирование техногенных наледей на линейных сооружениях в пределах Приленского плато / Л.Д. Иванова, В.В. Самсонова // Сергеевские чтения. Вып. 21. Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрологии. – Пермь, 2019. – с. 423-427.

3. Анисимова, Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны / Анисимова Н.П.; отв. ред. П.И. Мельников; Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения. – Новосибирск: Изд-во. «Наука», 1981. – 153 с.

4. Иванов, А.В. Гидрогеохимические процессы при наледеобразовании / А.В. Иванов; отв. ред. А.Ф. Мандыч; Акад. наук СССР, Дальневост. науч. центр, Хабаров. комплекс. НИИ. – Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1983. – 108 с.

5. Анисимова, Н.П. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / Н.П. Анисимова, Н.А. Павлова; отв. ред. В.В. Шепелёв; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. – 189 с.

6. Shvartsev, S.L. Geochemistry of Fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth / S.L. Shvartsev // Geochemistry International, 2008, Vol. 46, No 13, pp. 1285-1398.

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ДЖЕТИ-ОГУЗ (ИССЫК-КУЛЬСКИЙ АРТЕЗИАНСКИЙ БАССЕЙН)

Барановская Е.И.[1], Харитонова Н.А.[2], Челноков Г.А.[3]
[1, 2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, baranovskaya_kat@mail.ru
[3]Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются гидрогеохимические особенности минеральных вод месторождения Джети-Огуз, расположенного в юго-восточной части Иссык-Кульского артезианского бассейна. Формирование и распространение минеральных вод широкого спектра физико-химических особенностей обуславливается геолого-тектонической обстановкой региона исследований. В основу работы легли результаты полевых исследований, проведенных на территории Иссык-Кульской области Республики Киргизия в июне 2023 года. Представлены современные данные по химическому и изотопному составу минеральных вод месторождения Джети-Огуз.

***Ключевые слова**: минеральные воды, гидрогеохимические условия, Иссык-Куль, изотопный состав, химический состав*

Abstract. The article discusses the hydrogeochemical features of the mineral waters of the Jeti-Oguz field, located in the southeastern part of the Issyk-Kul artesian basin. The formation and distribution of mineral waters of a wide range of physico-chemical features is determined by the geological and tectonic condition of the research region. The work is based on the results of field research conducted in the Issyk-Kul region of the Republic of Kyrgyzstan in June 2023. New data on the chemical and isotopic composition of the mineral waters of the Jeti-Oguz field are presented.

***Key words**: mineral waters, hydrogeochemical conditions, Issyk-Kul, isotopic composition, chemical composition*

На территории Иссык-Кульского артезианского бассейна выявлено множество типов минеральных вод с различной температурой, минерализацией, специфическими компонентами, используемых в бальнеологии для ванн и для лечебно-питьевых целей. Широкую известность приобрели практически не имеющие аналогов радоновые термы месторождения Джети-Огуз, расположенные в юго-восточной части бассейна.

В гидрогеологическом отношении Иссык-Кульская межгорная впадина представляет собой артезианский бассейн с пластовыми водами в осадочных породах мезо-кайнозоя и с трещинно-жильными водами в основании [Иванов, 1974].

Иссык-Кульский артезианский бассейн характеризуется трехэтажным строением. Осадочный чехол представлен галечником, песком, глиной и полускальными сцементированными обломочными породами типа конгломератов, песчаников, аргиллитов и алевролитов. Максимальная мощность осадочного чехла Иссык-Кульского артезианского бассейна в восточной части достигает 5 км. Верхний этаж представлен четвертичными отложениями, мощностью до 200-500 м; второй этаж сложен палеоген-неогеновыми и юрскими отложениями; нижний этаж (фундамент) представлен палеозойскими и докембрийскими трещиноватыми породами, информация о которых практически отсутствует [Гидрогеология СССР, 1971].

Границы бассейна совпадают с водоразделами поверхностного и подземного стока Терскейского - южного и Кюнгейского - северного хребтов, а также проходят по перевалу Санташ на востоке и Караташскому порогу на западе.

Исследуемая территория осложнена множеством региональных и локальных разрывных нарушений разного порядка, вероятно, являющихся источниками поступления глубинных флюидов [Матыченков, 1987].

Месторождение минеральных вод Джети-Огуз расположено в юго-восточной части Иссык-Кульского артезианского бассейна, на высоте около 2100 абс. м. в предгорьях хребта Терскей-Ала-Тоо. Минеральные воды месторождения Джети-Огуз

широко используются в бальнеологии, в лечебно-питьевых целях и пользуются большой популярностью у местного населения с давних времен. В ущелье на высоте 2100-2200 м расположен одноименный действующий курорт Джеты-Огуз, где для лечения используются радоновые термальные воды двух типов: хлоридного кальциево-натриевого и сульфатно-хлоридного кальциево-натриевого состава.

Месторождение минеральных вод по своим гидрогеологическим и гидрогеохимическим условиям является уникальным, в связи с тем, что температура, минерализация, содержание специфических компонентов существенно изменяются в плане и разрезе на сравнительно небольшом участке.

В основу работы легли результаты полевых исследований, проведенных на территории Иссык-Кульской области Республики Киргизия в июне 2023 года. Были отобраны пробы поверхностных (ручей, озеро) и подземных вод, а также атмосферных осадков. Отобранные воды были детально исследованы и определен их химический состав, выявлены содержания стабильных изотопов кислорода и водорода.

В 30 км. от курорта Джети-Огуз расположено глубоководное бессточное озеро Иссык-Куль, представляющее собой котловину, вытянутую в широтном направлении. Максимальная глубина озера Иссык-Куль составляет 668 м, при средней глубине 278 м [Матыченков, 1987]. Минерализация воды озера Иссык-Куль по данным опробований авторов в 2023 г. составила 5,7 г/л. По химическому типу вода озера характеризуется Cl-SO_4-Na-Mg типом. По соотношению катионов (преобладание Na, Mg) вода озера Иссык-Куль соответствует океанической, по преобладанию анионов (Cl, SO_4) ближе к водам материковых озер [Матыченков, 1987]. Основным источником питания озера являются реки, формирующиеся в высокогорной гляциальной зоне.

Гидрографическая сеть исследуемой территории представлена одноименной рекой Джети-Огуз и ее притоками. По данным, полученным авторами в результате полевых исследований в 2023 г., воды ручья в пределах курорта Джети-Огуз характеризуются минерализацией около 0,2 г/л, Cl-HCO_3-Ca-Na типом и температурой около 14 °С.

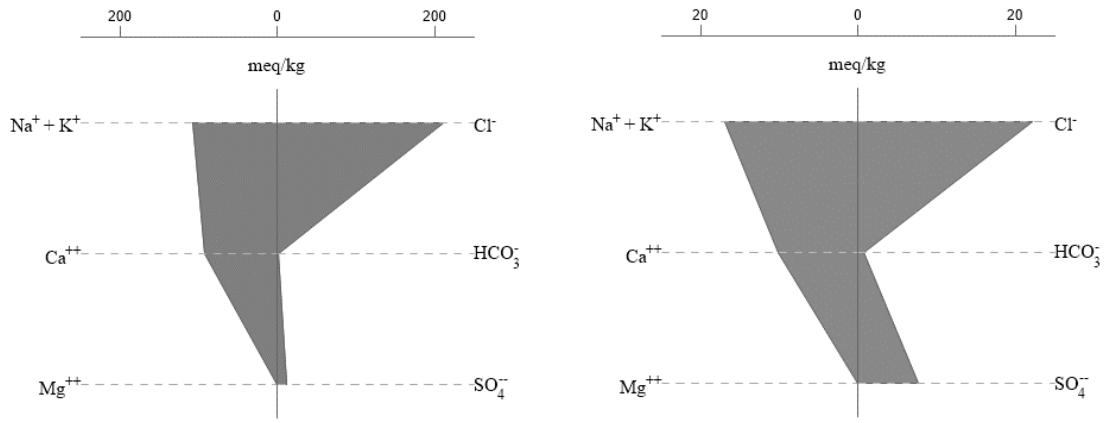
В геолого-структурном отношении исследуемый район расположен в зоне сочленения юго-восточной части Иссык-Кульской впадины с антиклинорием хр. Терскей-Ала-Тоо. Территория характеризуется интенсивно расчлененным рельефом. Максимальные абсолютные высоты местности достигают отметок 4500-5000 м. [Васильева, 1961].

Джети-Огузские минеральные воды связаны с брахиоантиклинальной складкой, ядро которой сложено протерозойскими метаморфическими и изверженными породами, представленные гранитами и сланцами. На крыльях складки залегают известняки, песчаники и алевролиты карбона, конгломераты юры и палеогеново-неогеновые песчано-глинистые образования [Катаева, 1969; Васильева, 1961].

По результатам исследований минеральные воды Джети-Огузского месторождения были разделены на две группы (рис. 1):

Первая группа вод представляет собой холодные (18,0°С), слабощелочные (pH = 8,5), слабоминерализованные (до 2,0 г/л) воды сульфатно-хлоридного кальциево-натриевого состава, приуроченные к метаморфическим породам.

Ко второй группе нами отнесены высокоминерализованные воды (12,5 г/л) с температурой около 32,0°С, хлоридным кальциево-натриевым составом, приуроченные к аллювию и известнякам карбона.



а) б)

Рис. 1. Химический состав исследованных минеральных вод месторождения Джети-Огуз: а) горячие высокоминерализованные воды; б) холодные слабоминерализованные воды

Помимо основных макрокомпонентов химического состава в минеральных водах Джети-Огузского месторождения в небольших количествах содержится бор, стронций, бром, йод и т.д., концентрация которых уменьшается при уменьшении минерализации. При этом, наибольшие концентрации фтора (6,3 мг/л) зафиксированы в водах, характеризующихся наименьшей минерализацией (0,5 г/л).

Газовый состав исследуемых минеральных вод характеризуется преобладанием азота (от 97 до 100 об. %), в небольших количествах присутствует углекислота, метан, редкие газы.

Биологически активным компонентом в минеральных водах Джети-Огузского месторождения является радон. Концентрация радона в исследуемых водах характеризуется широким диапазоном значений и изменяется от 18 до 500 ед. Махе. Наибольшие концентрации радона зафиксированы в высокоминерализованных термальных водах [Васильева, 1961; Катаева, 1969].

Геолого-тектонические условия и сложное гидрогеологическое строение района исследований обуславливают разнообразие термоминеральных вод.

***Финансирование**. Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 23-27-00119 «Генезис и условия циркуляции термальных вод кристаллических массивов горноскладчатых областей»).*

Список литературы

1. Васильева В.Н. Особенности формирования Джети-Огузских радиоактивных терм, М. 1961.

2. Гидрогеология СССР. Киргизская ССР. Том 40. М., Недра, 1971.

3. Катаева Н.И. Подземные минеральные воды Киргизской ССР / Н.И. Катаева, З.И. Мельникова, Р.Д. Барсуцкая и др.; М-во здравоохранения Кирг. ССР. Науч.-исслед. ин-т курортологии и физиотерапии. - Фрунзе: Кыргызстан, 1969. - 142 с.

4. Матыченков В.Е., Иманкулов Б.И. Минеральные воды Киргизии. – Фрунзе: Илим. 1987. – 251 с.

5. Минеральные воды СССР: Пояснит. записка к карте минер. вод СССР масштаба 1:4 000 000 / [Гл. ред. В.В. Иванов]; М-во здрав. СССР. ЦНИИ курортологии и физиотерапии. - Москва: Б. и., 1974. - 324 с.

РАДОН В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

Бородулина Г.С.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, bor6805@yandex.ru

Аннотация. В статье отражены результаты исследований содержания радона в подземных водах на территории Карелии. Дана характеристика гидрогеологических условий региона. Показано, что радоновые воды широко распространены на щите, в 30% источников содержание радона превышает 60 Бк/л. Высокие (до тысяч Бк/л) концентрации радона в водах приурочены к зонам тектонических нарушений в условиях более высокого эманирования пород и повышенного содержания урано-радиевой минерализации. На Кондокском участке Костомукшского железорудного района оценены запасы минеральных радоновых вод для использования их в бальнеологических целях.

***Ключевые слова**: подземные воды, радон, кристаллические породы, эманирование*

Abstract. The article shows the results of studies of radon content in groundwater in Karelia. The characteristics of the hydrogeological conditions of the region are given. It has been shown that radon waters are widespread on the shield; in 30% of sources the radon content exceeds 60 Bq/l. High (up to thousands of Bq/l) concentrations of radon in waters are confined to zones of tectonic disturbances in conditions of higher emanation of rocks and increased content of uranium-radium mineralization. In the Kondoksky area of the Kostomuksha iron ore district, reserves of mineral radon waters have been estimated for use for balneological purposes.

***Key words**; groundwater, radon, crystalline rocks, emanation*

С 70-х годов прошлого века проблема радона занимает центральное место в национальных радиоэкологических программах многих стран мира, поскольку радон в питьевой воде представляет наибольшую опасность из всех радионуклидов. Так в Финляндии, где доля подземных вод в водопотреблении достигает 70 %, установлено, что вклад ^{222}Rn в общую эффективную дозу облучения составляет 60-75 % природной радиоактивности используемых подземных вод [1, 2]. В Финляндии самые высокие содержания радона (до 77,5 кБк/л) и урана (до 12,4 мг/л) установлены в южных гранитных провинциях [3, 4]. В 1995 г. в результате районирования территории России по степени потенциальной радоноопасности [5] территория Карелии отнесена к потенциально опасной. Геологическими признаками считаются: присутствие радона в подземных водах, выходы радоновых источников на поверхность, а также развитие горных пород с повышенным содержанием урана и радия [6, 7]. Изучение радиоактивности подземных вод Карелии началось в середине прошлого века при поисках радиоактивного сырья и в целях бальнеологии. В соответствии со схемой районирования минеральных вод России Карелия относится к Балтийской области Восточно-Европейской провинции радоновых кислородно-азотных вод массивов кислых кристаллических пород архей-протерозоя [8]. Проявления радоновых вод Карелии (Хапунваара, Проланваара, Мраморная Гора, Карташи, Койкары, Тереки, Песчаное) упоминаются в немногочисленных публикациях [9, 10, 11, 12]. В 2009 г. на месторождении «Кондокское» (район г. Костомукша) оценены запасы лечебных радоновых вод.

Цель настоящей работы – обобщение результатов исследований и характеристика радиоактивности подземных вод Карелии.

С 1980-х годов гидрогеохимические исследования, проводимые Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН, сопровождались определением содержания растворенного в воде радона. Измерения объемной активности ^{222}Rn в воде в первые годы производились на полевом эманометре "Радон", позже на радиометре альфа-активных газов РГА-01 (сцинтилляционный детектор). Предел относительной погрешности (P=0.95) в диапазоне ОА радона-222 от $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^9$ Бк/м^3 не более 30 %. С 2020 г. измерения выполняются измерительным комплексом "Альфарад плюс". За весь период

исследований на территории Карелии выполнено более 4000 измерений ^{222}Rn в воде 1620 подземных источников (разведочные и эксплуатационные скважины, родники, колодцы).

Карельский регион является юго-восточной частью Фенноскандинавского (Балтийского) щита. В строении щита участвуют в различной степени дислоцированные и метаморфизованные породы докембрия и осадки четвертичного возраста, на юге и юго-востоке региона примыкают осадочные отложения Русской платформы. В целом докембрийские кристаллические породы Карелии отличаются более низким содержанием урана и тория по сравнению с одновозрастными породами других кристаллических щитов и массивов [13]. Это подтверждается величиной общей радиоактивности пород, так юго-восточная часть щита в целом характеризуется достаточно низкими (5-10 мкр/ч) значениями фоновой суммарной радиоактивности. Вместе с тем в разных частях региона, в первую очередь в юго-западной, центральной и северной Карелии, по радиогеохимическим и радиометрическим данным выделяются площади с повышенным фоновым содержанием радиоактивных элементов (РЭ). Эти площади приурочены к линейным зонам, представленных системами разломов, которые контролируют размещение основной массы (90% всех известных) радиоактивных пород разного состава с содержанием РЭ свыше двух кларков концентрации. Среди них преобладают гранитоиды с акцессорной вкрапленностью монацита, циркона, уранинита, торита, а также кремнещелочные и щелочные метасоматиты, образующие ориентированные вдоль разломов тела площадью до 20 км^2. Наиболее характерны и широко развиты в регионе граниты верхнеархейского комплекса со средним содержанием урана 3.9-5.8 г/т, тория 18-30 г/т, а также связанные с ними кварц-полевошпатовые метасоматиты (уран 5.5-10.5 г/т, торий 27.5-34.5 г/т) [13]. В пределах Карельской урановой провинции выявлено 8 мелких месторождений урана, свыше 200 рудопроявлений и несколько тысяч точек радиоактивной минерализации [14].

Гидрогеологические условия подавляющей части территории Карелии характеризуются развитием единого водоносного комплекса, приуроченного к верхней трещиноватой зоне кристаллического массива и рыхлым четвертичным отложениям. На юге и юго-востоке небольшие площади относятся к окраинам артезианских бассейнов Русской платформы. Четвертичный покров Карелии имеет крайне неоднородное строение. Мощность отложений в среднем не превышает 10 м, на отдельных участках увеличивается до 30-150 м.

Трещинные воды приурочены к зоне региональной трещиноватости, мощность которой составляет 30-50 м. Ниже этой зоны породы практически безводные. Только в зонах тектонических нарушений глубина распространения обводненных трещин увеличивается и может достигать 150-250 м. Наиболее часто (45 % всех скважин) удельный дебит составляет 0,1-0,01 л/с. Единичные скважины имеют удельный дебит более 1 л/с [10].

Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков. Разгрузка происходит в реки, озера и болота. Подземные воды на кристаллическом щите, как правило, безнапорные, и только в местах, где в разрезе четвертичного покрова присутствуют глинистые слои, воды приобретают напор. Повсеместно напорными являются воды осадочного комплекса Русской платформы.

Подземные воды характеризуются в целом невысокой минерализацией (в среднем 0,3 г/л). В соответствии с уменьшением интенсивности водообмена выявляется региональная вертикальная и горизонтальная зональность, определяющая увеличение минерализации подземных вод с глубиной и по мере уменьшения степени расчлененности рельефа. При этом гидрокарбонатные кальциево-магниевые воды верхней зоны сменяются на гидрокарбонатно-хлоридные натриевые воды зоны замедленного водообмена. Солоноватые воды хлоридно-натриевого состава характерны для осадочных комплексов Ленинградского артезианского бассейна. Отдельными скважинами вскрываются солоноватые воды в пределах Онежской палеоструктуры [15].

Концентрации урана в исследованных 450 пробах подземной воды изменяются в широких пределах: в 10% проб - ниже 0,01 мкг/л, медиана 0,1 мкг/л, в 5 % проб концентрация урана превышает 10 мкг/л. Максимальная концентрация урана (0,3 мг/л) зафиксирована в подземной воде на восточном побережье Онежского озера (Песчаное). На уран-ванадиевом месторождении Средняя Падма содержание урана в подземных водах составляет 20-188 мкг/л. Здесь формируются щелочные (pH 8.6-9.8) кислородсодержащие воды, в которых уран мигрирует в форме карбонатных комплексов $UO_2(CO_3)_3^{-4}$ [12].

Радий в подземных водах Карелии присутствует как правило в количестве менее $3 \cdot 10^{-13}$ г/л, несколько повышенная концентрация установлена в радоновых водах $(9\text{-}24) \cdot 10^{-13}$ г/л. Коэффициент корреляции радия и радона равен 0,45, связь радона и урана отсутствует [10].

В подземных водах региона радон определяется в широком диапазоне - от первых единиц до тысяч Бк/л (рис. 1). Одна из скважин на уран-ванадиевом месторождении показала ураганное содержание радона 113 кБк/л, что уступает лишь максимальной величине из когда-либо опубликованных данных по Европе концентрации 182 кБк/л, зафиксированной в роднике Восточной Германии [16]. В водах родников и колодцев Карелии медианная концентрация радона составляет 16-26 Бк/л, хотя встречаются родники с очень высокими содержаниями радона - до 2200-6400 Бк/л. Вода из скважин в коренных породах в среднем в большей степени обогащена радоном (табл. 1). Содержание радона более 60 Бк/л встречается в 30 % водопунктов (рис. 1). В Финляндии зафиксирована максимальное содержание радона 77 500 Бк/л, медианная концентрация по исследованиям более чем 4000 скважин составляет 230 Бк/л, в водах из рыхлых отложений 22 Бк/л [4].

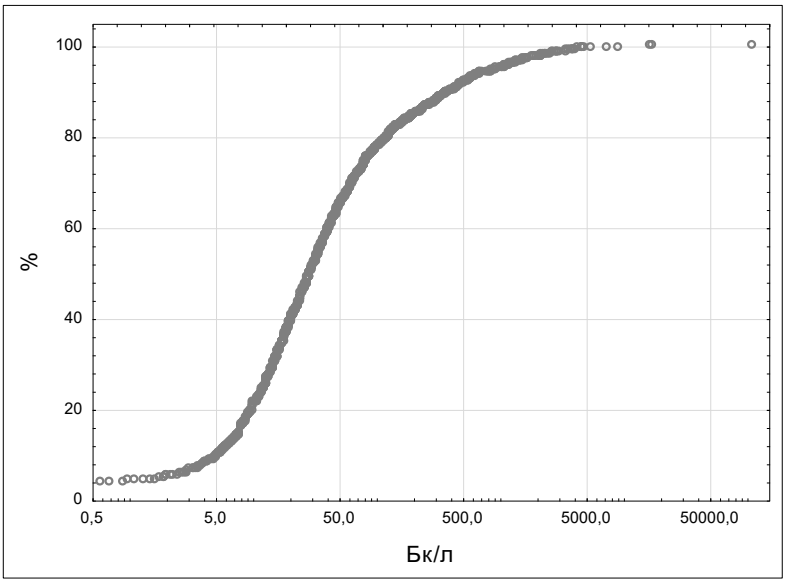


Рис. 1. Кумулятивная кривая распределения концентраций радона в подземных водах Карелии.

Таблица 1. Распределение концентраций радона (Бк/л) в подземных водах Карелии

Водопункт	Количество проб	25%	median	75%	max
Родники	500	11	**26**	62	6400
Колодцы	324	9	**16**	31	700
Скважины в песчаных отложениях	106	13	**24**	38	145
Скважины в коренных породах	690	23	**60**	207	113000
Все	1620	13	**30**	83	113000

Высокие концентрации радона встречаются в водах различного состава и минерализации. Известны высокорадоновые воды как очень низкой минерализации (0,03-0,06 г/л), так и солоноватые (до 3,3 г/л).

Так как радон является продуктом распада радия, следует отметить, что в сульфатных водах радий не мигрирует, образуя труднорастворимые соединения. Поэтому в породах, обогащенных сульфидами, даже при полном выносе урана радий остается на месте, и в водах сульфатного типа, формирующихся в зонах окисления сульфидов, отмечается самая высокая медианная концентрация радона, в отличие от гелия, содержание которого в этих зонах минимально. Гелий – радиогенный газ - является индикатором скрытых глубинных разломов, проницаемых нарушений в земной коре. Максимальные содержания гелия на 2-3 порядка превышают равновесную с атмосферой концентрацию гелия ($5 \cdot 10^{-5}$ мл/л) в водах повышенной минерализации хлоридно-натриевого или гидрокарбонатно-хлоридного натриевого состава, генезис которых связан с поступление глубинных вод по мобильным разломам [17].

Радоновые воды Балтийского щита представляют собой довольно распространенный тип радиоактивных вод, которые традиционно выделяются в подтип радоновых вод тектонических трещин и зон дробления кислых магматических пород [18]. Но в зоне выветривания таких пород очень редко встречаются средне- и высокорадоновые воды [9]. Наиболее высокие содержания радионуклидов приурочены к зонам гидротермального и вторичного изменения пород, которые наиболее интенсивно проявляются в местах тектонических нарушений, в разломах, в зонах сопряжения интрузивного и метаморфического комплексов, в пределах зон дробления, т.е в условиях более высокого эманирования пород и повышенного содержания урано-радиевой минерализации в породах. Установлено, что в случае сорбции радия на тонкодисперсном веществе, коэффициенты эманирования могут достигать очень высоких значений (70-80%) [19].

Характерной особенностью радоновых вод Балтийского щита является отчетливая связь с составом и степенью разрушенности пород, по которым вода циркулирует. Эта закономерность подтверждается геологическими и геофизическими данными, полученными на Кондокском месторождении радоновых вод в пределах Костомукшского железорудного района. Здесь группа источников с высокими концентрациями радона (до 6400 Бк/л) располагается на участке сочленения гнейсо-гранитов и мигматизированных сланцев, где выявлены самые значительные аномалии по активности пород (до 108-256 мкр/час) и содержанию в них радиоактивных элементов (урана 10 г/т и тория 310 г/т). Родники и мочажины с радоновой водой здесь расположены вдоль зоны повышенной трещиноватости, связанной с наиболее характерным нарушением на Кондокском участке – надвигу палеомикроклиновых гнейсо-гранитов на осадочно-вулканогенные породы контокской и гимольской серий. Зона повышенной трещиноватости шириной 10-20 м, глубиной около 30 м подтверждается аномалиями магнитного поля и потенциала естественного электрического поля. Участки дробления пород, с которыми связаны изменения гидротермального и метасоматического характера (зоны эпидотизации, березитизации, осветления), являются эманирующими коллекторами. Такие зоны вторичного концентрирования радия могут являться источником высоких концентраций радона при ничтожных содержаниях в воде урана и радия. Так активность естественных радиоактивных элементов в подземных водах Кондокского месторождения невелика и составляет (Бк/кг): U <3,0, Ra 0,4-1,8, Th <0,6.

Важным фактором является время соприкосновения воды с породой, которое зависит от скорости движения подземных вод, поэтому наиболее активные воды обладают обычно малым дебитом [18]. Анализ геологических условий Кондокского участка показывает, что активные породы, вероятнее всего, не имеют больших размеров,

обеспечивающих достаточное время соприкосновение воды с породой, поэтому небольшая скорость движения подземных вод на участке при прочих равных условиях становится определяющим фактором в формировании радоновых вод высокой концентрации. Стабильность содержания радона при опытных откачках из эксплуатационного колодца и незначительные колебания концентраций в годовом цикле (3200-4800 Бк/л) указывают на близкое положение активной породы к очагу разгрузки подземных вод. Содержание радона соответствует лечебным радоновым водам средней концентрации, поэтому в начале 2000-х г.г. здесь были оценены запасы минеральных радоновых вод для использования их в бальнеологических целях на базе городской больницы г.Костомукша. Высокое содержание полезного компонента позволяет доставлять радоновую воду из каптированного источника к потребителю за 11 км. Следует отметить, что Кодокское месторождение лечебных радоновых вод является единственным эксплуатируемым месторождением на Северо-Западе России, хотя в Карелии имеются все предпосылки для более широкого использования радоновых подземных вод.

Список литературы

1. Asikainen, M. Natural radioactivity of ground water and drinking water in Finland: STL-A39 / Asikainen M.- Helsinki: Institute of Radiation Protection, 1982. - 65 p.

2. Vesterbacka, P. Intercomparison of Rn-222 determination from groundwater /Vesterbacka, P.; Pettersson, H.; Hanste, U.-M.; Jakobson, E.; Kolstad, T.; Roos, Per; Östergren, I. //Applied Radiation and Isotopes, 2010. - V. 68 (1), - P. 214-218.

3. Asikainen, M. Anomalously high concentrations of uranium, radium and radon in water from drilled wells in the Helsinki region /Asikainen, M. & Kahlos, H. //Geochim. Cosmochim. Acta, - 1979. - 43, - P. 1681-1686.

4. Salonen, L. 238U series radionuclides as a source of increased radioactivity in groundwater originating from Finnish bedrock / Salonen L. //Future Groundwater Resources at Risk: Proceedings of the Helsinki Conference. IAHS Publ. - 1994. -. No 222. - P. 71-84

5. Максимовский, В. А., Районирование территории России по степени радоноопасности /Максимовский В. А., Харламов М. Г., Мальцев А. В. Лучин И.А., Смыслов А.А. //АНРИ. - 1996/1997. - № 3(9). - С. 66-73.

6. Смыслов, А.А. Радон в земной коре и риск радоноопасности / Смыслов А.А., Максимовский В.А., Харламов М.Г. и др // Разведка и охрана недр. - 1994. - № 4. - С. 25-27.

7. Савицкий, А.И. Радиационно–гигиеническая оценка строительных материалов с учетом радоноопасности /Савицкий А.И., Бархатов А.В. //Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических материалов: сб. науч. работ - Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2005. - С.172-175.

8. Куликов, Г.В Районирование минеральных вод СССР /Куликов Г.В., Адилов В.Б., Жевлаков Ф.В. // Бюлл. МОИП, отд-ние геол. - 1987. - т. 62. - вып.3. - С.100-105.

9. Куликов, Г.В. Минеральные лечебные воды СССР: справочник /Куликов Г.В., Жевлаков А.В., Бондаренко С.С. - М.: Недра, 1991. - 399 с.

10. Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии /А.В.Иешина, И.К.Поленов и др. - Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1987. - 151 с.

11. Ручьева Н.П., Голованов Ю.Б. Подземные воды и лечебные грязи /Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн.2. - Петрозаводск: Карелия, 2006. - С. 243-264.

12. Бородулина, Г.С. Физико-химическое моделирование состава природных вод уран-ванадиевого месторождения / Бородулина, Г.С., Мазухина С.И //Геоэкология. - 2002. - №6. - С. 490-499.

13. Савицкий, А.В. Уран, торий, калий в горных породах Карелии и вопросы радиоэкологии / Савицкий А.В., Титов В.К., Мельников В.К. //Геология и охрана недр Карелии: сб. науч. работ - Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 1992. - С. 99-113.

14. Металлогения Карелии / Рыбаков С.И., Голубев А.И. и др. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. - 340 с.

15. Бородулина, Г.С. Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии /Бородулина Г.С., Левичев М.А. // Горный журнал. - 2019. - № 3, - С. 71–75.

16. Genser, C. Über die Entstehung und die Natur radioaktiver Quellen / Genser, C. //Geol. Rdsch., 1932. - 23. - S. 188-237.

17. Бородулина, Г.С. Связь аномалий гелия в подземных водах Карелии с тектоническими зонами /Бородулина Г.С., Богачев М.А. // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: сб. науч. работ - Петрозаводск: Карельский научный центр. 2008. - С.62-63.

18. Токарев, А.Н. Основные закономерности формирования природных радиоактивных вод / Токарев А.Н. // Тр. ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии. - 1975. - Вып. 89. - С. 88-89.
19. Sasaki, T. Theoretical Study of High Radon Emanation /Sasaki T., Gunji Y. and Okuda T. // J. of Nuclear Science and Technology. - 2005. - V. 42. - No 2. - P. 242–249.

ГИДРОГЕОХИМИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В БАССЕЙНАХ РЕК КЕМПЕНДЯЙ И КЮНДЯЕ (ЯКУТИЯ)

Вах Е.А.[1], Паничев А.М.[2], Ветошкина А.В.[1].
[1] *Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Adasea@mail.ru.*
[2] *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, sikhote@mail.ru.*

Аннотация. Проведены исследования в бассейнах рек Кемпендяй и Кюндяе на территории Якутии, с целью изучения гидрогеохимии вод и определения содержания редкоземельных элементов (РЗЭ), для уникальных мерзлотно-таежных ландшафтов с многочисленными солепроявлениями. Воды мелких ручьев и рек слабоминерализованные, преимущественно гидрокарбонатно-кальциевого состава. В составе родниковых вод, встречаются сильно минерализованные хлоридно-натриевые с повышенным, относительно регионального и общемирового фона, содержанием REE, особенно тяжелой подгруппы.
Ключевые слова: *р. Кемпендяй, Якутия, гидрогеохимия, минеральные вода, редкоземельные элементы.*

Abstract. Research was carried out in the basins of the Kempendyai and Kyundyae rivers in Yakutia in order to study the hydrogeochemistry of waters and determine the content of rare earth elements (REE) for unique permafrost-taiga landscapes with numerous salt manifestations. The waters of small streams and rivers are slightly mineralized, predominantly of hydrocarbonate-calcium composition. The composition of spring waters contains highly mineralized sodium chlorides with an increased, relative to the regional and global background, content of REE, especially the heavy subgroup.
Key words: *Kempendyai river, Yakutia, hydrogeochemistry, mineral water, rare earth elements.*

Якутия обладает значительным потенциалом гидроминерального сырья, включая минеральные, лечебные и промышленные воды, однако для народного хозяйства республики и страны используется весьма ограниченный их объем [2]. Основные запасы гидроминерального сырья в Якутии приурочены к западным районам республики и находятся в толщах пород осадочного чехла. Естественные выходы солей натрия в виде отложений из сильноминерализованных водных источников, а также в виде «горной соли» (блоков галита в обнажениях соленосных горных пород) в бассейнах правых притоков Вилюя, рек с современными названиями Кемпендяй и Кюндяе, были известны людям с незапамятных времен. В Западной Якутии широкое распространение имеют холодные хлоридные натриевые бромные минеральные подземные воды, обогащённые в Ленском и Мирнинском районах ещё и сульфидами. Эти воды можно вскрыть здесь практически всюду на глубине 300 – 400 м. Известны и естественные выходы этих вод на поверхность в бассейнах рек Кемпендяй, Бага, Намана и др. Рассолы используются для бальнеологических процедур в Кемпендяйском санаторном комплексе [4].

В июне 2023 г. с целью исследования данного района и сбора фактических данных была организована экспедиция на Кемпендяй. Перемещение отряда по району работ осуществлялось на двух больших квадроциклах с местными жители пос. Кемпендяй. За 4 дня, с 20 по 23 июня 2023 г., было отобрано 25 проб речной и родниковой воды (1 – скважина на сользаводе в пос. Кемпендяй; 2 – протока р. Кемпендяй у поселка; 3 – лев. приток р. Кемпендяй; 4 – ручей на обнажении цеолитового карьера Хонгуруу; 5 –

р. Курунг-Юрях в районе цеолитового карьера; 6 – лев. приток р. Кемпендяй; 7 – прав. приток р. Кемпендяй; 8 – озеро по правому борту р. Кемпендяй; 9 – прав. приток р. Кемпендяй; 10 – р. Кемпендяй в районе устья руч. Бага; 11 – руч. Бага; 12 – родник у метеостанции Чайыгда; 13 – оз. Чайыгда №2; 14 – исток р. Кемпендяй; 15 – мелкое озеро у метеостанции Чайыгда; 17 – оз. Чайыгда №1; 18 – исток ручья Битык; 19 – ручей в истоках р. Кюндяе; 20 – оз. Сикей-Сиен; 21 – озеро у обнажения «Соленая гора -1»; 22 – оз. Метеоритное; 23 – устье р. Курунг-Юрях; 24 – лев. приток р. Кемпендяй 5 км ниже поселка; 25 – р. Кемпендяй 5 км ниже поселка. Л1 – р. Лена). Вода отбиралась в полиэтиленовые емкости 250 мл, которые находились до приезда в г. Владивосток в автомобильном холодильнике. Анализы состава водных проб, проб горных пород и частично растительных проб выполнялись в Аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (АЦ ДВГИ ДВО РАН, г. Владивосток) методами плазменной спектрометрии: атомно-эмиссионной спектрометрии (ИСП-АЭС – iCAP 7600 Duo), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС – Agilent 7700x, Agilent Techn., США) и ионной хроматографии (LC-20, Shimadzu, Япония). Подготовка водных проб к анализу выполнялась в центре коллективного пользования Тихоокеанского института географии ДВО РАН (ЦКП ТИГ ДВО РАН). При этом сначала в отдельной навеске выполнялись определения pH и alkalinity, затем каждая проба фильтровалась (0,45 микрон) с помощью вакуумного насоса и разливалась в две полипропиленовые пробирки емкостью 50 мл.

В геологическом плане исследуемая территория находится в пределах Кемпендяйской впадины на поверхности кристаллического фундамента, глубина залегания которого в этом районе около 10-12 км. В разрезе осадочного чехла, по геолого-геофизическим данным М.К. Вейнберг (1974), выделяются три этажа: протерозой-нижнепалеозойский (мощность 2,5-3,0 км), среднепалеозойский (2,0-7,0 км) и верхнепалеозойско-мезозойский (1,5-2,5 км). Породы двух верхних этажей в пределах исследуемого района выходят на поверхность. Среднепалеозойские породы Кемпендяйской впадины, представленные комплексом соленосных пестроцветных вулканогенно-осадочных образований, в кровле образуют систему антиклинальных структур, соответствующих зонам максимальных мощностей слоев каменной соли, осложненных разломами северо-восточного и север-западного простирания.

Многолетнемерзлые породы на рассматриваемой территории распространяются до глубин от 50 до 400 м. В связи с этим в гидрогеологическом строении выделяют два этажа [3]. К нижнему этажу относятся подмерзлотные водоносные горизонты, содержащие слабосолоноватые (минерализация 1.2–3.2 г/л) воды хлоридно-гидрокарбонатного или гидрокарбонатного натриевого состава. С учетом фонтанирования скважин в районе сользавода, отдельные источники являются результатом разгрузки подземных вод нижнего этажа на участках сквозных субаквальных таликов под руслами рек и крупными озерами.

По минерализации отобранные воды оказались весьма разнообразными: от пресных до сильно минерализованных; их суммы солей варьируют от 33 до 135000 мг/л. Минимальную минерализацию показали пробы воды из ручьев (номера 3, 5, 6, 7, 9, 18, 24) и озер (номера 8, 22), максимальную – из минеральных источников в районе с. Кемпендяй (№ 1) и в ручье Бага (№11), а также из реки Кемпендяй в районе поселка (№ 2) и 5 км ниже поселка (№25). Показатели pH вод колеблются от 6,29 до 8,52. По основному солевому составу вода в реке Кемпендяй, устье руч. Бага, имеет хлоридно-натриевый состав. Такой же состав имеют все воды минерализованных источников. Вода из скважины на сользаводе в пос. Кемпендяй имеет хлоридно-натриевый состав с высоким содержанием кальция, магния и кремния. В воде источника по руч. Бага существенно меньше магния и кремния. Содержание F- во всех пробах вод меньше 0,3 мг/л; NO2- – меньше 0,5 мг/л; Br- – меньше 0,05 мг/л.

По микроэлементному составу собранные в районе исследований воды наиболее сильно (на десятки, тысячи и даже на десятки тысяч порядков) различаются, в сравнении с фоновыми значениями р. Лена. Максимальные концентрации большинства перечисленных микроэлементов обнаружены в воде минерализованного источника (проба №1), в воде речной протоки у пос. Кемпендяй (проба № 2), в воде источника в руч. Бага (проба № 11) и в воде р. Кемпендяй ниже поселка (проба № 25) (рис. 1). В ручьевых и озерных водах размах колебаний концентраций микроэлементов в несколько сотен раз меньше.

Суммарная концентрация растворенных форм REE во всех водах изменяется (с учетом Sc и Y) от 0,01 до 2,58 ppb. Максимальные концентрации REE показали пробы вод с более низким pH, формируемых среди осадочных пород с участием вулканитов. В большинстве водных проб отмечается преобладание суммы легких лантаноидов над тяжелыми с процентом легких от общей суммы REE от 52 до 83 %. Однако выявлен ряд проб (№1, 2, 12 и 13) с преобладанием тяжелых REE над легкими с процентом HREE от 54,7 до 61,9 %. Ранее преобладание тяжелых элементов над легкими в составе REE были выявлены нами в углекислых минеральных водах Приморского края на месторождениях Ласточка, Горноводное и Фадеевское [1]. Аналогичные соотношения LREE и HREE встречаются среди источников углекислых минеральных вод в Туве [5] и на Кавказе [7].

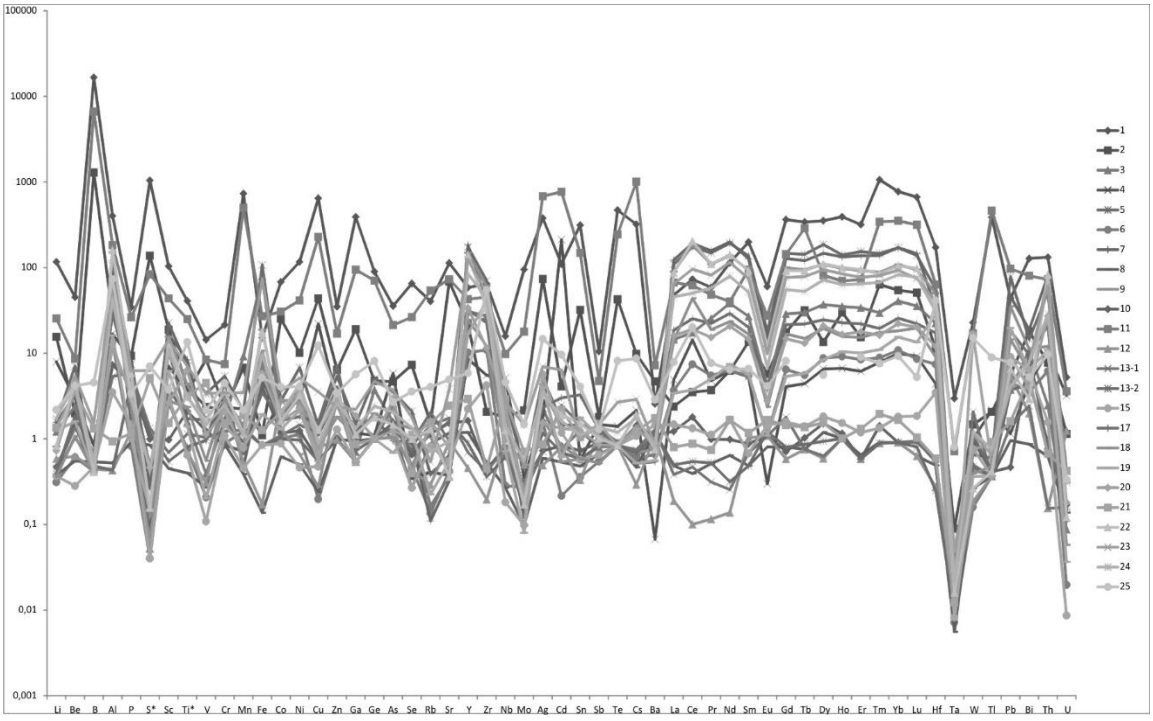


Рис. 1. Спектры распределения коэффициентов концентраций элементов в исследованных водах, рассчитанные относительно фоновых содержаний (средние значения по р. Лена, правый берег у пос. Нижний Бестях и левый берег ниже г. Якутск).

На рис. 2 представлены общие суммы REE и диаграммы соотношений в процентных долях LREE и HREE в минерализованной хлоридно-натриевой воде «Соленого источника–1 (скв. №1)» на Кемпендяе, в углекислых водах источников Ласточка и Горноводный в Приморском крае (Сихотэ-Алинь), а также – средние показатели в поверхностных водах Кемпендяя, Сихотэ-Алиня и по рекам мира.

Изученные воды в бассейнах рек Кемпендяй и Кюндяе минерализованные хлоридно-натриевые источниковые воды отличаются сравнительно высокими содержаниями B, Sr, Fe, Cu, Mn, Al, Li, Mo, P, Ni, U, а также повышенными содержаниями

редкоземельных элементов с преобладанием представителей тяжелой подгруппы. Анализ литературных данных по составу REE и соотношению HREE/LREE в источниковых водах на территории России показал, что преобладание в составе REE элементов тяжелой подгруппы иногда встречается среди углекислых минеральных вод, в том числе в Приморском крае, в Туве и на Кавказе. Среди таких минеральных вод есть широко применяемые в качестве лечебно-столовых и лечебных. Судя по накопленным нами сведениям о негативном влиянии HREE на живые организмы [6], использование минеральных вод с высоким содержанием REE с преобладанием HREE должно быть, как минимум, ограничено. Для применения таких вод в дальнейшем необходимо доизучение их действия на организм человека.

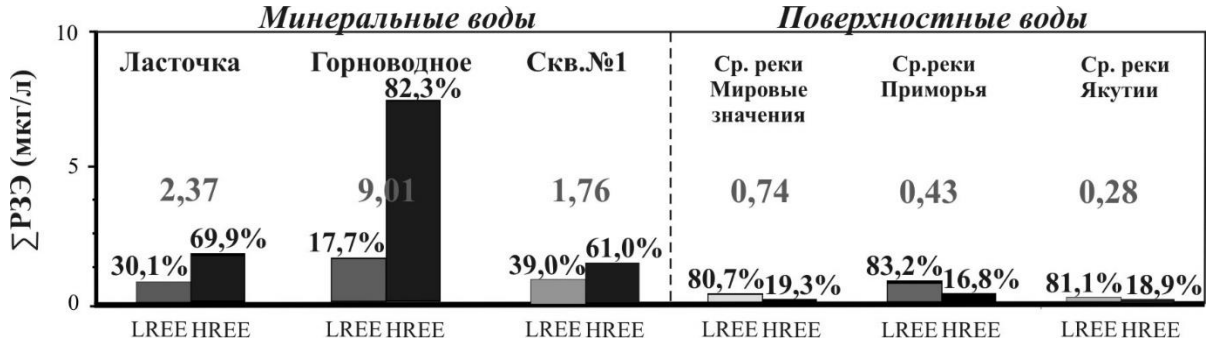


Рис. 2. Содержание общей суммы REE, а также легких (LREE) и тяжелых (HREE) редкоземельных элементов (в процентных долях) в воде хлоридно-натриевого источника на Кемпендяе (Скв. №1), в углекислых источниках Приморья (Ласточка и Горноводный), в сравнении со средними значениями поверхностных вод в бассейне р. Кемпендяй (среднее для рек Якутии), рек Сихотэ-Алиня [1] и рек мира [8].

Список литературы

1. Вах Е.А. Геохимия редкоземельных элементов в природных и техногенных водах юга Дальнего Востока России. / Е.А. Вах // Владивосток: Дальневосточный федеральный университет. – 2014. – 168 с.

2. Дроздов, А. В. Гидроминеральные запасы Якутии: состав, особенности, возможность использования / А. В. Дроздов // Наука и образование. – 2013. – № 2(70). – С. 30-36.

3. Павлова Н.А., Федоров М.А., Федоров А.А. Подмерзлотные гидрокарбонатные натриевые воды Центральной Якутии / Павлова Н.А., Федоров М.А., Федоров А.А. // в Кн.: Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами. Труды V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева г. Якутск, Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. 2023. с. 280-284.)

4. Шепелев, В. В. Состояние и перспективы использования подземных вод в Якутии / В. В. Шепелев, Н. А. Павлова, Л. Д. Иванова // Наука и техника в Якутии. – 2016. – № 1(30). – С. 22-26.

5. Шестакова А.В. Геохимия углекислых минеральных вод северо-востока Тувы. Диссерт. канд геол. мин. наук. Томск, 2018, 148 с.

6. Brouziotis A.A. Toxicity of rare earth elements: An overview on human health impact/ A.A. Brouziotis, A. Giarra, G. Libralato, G. Pagano, M. Guida, M. Trifuoggi // Sec. Toxicology, Pollution and the Environment. – Volume 10 – 2022. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.948041

7. Chirkova E., Baranovskaya E., Kharitonova N., Lavrushin V., Chelnokov G. Bragin I. Geochemistry of the rare earth elements in the sparkling groundwaters of the Caucasus ridge, Russia / E3S Web of Conferences 98, 01009 (2019) https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199801009

8. Gaillardet J. Trace elements in rivers waters/ J. Gaillardet, J. Viers, B. Dupre// Treasure on Geochemistry. V5. Amsterdam: Elsevier Pergamon. – 2004. – V. 5. – P.225-272.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИРЕЧНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Гриневский С.О.[1], Преображенская А.Е.[1]
[1]*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, Москва*

Аннотация. Рассмотрены основные процессы возможного влияния прогнозных климатических изменений на формирование запасов подземных вод месторождений приречного типа. На примере территорий конкретных месторождений на основе геогидрологического моделирования проведена оценка прогнозных изменений среднемноголетнего инфильтрационного питания и речного стока согласно нескольким сценариям глобальных климатических моделей, адаптированных для территорий исследования. Моделирование эксплуатации подземных вод при полученных таким образом различных климатических сценариях формирования ресурсов подземных и поверхностных вод показало, что в условиях гумидного климата его прогнозные изменения не вызывают существенной перестройки балансовой структуры запасов приречных месторождений подземных вод и проявляются в незначительном изменении соотношения естественных и привлекаемых из реки ресурсов. При этом возможный рост абсолютных величин сокращения речного стока под влиянием водоотбора не вызывает негативных последствий за счет увеличения транзитного речного стока.

Ключевые слова. *Месторождение подземных вод, естественные ресурсы, изменение климата, моделирование.*

Abstract. The main processes of the possible influence of predicted climate changes on the formation of groundwater reserves in riverbank deposits are considered. Based on geohydrological modeling, the forecast changes in the average long-term infiltration recharge and river flow were assessed according to several scenarios of global climate models adapted for the study areas. Modeling of groundwater exploitation under different climatic scenarios for the formation of groundwater and surface water resources has shown that under humid climate conditions, its predicted changes do not cause a significant restructuring of the balance structure of riverbank groundwater deposits and are manifested in a slight change in the ratio of the captured groundwater discharge and induced stream infiltration. At the same time, a possible increase in the absolute values of the reduction in river flow under the influence of water withdrawal does not cause negative consequences due to an increase in transit river flow.

Key words. *Groundwater deposit, groundwater resources, climate change, modeling*

Введение

Изучение и анализ влияния наблюдаемых и прогнозных климатических изменений на процессы формирования ресурсов подземных и поверхностных вод является актуальным научным направлением, исследования в рамках которого широко представлены в российских и зарубежных публикациях. Согласно региональным обобщениям для территории России, наблюдаемый в современный период рост температур и осадков для большинства регионов проявляется в преимущественном увеличении годового и минимального речного стока [9]. При этом для Европейской части России (ЕР) отмечается характерная «климатическая» трансформация гидрографа рек, выраженная в деградации пика половодья и увеличении стока в зимний период, что связано с ростом зимних температур и частыми оттепелями [12]. Согласно различным прогнозным сценариям дальнейших климатических изменений эти тенденции будут возрастать [2].

Наблюдаемые и ожидаемые климатические трансформации речного стока во многом обусловлены соответствующими изменениями его подземной составляющей. Исследования процессов формирования инфильтрационного питания (ИП) подземных вод под влиянием наблюдаемых климатических изменений показали, что, несмотря на рост температур воздуха в современный период, на большей части территории ЕР среднемноголетнее ИП увеличилось. При этом наиболее значимый рост ИП (до 50-60 мм/год) происходит в зоне избыточного увлажнения, где его увеличение обусловлено, главным образом, зимним впитыванием влаги в периоды оттепелей [11]. При сохранении современных климатических трендов на ближайшие 25 лет эта тенденция будет

замедляться за счет опережающего роста температуры воздуха и связанного с этим увеличения эвапотранспирации [5]. Таким образом, существующие и прогнозные климатические изменения ИП вызывают соответствующие преобразования процессов формирования ресурсов подземных вод зоны интенсивного водообмена как в естественных условиях, так и на участках эксплуатирующихся месторождений подземных вод.

Месторождения подземных вод приречного типа [1], где производится эксплуатация подземных вод в долинах рек береговыми водозаборами, широко распространены как в России, так и за рубежом. Формирование запасов подземных вод таких месторождений, эксплуатирующих горизонт грунтовых вод либо гидравлически связанные с ним межпластовые воды, происходит не только за счет перехвата (инверсии) естественной разгрузки подземных вод в реку $\Delta Q_р$ и привлечения (фильтрации) транзитного речного стока $Q_ф$, но и под влиянием перестройки водного баланса в зоне аэрации (ЗА), вызванной снижением уровня грунтовых вод (УГВ) при водоотборе. При этом вызванное эксплуатацией снижение УГВ на участках его естественного неглубокого залегания вызывает сокращение разгрузки грунтовых эвапотранспирацией $\Delta Q_{эт}$ и увеличение ИП - $\Delta Q_{ип}$, что отражается в балансовой структуре водоотбора $Q_э$ [7]. При этом $\Delta Q_{эт}$ – это часть инверсированных водозабором естественных ресурсов подземных вод, а $\Delta Q_{ип}$ формирует дополнительные привлекаемые ресурсы:

$$Q_э = \Delta Q_р + \Delta Q_{эт} + Q_ф + \Delta Q_{ип}, \qquad (1)$$

Очевидно, что все составляющие баланса эксплуатационного водоотбора являются «климатически зависимыми», что обусловливает максимальную чувствительность месторождений подземных вод приречного типа к глобальным климатическим изменениям, которая может проявляться в следующих основных процессах.

Во-первых, климатические изменения среднемноголетнего ИП и речного стока могут вызвать изменение долевого соотношения естественных и привлекаемых ресурсов в балансе водоотбора, что может отразиться на химическом составе и качестве отбираемой воды.

Во-вторых, климатические преобразования балансового уравнения (1) могут проявиться в степени влияния эксплуатации подземных вод на речной сток. Увеличение относительной доли инверсии эвапотранспирационной разгрузки подземных вод и дополнительного ИП в балансе водоотбора сокращает долю перехвата водозабором разгрузки в реку и привлечения из нее, что снижает негативное воздействие эксплуатации на речной сток. Помимо этого, даже в случае незначительной перестройки баланса водоотбора, климатические изменения самих расходов годового и минимального транзитного речного стока на территории месторождения обусловливают изменение степени его относительного сокращения под влиянием эксплуатации. При этом, если для большей части территории России, где наблюдается увеличение речного стока, относительная степень его сокращения под влиянием эксплуатации подземных вод будет снижаться, то для отдельных регионов, в частности, бассейна р. Дон, где в современный период наблюдается снижение водности [9], негативное влияние береговых водозаборов на речной сток будет возрастать.

В-третьих, климатические изменения речного стока могут привести к ухудшению сезонного восполнения запасов подземных вод, которые при определенных гидрогеологических и гидрогеодинамических условиях в маловодные периоды составляют значимую долю эксплуатационного водоотбора и дополняют уравнение (1). Такие условия, как правило, характерны для приречных месторождений с резко контрастным внутригодовым режимом речного стока, когда ограниченность естественных и привлекаемых из реки ресурсов в маловодные периоды вызывает сезонную сработку емкостных запасов водоносного горизонта, которые затем восполняются при высокой водности [10]. В этом случае наблюдаемая климатическая

трансформация гидрографа реки, выраженная в деградации стока половодья, может существенно лимитировать объемы сезонного восполнения запасов и привести к прогрессирующему снижению уровней подземных вод на водозаборе.

И, наконец, наблюдаемые тенденции увеличения зимнего стока [12], делают весьма неопределенной традиционную оценку естественных ресурсов подземных вод, во многом определяющих эксплуатационные возможности месторождения, по минимальному зимнему стоку рек. В современных условиях меняющегося климата в зимнем стоке, помимо подземной составляющей, все более значимой становится доля талых вод, формирующихся в периоды оттепелей, и в этом случае такой гидрологический метод будет давать завышенные оценки ресурсов подземных вод.

Некоторые аспекты рассмотренных выше климатических изменений условий формирования запасов подземных вод анализируются далее на примере конкретных месторождений приречного типа – Пермиловского (Архангельской области), Судогодского (Владимирской области) и водозаборе Киевский (Курская область).

Методика исследований

Исследования проведены на основе геогидрологического моделирования эксплуатации подземных вод при различных сценариях климата. Геофильтрационная основа геогидрологических моделей объектов построена на материалах разведочных работ и опыта эксплуатации месторождений. Верхняя граница геогидрологических моделей характеризуется зависимостью инфильтрационного питания, формирующегося при разных климатических сценариях, от глубины УГВ, которая отражает также различия ландшафтных условий территории.

Оценка ИП при различных сценариях климата и в зависимости от ландшафтных условий проведена на основе моделирования процессов его формирования на основе комплекса моделей трансформации осадков на поверхности земли и влагопереноса в зоне аэрации с учетом испарения и отбора влаги корнями растений, методика которого изложена в [6, 13]. Для моделирования использованы многолетние суточные ряды метеорологических характеристик по ближайшим метеостанциям, отражающие ретроспективные (1965-1988 гг) и современные (1989-2019 гг) климатические условия, а также различные прогнозные сценарии их изменений. Краткосрочные климатические прогнозы на ближайшие 25 лет получены на основе экстраполяции фактических рядов метеоданных современного периода при условии сохранения наблюдаемых линейных трендов изменения месячных значений. Долгосрочные прогнозы на конец XXI века (2070-2090 гг) построены на основе глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) семейства CMIP5 при экстремальном сценарии эмиссии парниковых газов RCP8.5 [14]. Их адаптация для рассматриваемых территорий проведена на основе стохастического генератора LARSWG 6.0 [15], который позволяет моделировать прогнозные ряды метеорологических характеристик суточного разрешения для различных МОЦАО из ансамбля CMIP5 на основе статистических параметров фактических рядов метеоданных по станциям.

Моделирование эксплуатации подземных вод проведено при условии гидрогеодинамически зависимого гидрологического режима водотоков [4], что позволяет учитывать различие естественных расходов речного стока в разных климатических сценариях и адекватно отражать процессы его сокращения под влиянием водоотбора.

Основные результаты исследований

Для территории *Пермиловского месторождения* Архангельской области, где при проектной эксплуатации подземных вод целевого средне-верхнекаменноугольного карбонатного водоносного комплекса в объеме утвержденных запасов прогнозируется существенное сокращение речного стока [3, 4], проведена оценка масштабов изменения негативного влияния водоотбора при различных сценариях прогнозного климата. Исследования проведены на основе трех прогнозных климатических моделей ансамбля CMIP5, характеризующихся существенно различными тенденциями ожидаемых

изменений коэффициента увлажнения территории на конец XXI века: его увеличением, уменьшением и незначительным изменением – соответственно, «влажный», «сухой» и «средний» сценарии. Для каждого из сценариев на основе геогидрологического моделирования проведена оценка среднемноголетнего ИП и речного стока на площади месторождения, которая показала сокращение естественных ресурсов подземных вод целевого водоносного комплекса на 17% при «сухом» сценарии, их увеличение на 26% - при «среднем» и более, чем в 2 раза – при «влажном» сценариях. Моделирование эксплуатации подземных вод показало, что, несмотря на существенные климатические различия условий формирования ИП и речного стока на территории месторождения, проектный водоотбор обеспечивается инверсией разгрузки подземных вод и фильтрацией из реки. При этом изменение долевого соотношения естественных и привлекаемых ресурсов в структуре запасов месторождения в различных климатических сценариях не превышает первых процентов. В то же время, существенно меняется степень воздействия водоотбора на речной сток. При наиболее «засушливом» климатическом сценарии сокращение меженного стока реки на водозаборных участках достигает 90%, что существенно выше прогнозных оценок при современном климате. Однако, другие климатические модели показывают уменьшение относительного ущерба стоку – на 10-15% по «среднему» сценарию и на 40-50% - по «влажному», что связано с увеличением естественного меженного расхода реки.

Балансовая структура запасов подземных вод *Судогодского месторождения*, где береговым водозабором эксплуатируется гжельско-ассельский карбонатный водоносный горизонт для водообеспечения г. Владимир, формируется согласно уравнению (1). При этом суммарная доля сокращения эвапотранспирационной разгрузки подземных вод и дополнительного ИП, вызванных снижением УГВ в долине реки, составляет 17%, что сопоставимо с долей привлечения речных вод (19%) [7]. Прогнозный анализ изменений многолетней динамики балансовой структуры водоотбора и его влияния на речной сток проведен на основе климатического сценария, предполагающего сохранение в ближайшие 25-лет наблюдаемых трендов увеличения количества осадков и повышения температуры воздуха.

Результаты моделирования показали, что многолетние вариации климатических условий вызывают перестройку балансовой структуры водоотбора, при которой в маловодные годы относительная роль привлечения воды из реки возрастает, а в многоводные – снижается. При этом в прогнозный период, характеризующийся ростом годовых сумм осадков и ИП, доля привлечения воды из реки становится незначительной, в отдельные годы сокращаясь до нуля, что делает более стабильной балансовую структуру водоотбора, обеспеченного естественными ресурсами подземных вод. При этом, однако, несмотря на уменьшение привлечения речных вод, величины абсолютного ущерба стоку в прогнозный период оказываются несколько больше за счет уменьшения доли инверсии разгрузки эвапотранспирацией [8].

На примере *Киевского водозабора г. Курска* проведен анализ сезонного восполнения запасов эксплуатируемого четвертично-альб-сеноманского водоносного комплекса за счет фильтрации из р. Сейм в половодье. Имитационное моделирование этого процесса при современном и прогнозном гидрографах реки, различающихся интенсивностью и длительностью половодья, позволило оценить масштабы дополнительных понижений уровней подземных вод на водозаборе в маловодные периоды, связанных с климатическими изменениями объемов весеннего питания из реки.

Выводы

Проведенные исследования показали, что в условиях гумидного климата его прогнозные изменения, даже при контрастных и довольно экстремальных сценариях, не вызывают существенной перестройки балансовой структуры запасов приречных месторождений подземных вод территорий гумидного климата и проявляются, главным образом, в незначительном изменении соотношения естественных и привлекаемых

из реки ресурсов. При этом возможный рост абсолютных величин сокращения речного стока под влиянием водоотбора не вызывает негативных последствий за счет увеличения транзитного речного стока на участке водозабора.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-17-00102

Список литературы

1. Боревский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин Л.С. Оценка запасов подземных вод. Киев: Вища школа, 1989. 407 с.

2. А. Н. Гельфан, Е. М. Гусев, А. С. Калугин, И. Н. Крыленко, Ю. Г. Мотовилов, О. Н. Насонова, Т. Д. Миллионщикова, Н. Л. Фролова Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 2. Влияние изменения климата на водный режим рек России в XXI веке // Водные ресурсы. 2022. Т 49, № 3, с. 270–285

3. Гриневский С.О. Формирование эксплуатационных запасов водозабора подземных вод в долине малой реки. // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 1991. № 3, с.87 – 92.

4. Гриневский С.О. Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод. М.: Инфра-М. 2012. 152 с.

5. Гриневский С. О., Даниленко А. С., Халеский В. В. Модельный анализ климатических изменений инфильтрационного питания подземных вод в региональном масштабе и в малом речном бассейне // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования. — Москва, МГУ: 2023. — С. 40–46

6. Гриневский С. О., Поздняков С. П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5, с. 543–557

7. Гриневский С. О., Спорышев В. С. Особенности формирования балансовой структуры эксплуатационного отбора подземных вод и его влияния на речной сток при снижении уровней грунтовых вод // Водные ресурсы. — 2019. — Т. 46, № 3. — С. 247–258.

8. Гриневский С. О., Спорышев В. С., Самарцев В. Н. Модельный анализ влияния климатических изменений на балансовую структуру эксплуатационных запасов приречного месторождения подземных вод // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2019. — № 4. — С. 45–54.

9. Фролова Н. Л., Магрицкий Д. В., Киреева М. Б., Григорьев В. Ю., Гельфан А. Н., Сазонов А. А., Шевченко А. И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т 49, № 3, с. 251–269

10. Штенгелов Р.С. Формирование и оценка эксплуатационных запасов пресных подземных вод. М.: «Недра». 1988. 230 с.

11. Grinevskiy, S.O.; Pozdniakov, S.P.; Dedulina, E.A. Regional-Scale Model Analysis of Climate Changes Impact on the Water Budget of the Critical Zone and Groundwater Recharge in the European Part of Russia. // Water 2021, 13, 428. https://doi.org/10.3390/w13040428

12. Kireeva M., Frolova N., Rets E., Samsonov T., Entin A., Kharlamov M., Telegina E., Povalishnikova E. Evaluating climate and water regime transformation in the European part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period // International Journal of River Basin Management,2019. DOI:10.1080/15715124.2019.1695258

13. Pozdniakov S. P., Vasilevskiy P. Y., Grinevskiy S. O. Estimation of groundwater recharge by flow in vadose zone simulation at the watershed with different landscapes and soil profiles // Engineering geology and Hydrogeology. Bulgarian academy of sciences. ISSN 0204-7934. 2015. №. 29, p. 47–58.

14. Semenov M.A., P. Stratonovitch The use of multi-model ensembles from global climate models for impact assessments of climate change // Climate Research, 2010. Vol. 41, p. 1–14.

15. Semenov M.A., P. Stratonovitch Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections // Climate Research, 2015. Vol. 65, p. 123–139, DOI: 10.3354/cr01297

ГИДРОГЕОХИМИЯ И ИЗОТОПИЯ МОРДОЙСКОГО УГЛЕКИСЛОГО ИСТОЧНИКА (ЮГО-ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Замана Л.В.
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СОРАН, Чита, l.v.zamana@mail.ru

Аннотация. Приведены данные по общему химическому и микрокомпонентному составу воды, изотопам отношениям δ^2H и $\delta^{18}O$ воды, $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ гидрокарбоната Могойского источника. Соответствующими нормативам биологически активными компонентами углекислой воды источника являются CO_2 и кремнекислота. Подобный гидрохимический тип минеральной воды в ГОСТ Р 54316-2011 отсутствует. При приуроченности к гранитоидам источник отличается наиболее легким из известных по региону изотопным составом углерода, что может быть связано с обогащенностью вмещающих пород углеродным веществом.

***Ключевые слова*:** *углекислая вода, химический, микрокомпонентный и изотопный состав.*

Abstract. The data on general chemical and microcomponent composition of water, isotope ratios δ^2H and $\delta^{18}O$ of water, $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ of bycarbonate of Mogoysky spring are given. The biologically active components of carbonic spring water corresponding to the norms are CO2 and silicic acid. There is no such hydrochemical type of mineral water in GOST R 54316-2011.Being confined to granitoids, the spring is characterized by the lightest carbon isotope composition known in the region, which may be related to the enrichment of the host rocks with carbon matter.

Key words: Carbon dioxide water, chemical, microcomponent and isotopic composition.

Забайкалье по обилию проявлений углекислых вод (УВ) уступает в России только региону Большого Кавказа. В Восточном Забайкалье, юг которого по гидроминеральному районированию относится к Даурской гидроминеральной области [6], разведано с утверждением запасов в ГКЗ СССР 13 месторождений углекислых вод, еще на трёх месторождениях выполнена предварительная разведка с оценкой эксплуатационных запасов [2]. В советское время в регионе на углекислых водах работало семь санаторно-курортных учреждений (Дарасун, Кука, Молоковка, Ургучан, Шиванда, Ямаровка, Ямкун), шесть из них, исключая Ямаровку, продолжают функционировать. Ещё на трёх источниках созданы новые местные профилактории. На шести месторождениях минеральная вода бутилируется. На некоторых источниках местное население забирает воду самостоятельно. К ним относится и Мордойский источник, который посещается местным населением не только для забора минеральной воды, но и как место отдыха. В советское время возле источника располагался пионерский лагерь. По решению Читинского облисполкома в 1991 г. источник получил статус памятника природы регионального значения. Тем не менее, существует угроза его исчезновения из-за местоположения в контуре горного отвода разрабатываемой золотоносной россыпи.

Источник расположен на юге региона в приграничном с Монголией районе на водосборе р. Кыры, левого притока р. Онон, относящегося к верхнеамурскому бассейну. Географические координаты его местоположения 49°44.465' с.ш., 112°03.160' в.д., а. о. 980 м. В геолого-структурном отношении источник приурочен к северо-восточной оконечности заложенного в позднепермское время Хэнтэй-Даурского сводового поднятия, в границах Чикой-Ингодинского термоминерального района [6], где кроме ещё одного углекислого источника известно, по разным оценкам, от 6 до 9 проявлений азотных терм, в том числе Былыринское месторождение, на котором до 2004 г. функционировала ведомственная (РЖД) водолечебница, ныне пустующая. Локализован источник в поле развития гранитоидов пермско-триасового возраста.

При обследовании в 2014 г. источник имел две основные головки в 4 м друг от друга, одна из которых была накрыта деревянным настилом с люком размером 7×8 м2. Газирование в этом выходе было слабое, редкими сериями пузырьков, расход около 0.1

л/с. Во втором незакрытом выходе в воронке диаметром 0.6-0.7 м глубиной до 30 см вода с дебитом 0.2 л/с газировала почти непрерывно, воронка была заполнена обломками серых гранитов с пустотами выщелачивания. Из этого выхода отобрана проба УВ-14-3, а годом позже и проба УВ-15-16.

Водные пробы отбирались в свежую пластиковую посуду, на месте измерялись температура воды, pH, Eh, электропроводимость (ЭП), проводились фильтрование и консервация проб на катионы и масс-спектрометрический анализ, добавлялся реактив (хлористый кальций) на высаживание карбонатов. Общий химический анализ, определения перманганатной окисляемости (ПО), форм азота, Si, P, Fe и Mn осуществляли по общепринятым нормативным методикам в аттестованной лаборатории ИПРЭК СО РАН. Микроэлементы (Li–U) определены масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой в Аналитическом центре Института геохимии СО РАН (г. Иркутск). Изотопные анализы воды и карбонатных осадков выполнены в лаборатории стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) на установке Finnigan-MAT 252. Погрешность анализа 1σ по кислороду ±0,15, по водороду ±1.2 и по углероду ±0.1‰. Результаты анализов представлены в таблице.

Таблица. Физико-химические характеристики воды Мордойского источника

Параметр	УВ-14-3	УВ-15-16	Параметр	УВ-14-3	УВ-15-16	Параметр	УВ-14-3	УВ-15-16
Дата отбора	30.09.14	29.09.15	Al	76	62	Ce	0.18	0.27
T, °C	1.9	1.8	Sc	0.003	0,018	Pr	0.019	0.042
pH	5.25	5.35	Ti	0.26	<0.09	Nd	0.095	0.21
Eh, мВ	164	150	V	0.024	0.036	Sm	0.023	0.041
ЭП, µC/см	383	387	Cr	17	0.25	Eu	0.0064	0.0034
ПО, мгО/л	1.80	1.98	Co	0.48	0.74	Gd	0.026	0.043
O_2, мг/л	-	0.65	Ni	8.1	2.3	Tb	0.0029	0.0072
CO_2	2020	2247	Cu	6.5	1.8	Dy	0.021	0.048
HCO_3^-	211.5	216.6	Zn	776	16	Ho	0.0058	0.014
SO_4^{2-}	13.2	7.4	Ga	0.0034	0.030	Er	0.054	0.056
Cl^-	1.06	1.44	Ge	0.058	0.044	Tm	0.0047	0.0094
F^-	0.33	0.30	As	4.05	1.7	Yb	0.041	0.075
NO_3^-	<0.31	0.62	Se	0.10	0.08	Lu	0.0088	0.017
NO_2^-	0.010	0.024	Br	16	11	Hf	0.0013	0.0030
Ca^{2+}	40.5	41.8	Rb	35	42	Ta	0.0001	0.0003
Mg^{2+}	11.8	14.6	Sr	170	240	W	0.10	0.22
Na^+	11.0	8.91	Y	0.22	0.80	Re	0.0029	0.0032
K^+	4.45	2.13	Zr	0.10	0.091	Tl	-	0.0036
NH_4^+	0.20	0.32	Nb	0.002	0.0022	Pb	1.10	<0.009
*M	293.8	293.1	Mo	0.54	0.73	Th	0.0034	0.0041
Si	19.1	27.3	Ag	17	0.0007	U	0.11	1.19
$P_{об}$	0.065	0.073	Cd	74	3.1	$\delta^{18}O_{SMOW}$	–10.6	-
Fe	0.32	4.15	Sn	0.23	<0.01	$\delta^{2}H_{SMOW}$	–84	-
Mn	0.10	0.38	Sb	0.14	0,061	$\delta^{13}C_{PDB}$	–10.7	–10.6
Li, мкг/л	104	122	Cs	2.39	2,9	$\delta^{18}O_{PDB}$	–12.2	–14.4
Be	0.70	0.67	Ba	271	76	$\delta^{18}O_{SMOW}$	18.3	16.0
B	19.0	9.0	La	0.048	0,18			

Примечание. CO_2– Mn – в мг/л, Be– U – мкг/л; *M – минерализация по сумме ионов; прочерк – не определялось.

По химическому составу вода источника гидрокарбонатная магниево-кальциевая с низкой минерализацией, что можно расценивать как признак насыщения углекислым газом подземной воды на небольшой глубине в зоне активного водообмена, вследствие чего, несмотря на приобретённую углекислотную агрессивность, вода до выхода на поверхность не успевает обогащаться растворёнными веществами. Соответствующими

нормам биологически активными компонентами являются CO_2 и кремнекислота (по Si не менее 18 мг/л). В ГОСТ Р 54316-2011 такой гидрохимический тип минеральной воды не представлен, тогда как в Забайкалье имеются и другие углекислые источники с аналогичными гидрохимическими характеристиками [3].

По микроэлементам по пробе УВ-14-3 результаты анализа по Cr, Ag и Cd могут быть ошибочными, если не имело места загрязнение при консервации проб. Необходима проверка этих данных, особенно по кадмию, который относится ко 2-му классу опасности и имеет предельно допустимую концентрацию для минеральных питьевых вод по указанному ГОСТу в 3 мкг/л. В распределении редких щелочных элементов сохраняется общее, как правило, для подземных вод соотношение концентраций Li>Rb>Cs, свидетельствующее о меньшей подвижности рубидия в водной среде, поскольку содержание его в горных породах почти на порядок выше, чем лития.

Заметно разнятся данные по редкоземельным элементам – по второй пробе концентрации их, исключая европий и эрбий, примерно в 2 раза выше. Более высокое содержание в этой пробе также кремния, железа, в меньшей степени CO_2. По-видимому, повышение углекислотной агрессивности водной среды всё же обусловило более интенсивный вынос РЗЭ. Распределение весовых концентраций их в воде (рис. 1а) соответствует правилу Оддо-Гаркинса для горных пород, согласно которому содержание элементов с чётными номерами по периодической системе Д.И. Менделеева выше, чем соседних с номерами нечётными. В нормированных по североамериканскому сланцу (NASC) распределениях (рис. 1б) необычен пик по эрбию по пробе УВ-14-3, довольно редок для углекислых вод Забайкалья минимум по европию (та же проба), в большинстве случаев Eu выделяется положительными аномалиями.

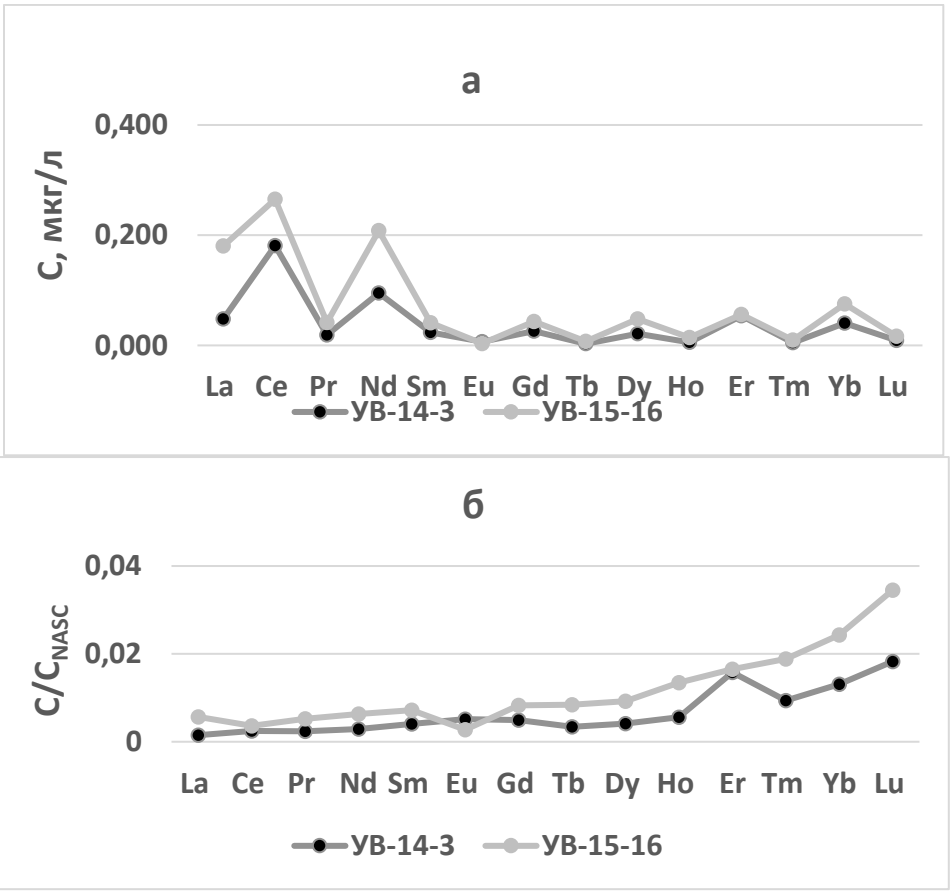


Рис. 1. Распределение весовых (а) и нормированных по NASC (б) концентраций редкоземельных элементов в воде Мордойского источника.

Наиболее дискуссионной проблемой формирования углекислых вод является происхождение углекислого газа, тогда как инфильтрационный генезис самой воды практически общепризнан. Наблюдающееся в большинстве правостороннее отклонение точек изотопного состава воды от Глобальной линии метеорных вод Крейга, как и в нашем случае (рис. 2), объясняется метаморфизацией молекул воды в процессе взаимодействия её с вмещающими породами [1, с. 21]. Кислородный сдвиг по пробе УВ-14-3 составил 1.15 ‰.

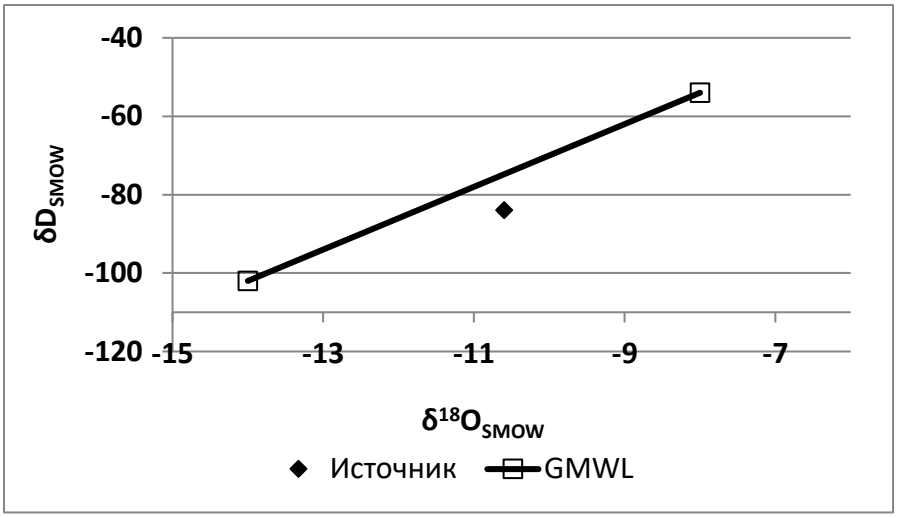


Рис. 2. Положение фигуративной точки изотопного состава воды Мордойского источника по отношению к Глобальной линии метеорных вод Крейга (GMWL).

О происхождении углекислого газа обычно судят по изотопному составу углерода CO_2 или растворенных компонентов карбонатной системы. Различают мантийный и коровый CO_2. Первый поступает из мантии по глубинным разломам или при вулканизме, величина $\delta^{13}C$ его по PDB от –4 до –8 ‰ [10], второй образуется в результате термометаморфизма карбонатных пород или разложения органического вещества, значения $\delta^{13}C$ соответственно больше 0 ‰ и меньше –12 ‰ [9]. Изотопный состав углерода $\delta^{13}C$ углекислого газа Могойского источника по пробе от 26.06.2012 равнялся –10.0 ‰ [7], авторы посчитали CO_2 мантийным. По данным В.Ю. Лаврушина с соавторами [4] значение $\delta^{13}C$ растворённого неорганического углерода по источнику в июле 2020 г. составило –4.5‰ и было наименьшим из 16 опробованных в Забайкалье проявлений УВ, при этом только по четырём из них значения были отрицательные, по остальным изменялись в пределах 1.1-7.0‰. Генезис CO_2 в углекислых водах авторы представили как вулканогенно-метаморфогенный. По геологическим условиям оснований для заключения о мантийном (или вулканогенном) генезисе углекислого газа Мордойского источника нет, вулканогенные образования или глубинный разлом в районе его выхода отсутствуют, источник, как указано выше, локализован в поле развития гранитоидов. Учитывая фракционирование изотопов, при указанной величине $\delta^{13}C$ растворенного углерода по источнику в углекислом газе оно должно быть меньше –12‰, т.е., CO_2 должен быть биогенным.

Г.С. Вартанян происхождение углекислых вод горно-складчатых областей, включая Забайкалье, связывал с процессами регионального метаморфизма [1, с. 173]. Эта модель в нашем случае также не подходит для объяснения генезиса CO_2 источника, поскольку карбонатные отложения в районе не представлены и, главное, $\delta^{13}C$ растворённого углерода существенно меньше, чем должно быть при метаморфизме карбонатных пород. В [8] методом термодинамического моделирования показана возможность формирования углекислых вод в результате взаимодействия воды с алюмосиликатными осадочными (аргиллит) и магматическими (нефелиновый сиенит)

породами без привлечения внешних источников CO_2. Величина $\delta^{13}C$ растворённого неорганического углерода по источнику (–10.6…–10.7 ‰) оказалось наименьшей из опробованных нами более 40 проявлений углекислых вод Забайкалья. По полученным значениям $\delta^{13}C$ изотопный состав углерода углекислого газа с учётом фракционирования должен быть меньше –10…–12‰, для продуцирования такого лёгкого неорганического углерода требуется органическое вещество. Возможность обогащения им в случае осадочных отложений особых доказательств не требует, что касается магматических пород, то для рассматриваемого района такой факт установлен. В частности, в сульфидно-кварцевых жилах гидротермального` Курултыкенского полиметаллического месторождения, сформировавшегося на заключительном этапе становления гранитоидной интрузии, выявлено заполняющее полости углеродистое вещество со средним изотопным составом $\delta^{13}C$ –26.79 ‰ [5]. Это свидетельствует о том, что материнские граниты были им обогащены.

Таким образом, наиболее лёгкий из изученных в Забайкалье углекислых вод изотопный состав растворённого неорганического углерода Могойского источника, локализованного в поле гранитоидов, определяется, очевидно, обогащённостью их углеродистым веществом. По химическим характеристикам минеральная вода источника представляет самостоятельный гидрохимический тип, отсутствующий в ГОСТ Р 54316-2011 Воды минеральные природные питьевые.

Подготовлено по госбюджетной теме № FUFR-2021-0006.

Список литературы

1. Вартанян, Г. С. Месторождения углекислых вод горно-складчатых регионов / Г. С. Вартанян. – М.: Недра, 1977. – 288 с.

2. Замана, Л. В. Углекислые воды Даурской гидроминеральной области (Восточное Забайкалье) / Л.В. Замана // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2018. Т. 95. № 4. С. 69-74. DOI: 10.17116/kurort20189504169.

3. Замана, Л. В. Химические типы углекислых вод Восточного Забайкалья / Л. В. Замана // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов: опыт и перспективы использования в целях профилактики заболеваний, лечения и реабилитации больных. Материалы III Международной научно-практической конференции. 2017. С. 138-142.

4. Лаврушин, В. Ю. Изотопно-геохимические особенности ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$, $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$) азотных и углекислых вод Забайкалья / В. Ю. Лаврушин, Г. А. Челноков, И. В. Брагин, А. С. Айдаркожина // В сб.: ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА. Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием. – Иркутск, 2021. – С. 179-183. DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-179-183.

5 Кузьмин, М. И. Углеродистое вещество сульфидно-кварцевых жил Курултыкенского полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) / М. И. Кузьмин, Ю. П. Трошин, С. М. Бойко, Э. А. Развозжаева, Л. Д. Зорина, Д. Х. Мартихаева // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52. № 3. С. 280-288.

6. Минеральные воды южной части Восточной Сибири. Т. 1. Гидрогеология минеральных вод и их народнохозяйственное значение / Под ред. В. Г. Ткачук и Н. И. Толстихина. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1961. – 346 с.

7. Оргильянов, А. И. Изотопный состав воды минеральных источников Монголии и Забайкалья / А. И. Оргильянов, И. Г. Крюкова, П. С. Бадминов, М. А. Данилова // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. 2013. № 1. С. 167-170.

8. Павлов, С. Х. Углекислые воды – результат физико-химических взаимодействий в системе «вода-порода» / С. Х. Павлов, К. В. Чудненко // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием, г. Владивосток, 06-11 сентября 2015 г. – Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2015. – С. 159-162.

9. Юдович, Я. Э. Соотношения изотопов углерода в стратисфере и биосфере: четыре сценария / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис // Биосфера. 2010. Т. 2. № 2. С. 231-246.

10. Pineau, F. Carbon isotopes and concentrations in mid-oceanic ridge basalts / F. Pineau, M. Javoy // Earth Planet. Sci. Lett. 1983. 62. P. 239-257

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ АЗОТНЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Кирюхин А.В. [1], Журавлев Н.Б. [1]
1 - Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, AVKiryukhin2@mail.ru

Аннотация. Азотные гидротермальные системы характеризуются отсутствием магматического флюидного питания, поэтому их формирование рассматривается на термогидродинамических моделях сквозной проточной циркуляции от области атмосферного водного питания через систему резервуаров-аккумуляторов горячеводного теплоносителя до зоны разгрузки в условиях кондуктивного теплообмена. В качестве природного объекта для тестирования моделей используется Верхне-Паратунское геотермальное месторождение. Показана достаточность R-Z радиально-цилиндрической структуры каналов гидротермальной системы для обеспечения наблюдаемых параметров ее тепловой и массовой разгрузки.
***Ключевые слова**: Термогидродинамическая модель, Верхне-Паратунский, структура, разгрузка, TOUGH2.*

Abstract. Nitrogen hydrothermal systems are characterized by the absence of magmatic fluid supply, so their formation is considered on thermohydrodynamic models of through-flow circulation from the area of atmospheric water recharge through the system of reservoirs-accumulators of hot-water fluids to the zone of discharge on under conditions of conductive heat transfer. The Verkhne-Paratunsky geothermal field is used as a natural object for model testing. The sufficiency of R-Z radial-cylindrical structure structure of hydrothermal system channels to provide the observed parameters of its thermal and mass discharge is shown.
***Key words:** Thermohydrodynamic model, Verkhne-Paratunsky, structure, unloading, TOUGH2.*

Введение

Низкотемпературные геотермальные месторождения, определяемые температурой резервуара до 150 °C на глубине 1 км [Rybach, 1981; Axelsson, 2000; Johannesson, 2016] как правило характеризуются преобладанием азота в газовом составе и отсутствием магматического флюидного питания. Несмотря на это, указанные месторождения продемонстрировали возможность многолетней (десятилетия) промышленной эксплуатации в Исландии, Венгрии, Китае, Турции, Франции, Германии, России и других странах. Этот опыт позволил понять механизмы формирования таких месторождений, включая условия водного и теплового питания в естественных условиях и при эксплуатации, оценить характеристики резервуаров и степень возобновляемости ресурсов.

Общепринятая в настоящее время концептуальная модель низкотемпературных геотермальных систем предполагает глубокую циркуляцию метеорной воды, которая берет начало в высокогорных районах области водного питания, извлекает тепловую энергию в разломах/дайках глубокого заложения, а затем поднимается и разгружается в виде горячих источников в долинах (Bodvarsson, 1983). Доминирующее метеорное происхождение исландских низкотемпературных геотермальных систем было установлено на основе исследований изотопного состава воды (Arnason, 1976). Анализ длительной эксплуатации девяти исландских низкотемпературных геотермальных месторождений, которые в основном эксплуатируются в условиях скважинной откачки (Axelsson, 2010), показывает, что, несмотря на схожие механизмы формирования, выявлено несколько типов геотермальных месторождений:

1. Высокопродуктивные резервуары (65-877 кг/с, до 80 кг/с/бар), благодаря проницаемости и граничным условиям они достигают квазиравновесия при постоянном расходе водоотбора и при отсутствии реинжекции (Reykir, Reykjahlid, Laugarnes (150 кг/с, падение уровня воды на 140 м), Ellidaar, Ashildarholtvatn); 2. Менее продуктивные резервуары (15-38 кг/с, 0.7 кг/с/бар), которые не достигают равновесия, некоторые имеют благоприятные граничные условия (Skatudalur, Hamar), но другие нуждаются

в восполнении в виде 15-25% реинжекции (Laugaland), для стабилизации снижения давления, в некоторых случаях землетрясение M 6.6 также приводят к повышению продуктивности (Gata); и 3. Высокопродуктивные резервуары, испытывающие притоки холодных грунтовых вод (Thorleifskot). Объем добычи термальных вод оценивается в 25-80% от объема порового пространства (Laugarnes, Hamar), что объясняет отсутствие заметных химических и температурных изменений в большинстве упомянутых выше систем.

В последние годы получена значительная информация о EGS (инжиниринговые геотермальные системы) Верхне-Рейнского грабена (Sauerlach, Insheim, Beinheim, Brühl, Soultz, Bruchsal, Landau), где низкотемпературные геотермальные резервуары обнаружены в гранитах и в приконтактовых зонах со смежными метаморфическими комплексами [Schill et al., 2013; Genter A. et al., 2016]. В этом случае осуществляется стимуляция природных систем трещин и их последующая эксплуатация с использованием погружных скважинных насосов LSP, установленных на глубине до ~370 м для извлечения тепла из замкнутой циркуляционной системы, состоящей из дуплета скважин. Продуктивность резервуаров типа «одной трещины» в Рейнском грабене в среднем сопоставима с исландскими резервуарами: Insheim (85 кг/с при 160 °C, дуплет скважин на расстоянии 1 км), Beinheim (70 кг/с при 140°C), Brühl (70 кг/с), Bruchsal (30 кг/с при 126°C), Landau (50-70 кг/с при 160°C), Rittershoffen (70 кг / с при 160°C), Soultz (32 кг/с при 155°C). Извлечение тепла из магматических пород представляет интерес и в связи с эксплуатацией Паратунских резервуаров, где на двух участках вскрыты диоритовые тела.

Хотя вопросы гидрогеологии Паратунских геотермальных месторождений (Ю.Ф. Манухин, Л.А. Ворожейкиной, 1976), примеры Исландии, Рейнского грабена и других известных азотных низкотемпературных геотермальных месторождений мира достаточно обстоятельно проработаны, но тем не менее остаются нерешенными фундаментальные и прикладные проблемы, связанные с условиями формирования азотных гидротермальных систем в целом.

Постановка задачи 1 (Heat Mining)

Рассмотрим радиально-цилиндрическую (R-Z) модель условий формирования геотермального месторождения (рис. 1), соответствующую гидрогеологическим характеристикам Верхне-Паратунской гидротермальной системы в целом (Kiryukhin et al, 2017, Fig. 12).

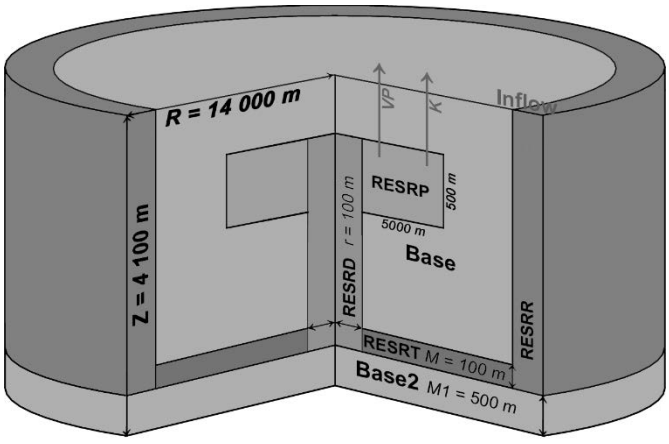


Рис. 1. Радиально-цилиндрическая (R-Z) геометрия области моделирования и зонирование модели на домены с различными фильтрационно-емкостными и теплофизическими свойствами (значения параметров указано в табл. 1).

Моделируемая область цилиндрической формы имеет внешний радиус R=14 км и глубину Z=4.1 км (+0.1,-4.0 км). По периферии цилиндра у его верхней границы задан контур водного питания: фиксированное состояние (T= +5 °C, Pb- гидростатическое+100 бар), на остальной поверхности кровли модели задается также фиксированное состояние (T= +5 °C, Pg- грунтовые воды +1 бар). Модель включает два основных домена – «проницаемые фильтрационные каналы» RESE* (проницаемость от 10^{-13} м^2 и выше) и «непроницаемые» вмещающие породы BASE (10^{-17} м^2). В кровле продуктивного резервуара (см. ниже) на расстоянии 2.2 и 4.1 км от центра модели задаются две разгрузки (VP и K) в режиме самоизлива («well on deliverabilty», PI=1.0E-11 m^3, Pwb=82 бар при z=650 м). Тепловое питание определено на подошве (-4 км) – кондуктивный тепловой поток 60 мВт/м2. Начальное распределение T и P – линейное возрастание с глубиной T=5-0.025*Z, P=6.0 - 0.1*Z (бар).

Проводящий домен RESR* состоит из субдоменов - цилиндрического канала разгрузки RESRD (r=100 м), области транзита - горизонтального диска в основании RESRT (M=100 м), области водного питания RESRR (внешнего цилиндра) и области аккумуляции термальных флюидов (продуктивный геотермальный резервуар) RESRP (радиусом ≈5 км и мощностью 500 м (диапазон глубин -400 м, -900 м).

Цель моделирования заключалась в сборке соответствующей указанной выше условиям радиально-цилиндрической (RZ) модели (на сетке 40 x 40), выяснение с применением моделирования возможности разгрузки с температурой 60ºС и расходом 60 кг/с (разгрузка VP) в течение интервала времени от 4000 до 6000 лет после начала функционирования гидротермальной системы.

Результаты моделирования (Задача 1)

Значения фильтрационно-ёмкостных свойств доменов, обеспечивающие формирование и поддержание естественной разгрузки Верхне-Паратунских источников, определены с применением прямого и инверсионного моделирования с применением программ PetraSim 5 (Rockware, 2023) и iTOUGH2 (Finsterle, 1999). Для калибровки модели использованы данные по естественной разгрузке В-Паратунской гидротермальной системы, указанные выше. Расчетные параметры модели указаны в табл. 1.

Таблица 1 – Фильтрационно-емкостные и теплофизические свойства доменов, заданные на модели. Примечание: расчетные параметры выделены полужирным шрифтом.

Материальные свойства	Домен модели					
	BASE	BASE2	RESRR	RESRT	RESRD	RESRP
Минеральная плотность, ρ, кг/м^3	2600					
Пористость, θ	0,1					
Проницаемость, k, м^2	10^{-17}	10^{-17}	**$3\cdot10^{-13}$**	**$1{,}1\cdot10^{-12}$**	**$3{,}72\cdot10^{-13}$**	**$3{,}85\cdot10^{-13}$**
Теплопроводность, λ, Вт/(м · °С)	2	**5**	2	2	2	2
Удельная теплоемкость, c, Дж/(кг · °С)	1000					
Сжимаемость, C, Па$^{-1}$	10^{-8}					

Постановка задачи 2 (Boundary Conditions)

Задача Bound Conditions является продолжением задачи Heat mining (см. выше), в этой задаче на модели оценивается эффект граничных условий на характеристики разгрузки из гидротермальной системы. А именно, на модели рассматривается влияние изменяющихся во времени граничных условий (1) На контуре водного питания, где задается гидростатическое давление Pb; (2) На кровле продуктивного резервуара, где

задается давление горизонта грунтовых вод Pg – на расход и температуру разгрузки (VP), заданной в режиме самоизлива (см. выше).

Исходные данные для калибровки модели по расходу и температуре разгрузок термоминеральных источников показаны на рис. 2. Для определения на модели изменяющихся во времени граничных условий Дирихле (Fixed State) используется метод, изложенный в PetraSimManual-4.pdf (стр. 70).

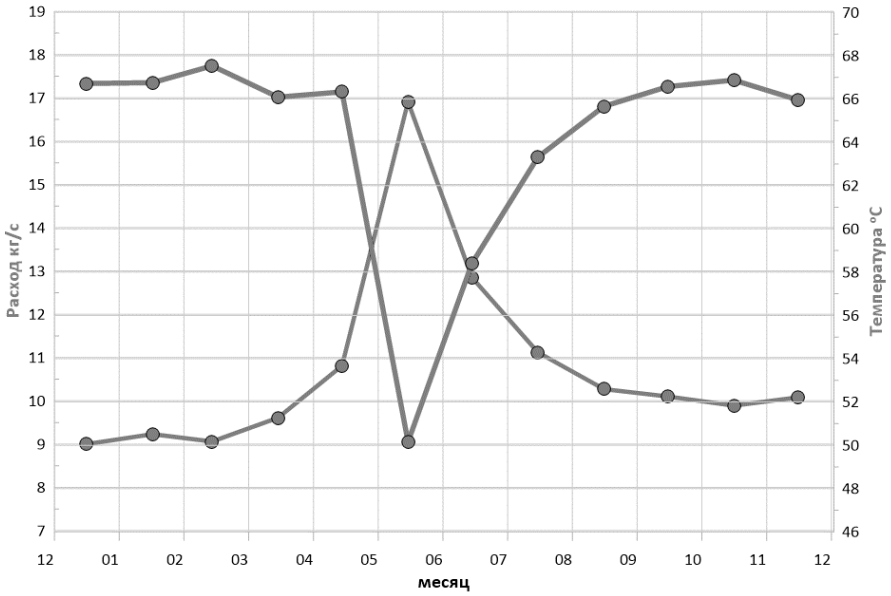


Рис. 2. Сезонное изменение разгрузки VP (Верхне-Паратунский источник) по данным (Мальцева и др., 1993).

Результаты моделирования (Задача 2)

Для калибровки модели потребовалась детализация зоны разгрузки VP в виде вертикального канала от кровли резервуара до области разгрузки, с заданным изменяющемся во времени давлением (time dependent Dirichlet boundary conditions).

В результате моделирования воспроизведены изменения наблюдаемых вариаций разгрузки гидротермальной системы: дебита термальных источников (рис. 2). Сезонные вариации контролируются циклическим увеличением давления на 10 бар в области разгрузки в период с июня по июль. Моделирование не выявило существенного влияния граничных условий, задаваемых в области водного питания, на параметры разгрузки гидротермальной системы.

Для калибровки модели по температуре потребовалось ее преобразование с учетом «двойной пористости» (MINC 3D, FS=100 m, FF=0.01).

Заключение

1. С применением термогидродинамического моделирования показана принципиальная возможность формирования циркуляционной гидротермальной системы в радиально-цилиндрической структуре (кальдера) диаметром около 15 км и глубиной циркуляции -3 км в течение первых тысяч лет с параметрами разгрузки близкими к оцениваемому диапазону разгрузок В-Паратунской гидротермальной системы (температура 60^{o}C и расход 60 кг/с). Ключевыми калибровочными параметрами модели являлись проницаемости каналов водного питания, латерального транзита на глубине -3 км, восходящей фильтрации и продуктивного резервуара (в диапазоне глубин от -1 до 0.5 км), а также величина теплопроводности фундамента (глубже -3 км).

2. Калибровка модели по данным природного сезонного изменения температуры и расхода разгрузки В-Паратунских источников (до начала эксплуатации) показывает наибольшую чувствительность разгрузки к изменениям давления во внутренней области

разгрузки, и отсутствие значимого влияния граничных условий в области внешнего водного питания. Сезонные изменения температуры разгрузки объясняются на модели с учетом двойной пористости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда «Исследования магмо-газо-водопроводящих систем активных вулканов» № 23-27-00127 (https://rscf.ru/project/23-27-00127/).

Список литературы

1. Журавлев Н. Б. Концептуальная модель теплового питания низкотемпературного геотермального месторождения без дополнительных тепловых источников // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2023), 4 – 10 сентября 2023 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. – с. 37-40.

2. Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф. «Гидрогеология вулканогенов» // С-Петербург, Наука, 2010, 395 с.

3. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем// Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. — 431 с

4. Манухин Ю. Ф., Ворожейкина Л. А. Гидрогеология Паратунской гидротермальной системы и условия ее формирования. В кн. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. — Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. — С. 143–178.

5. Отчет «Изучение режима подземных вод на участках опорной гидрогеологической сети, репрезентативном бассейне «Плотникова-Дальний». Многолетний отчет по изучению режима подземных вод на территории Камчатской области за 1986-1990 гг.» // ГГП «Камчатгеология»; рук. Мальцева К. И..; исполн. Нажалова И. Н., Раичева И. С. Термальный, 1993. – 230 с. Инв. № 5683

6. Arnason B. Hydrothermal Systems in Iceland Traced by Deuterium. Geothermics. 1976. Vol. 5. No. 1/4. P. 71–81.

7. Axelsson G., Gunnlaugsson E., Jonasson Th., Olafsson M. Low temperature geothermal utilization in Iceland — Decades of experience. Geothermics. 2010. No. 39. P. 329–338.

8. Bodvarsson G. Temperature/fl ow statistics and thermodynamics of low temperature geothermal systems in Iceland. J. Volcanol. Geotherm. Res. 1983. No. 19. P. 255–280.

9. Genter A., Baujard C., Cuenot N., et al. Geology, Geophysics and Geochemistry in the Upper Rhine Graben: the frame for geothermal energy use / European Geothermal Congress 2016 Strasbourg, France, 19–24 Sept 2016. 5 p.

10. PetraSim User Manual [Электронный ресурс]: Rockware, 2023. URL: https://www.rockware.com/downloads/documentation/petrasim/PetraSimManual.pdf (дата обращения: 26.02.2024)

11. Schill E., Genter A. EGS Geothermal Challenges within the Upper Rhine Valley based on Soultz Experience. Proc. Third European Geothermal Review, Mainz, Germany, June 24–26, 2013. 16 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОД РФ

Корзун А.В.[1,2], Паршикова Н.Г.[3], Харитонова Н.А.[1,4]
[1] *Геологический факультет МГУ им. Ломоносова М.В., a.korzun@oilmsu.ru*
[2] *ООО «Ижевский нефтяной научный центр», a.korzun@oilmsu.ru*
[3] *ООО «Газпром ВНИИГАЗ», N_parshikova@vniigaz.gazprom.ru*
[4]*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, tchenat@mail.ru*

Аннотация. В последние годы в Российской Федерации резко возрос интерес к извлечению полезных компонентов, в частности галогенов и редких щелочных элементов, из попутных промышленных вод нефтяных месторождений. В настоящей статье кратко освящена история изучения промышленных вод в России, показаны основные месторождения промышленных вод в Российской Федерации и дана оценка существующей нормативно-методической базы. Основное внимание уделено вопросам специфики оценки запасов промышленных вод на месторождениях углеводородов и возможности их использования в качестве гидроминерального сырья.

Ключевые слова: *промышленные воды, гидроминеральное сырье, полезные компоненты, месторождение, попутные воды нефтяных месторождений.*

Abstract. Currently, in the Russian Federation, the interest in industrial implication of useful components, especially halogens and rare alkaline elements, from brines located within oil and gas fields have significantly increased. This article summarizes the previous development of industrial waters, describes the main reservoirs and assesses the existing regulations and methodological framework in Russia. The main attention is highlighted new utilization techniques, trends, and sustainable development of the brine accomplished oil and gas deposits.

Key words: *industrial waters, hydromineral resource, useful components, reservoir, produced water of oil field.*

Во всем мире начиная с 90-х годов прошлого века наблюдается значительный интерес к извлечению ряда полезных ископаемых, преимущественно галогенов и щелочных металлов, из гидроминерального сырья (часто используется термин промышленные воды). Необходимость извлечения компонентов из воды проявилась в связи с истощением некоторых типов месторождений традиционных полезных ископаемых, а также с увеличившейся потребностью человечества в таких компонентах как литий, цезий, редкоземельные элементы и др. Кроме того, гидроминеральные месторождения часто более экономически выгодны при их эксплуатации в сравнении с традиционными месторождениями.

Одним из наиболее востребованных объектов для эксплуатации являются подземные промышленные воды глубоких горизонтов крупных артезианских бассейнов платформ, предгорных и межгорных впадин.

История изучения промышленных вод в России началась в конце XIX века с момента открытия нефтяных месторождений Апшеронского полуострова. Позже в годы Великой отечественной войны, было разведано и началась эксплуатация йодобромных подземных вод на Краснокамском нефтяном месторождении в Пермской области (добыча прекращена в 2008 году) и бромных рассолов озера Кучук на юге Западной Сибирской низменности в Алтайском крае. Позднее были составлены обзорные карты промышленных подземных вод страны в масштабах от 1:10 000 000 до 1:2 500 000.

В 1958-70-х было разведано Тюменское месторождение промышленных йодных вод (46,8 % общероссийских запасов) с суммарными запасами готерив-барремского водоносного комплекса 184,3 тыс. м3/сут и потенциалом до 5 тыс. т/год йода. Месторождение включает четыре участка с разной степенью изученности Тобольский, Черкашинский, Сергеевский и Инжуринский. В настоящее время месторождение не эксплуатируется в связи с нерешенным вопросом об утилизации отработанных подземных вод.

Разведанное позднее Славяно-Троицкое месторождение в Краснодарском крае в границах Азово-Кубанского артезианского бассейна эксплуатировалось до 2013 г. Однако, ввиду низкой рентабельности в условиях конкуренции с зарубежной продукцией, в первую очередь из Азербайджана и Туркмении, эксплуатация вод на месторождении была приостановлена. Помимо стоимости добычи йода причинами закрытия являлись повышенная радиоактивность промышленных вод месторождения, а также выпадение солей в трубах.

В 2001-2002 гг. были оценены запасы йодных вод на участках Бобровский и Лапоминском Северо-Двинского месторождения. Одновременно в Астраханской области было разведано два месторождения промышленных подземных вод – Астраханское и Леонидовское. Астраханское месторождение расположено в Красноярском районе, оцененные запасы промышленных подземных вод по апшеронскому водоносному горизонту составляют 31,8 тыс. м3/сут и Леонидовское месторождение, расположенное в Наримановском районе, имеет запасы по апшерон-акчагыльскому водоносному комплексу 10,5 тыс. м3/сут (229 т/год готового продукта). Однако все запасы были отнесены к забалансовым, сейчас месторождения не эксплуатируются. В 2014 годах в состав России вошел Крым, где расположено разведанное в 1967-72 гг. Северо-Сивашское месторождение промышленных вод с утвержденными запасами йодных вод в количестве 33,6 тыс. м3/сут, а также два завода по производству йода, выработка добыча на которых в 2016 году не превышала первых тонн.

Крупной региональной работой (2008 г.) являлось создание «Схематической карты провинций и месторождений промышленных вод РФ» масштаба 1:2 500 000 (ответственный исполнитель Куренной В.В.). В качестве основных промышленных компонентов подземных вод для любой территорий страны были выбраны йод и бром, а для отдельных регионов – поваренная соль. В качестве перспективных элементов первой очереди рассмотрены стронций, бор, литий, рубидий, цезий, а к элементам отдаленной перспективы извлечения отнесены рений, таллий, скандий и другие редкие элементы.

В последние годы в Восточной Сибири, преимущественно в Ангаро-Ленском и Тунгусском артезианских бассейнах, проводятся разномасштабные комплексные работы по изучению и оценке запасов промышленных редкометалльных подземных вод.

Анализ совокупности накопленных данных по геологическому строению и гидрогеологическим условиям территории России позволил выделить в пределах нефтегазоносных провинций ряд территорий, перспективных для локализации промышленных подземных вод – Республика Крым, Республика Дагестан, Ставропольский край, Краснодарский край, Астраханская, Саратовская, Архангельская, Оренбургская, Иркутская области, нефтегазоносные площади Западной Сибири (рис. 1).

Стоит отметить, что единой универсальной классификации гидроминерального сырья до сих пор не существует. Первая классификация промышленных вод и кондиций в части минимальных концентраций полезных компонентов была предложена в 1955 году Плотниковым Н.А. Данная классификация учитывала кларковые содержания некоторых рассеянных элементов в земной коре, их концентрации в водах суши и морской воде, а также установленные к тому времени предельные концентрации специфических компонентов в водах лечебного назначения. В дальнейшем кондиции были расширены на концентрации мешающих компонентов, максимальной глубину залегания уровня, предельного понижения, минимального дебита скважины и водозабора и т.д. Эти ориентировочные кондиционные требования были определены к месторождениям промышленных вод, расположенных в разных артезианских бассейнах [1]. В результате, к концу 90-х годов были обоснованы минимальные концентрации для 20 полезных компонентов для месторождений промышленных вод, которые вплоть до настоящего времени не пересматривались. Эти же минимальные концентрации применялись и для месторождений с попутно добываемых промышленных вод. Кроме того, промышленные воды не оценивались для извлечения более редких компонентов (литий, стронций и др.)

в связи с отсутствием экономически эффективных технологий их промышленного извлечения и, как следствие, неконкурентоспособной себестоимостью продукции.



Рис. 1. Перспективные территории для локализации месторождений промышленных подземных вод

Вся нормативно-правовая и методическая база была разработана еще в СССР 1970–90-е годы как по изучению собственно промышленных подземных вод [2], так и для попутных промышленных вод нефтяных месторождений [3, 4]. В последующие 30 лет работ по составлению нормативных и методических документов не проводилось. И только в 2023 году были актуализированы и прошли ЭТС ФБУ «ГКЗ» РФ «Методические рекомендации по оценке запасов полезных ископаемых, не относящихся к углеводородному сырью из подземных вод извлечение которых связано с разработкой месторождений УВС» и впервые разработаны «Методические рекомендации по оценке запасов промышленных подземных вод на Ковыктинском участке недр».

Фактический материал показывает, что по содержанию полезных компонентов подземные воды, попутно добываемые при разработке нефтяных, газовых и газонефтяных месторождений, являются комплексным гидроминеральным сырьем, содержат значительные концентрации полезных компонентов, превышающих принятые минимальные значения, и могут рассматриваться как промышленные. Причем затраты на подъем попутных промышленных вод полностью входят в затраты на освоение и разработку месторождений УВС, что приводит к резкому снижению себестоимости получения конечного товарного продукта и повышению рентабельности. Например, для территории Татарстана рентабельными становятся концентрации лития ≈ 8–9 мг/л. Для ряда месторождений Самарской области выполнена оценка запасов промышленных вод при изменяющихся за время разработки месторождения концентрациях лития с 14,2 до 2,7 м/л, йода с 6,9 до 1,3 мг/л, брома с 354 до 67,0 мг/л [6].

Отличительной особенностью работ по оценке запасов промышленных попутных вод является оценка времени эксплуатации, дебитов добывающих скважин и всего месторождения техническим проектом разработки месторождения УВС. Поэтому нет необходимости в дополнительных обоснованиях и проведении специализированных ОФР. Наиболее перспективными, на наш взгляд, будут являться месторождения нефти со значительной обводненностью и, соответственно, с максимальными объемами попутно добываемой воды. В таких условиях, анализ гидрогеохимических условий должен акцентироваться на изначальной плановой и вертикальной неоднородности распределения концентраций полезных компонентов и их пространственно-временной

изменчивости в процессе разработки месторождения УВС. Усложняющим фактором при прогнозе качества промышленных вод является часто применяемая на месторождениях УВС система поддержания пластового давления (ППД). Причем для ППД могут использоваться поверхностные воды, воды после извлечения полезных компонентов, воды выше- и нижезалегающих пластов, смеси этих вод в различных пропорциях, что делает обоснование концентраций полезных компонентов в этих водах не тривиальной задачей.

В Методических рекомендациях 2023 г. в случае применения систем ППД с заменой более 0,2 поровых объемов нефтенасыщенной части объекта, а также, в отдельных случаях, для месторождений с длительным периодом эксплуатации, при прогнозе изменения концентраций полезных компонентов предлагается использование модуля «трассер» в адаптированной гидродинамической модели (ГДМ) месторождения УВС. При выполнении расчетов «трассером» помечается закачиваемая вода. При этом адаптация ГДМ по дебитам воды добывающих скважин проводится с использованием, так называемого «аквифера» (виртуального водоносного горизонта с неограниченной емкостью), как правило, стратиграфически и пространственно не привязанного (рис. 2). Это усложняет процесс задания концентраций полезных компонентов в воде из «аквифера». На рис. 2 приведен пример залежи эксплуатируемой с системой ППД и заданием «аквифера» ниже нефтеносного пласта для снижения невязки дебитов воды по добывающим скважинам, посредством непосредственного подтока воды в скважины. Так как «аквифер» не привязан ни к какому элементу разреза и концентрации полезных компонентов в нем не известны, то они могут быть определены только исходя из общегеологических представлений.

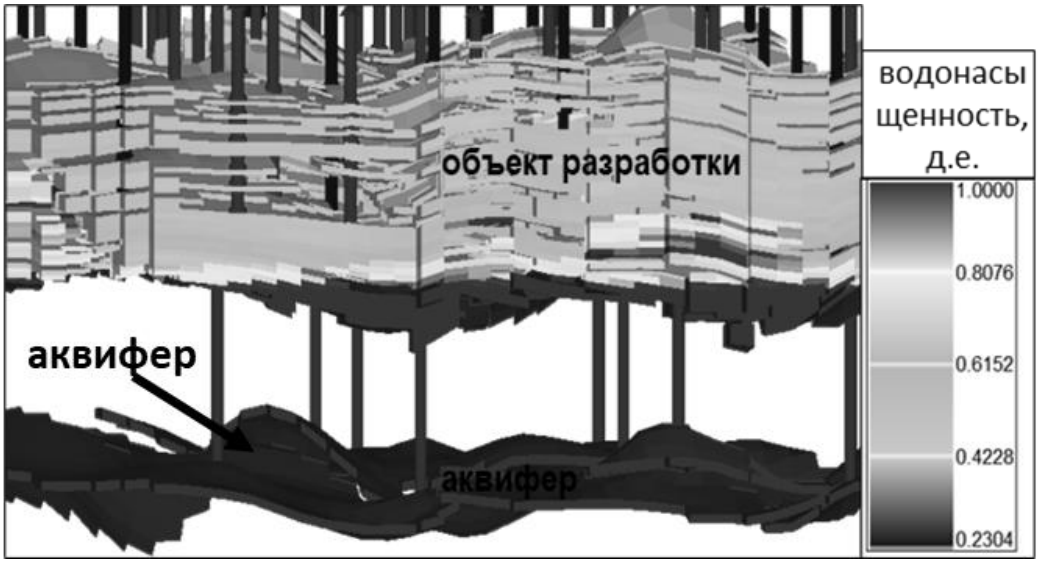


Рис.2. Пример задания аквифера

В Российской Федерации подземные воды с наиболее высокими концентрациями брома, лития, стронций и т.д. распространены в межсолевых горизонтах Прикаспийской впадины и Восточной Сибири, в частности Ангаро-Ленском артезианском бассейне. По содержанию полезных компонентов (в частности, лития) иркутские рассолы уступают только Салару-де-Атакама (Боливия). Иркутские рассолы — это рапа с минерализацией более 570 г/л, плотностью до 1,42 г/см^3 и содержанием полезных компонентов выше минимальных промышленных кондиций (табл. 1). Наиболее перспективными в качестве добычи гидроминерального сырья в Оренбургской области являются подземные воды, приуроченные к высоко битуминозным известнякам сакмарского яруса нижнего отдела пермской системы. Оренбургские рассолы имеют

минерализацию 300 г/л, плотность 1,2 г/см^3 и повышенные содержания полезных компонентов (табл. 1).

Геолого-тектонические и гидрогеологические условия Ангаро-Ленского артезианского бассейна характеризуются крайней сложностью, что выражается в неравномерности распространения рапоносных участков и наличии в разрезе зон интенсивного поглощения промывочной жидкости от 4-20 м^3/ч до полного и зон аномально высокого пластового давления (АВПД) с мощным изливом рапы дебитом от 4000 до 7200 м^3/сут. [7]. Притоки предельно-насыщенных рассолов с максимальной концентрацией полезных компонентов приурочены к резервуарам галогенно-карбонатной толще каверново-трещинных кембрийских отложений бельской и усольской свит [6-8]. Важной задачей являются поиски прямых и косвенных методов, позволяющих выявить и проследить в геологическом пространстве карбонатного разреза кембрия осадочного чехла, помимо водонасыщенного коллектора в традиционном понимании этого слова (например – осинский горизонт), вторичную водопроводящую емкостную среду тектонического генезиса с АК–АВПД параметрами.

Таблица 1. Содержание ценных компонентов (мг/дм^3) в рассолах Восточной Сибири и Прикаспийской впадины (Оренбургская область)

Наименование компонентов	Промышленная концентрация (кондиция)	Рассолы Восточной Сибири	Рассолы Оренбургской области
Йод (I)	18	1,27 – 6,40	21,3 – 42,3
Бром (Br^-)	250	2133 – 12600	2150 – 5000
Бор (B)	200	15 – 390	255 – 665
Литий (Li^+)	10	43 – 650	26 – 600
Рубидий (Rb^+)	3	2,5 – 36,8	7,7 – 12,4
Стронций (Sr^{2+})	300	2557 – 9300	560 – 2125
Магний (Mg^{2+})	100	9728 – 38590	1200 – 26000
Калий (K^+)	1000	3582 – 20714	1320 – 22500

Однако при всей привлекательности использования промышленных вод и попутных промышленных вод месторождений УВС существует несколько важных проблем, требующих скорейшего решения: 1. Необходима актуализация кондиций с учетом перспективных технологий извлечения полезных компонентов и экономических реалий страны; 2. Необходимы методические подходы к проведению геологоразведочных работ по поискам и разведке, а также оценке запасов промышленных вод с учетом существующего многообразия и особенностей геолого-структурных и гидрогеологических условий месторождений промышленных вод; 3. Отсутствие обоснованных подходов к прогнозу изменения качества промышленных вод и концентраций полезных компонентов в процессе разработки месторождений.

Список литературы

1. Бондаренко С.С., Лубенский Л.А., Куликов Г.В. Геолого-экономическая оценка месторождений подземных промышленных вод. М.: Недра, 1988 г – 203 с.

2. Бондаренко С.С., Боревский Л. В., Ефремочкин Н.В., Плотников Н.А., Стрепетов В.П. Изыскания и оценка запасов промышленных вод. Методическое пособие. М.: Недра, 1971

3. Временные рекомендации по обоснованию запасов попутных вод нефтяных месторождений в качестве минерального сырья. Составители: М.В. Ефремочкин, Р.И.Иовчев, А.А. Бездетный. – М., 1985

4. Временные требования к изучению и подсчету запасов попутных вод нефтяных и газонефтяных месторождений как источника гидроминерального сырья. Составители: М.В. Ефремочкин, Р.И.Иовчев, В.Ф. Небосенко. – М.: ГКЗ, 1992. – 12 с.

5. Балашов Л. С., Галицын М. С., Ефремочкин Н. В. Методические рекомендации по геохимической оценке и картированию подземных редкометальных вод. М., ВСЕГИНГЕО, 1977.

6. Соложенкина Е.К., Федоткина О.С., Бондарева Л.В., Демин С.В. О возможном потенциале попутных пластовых вод – как источника гидроминерального сырья// Геология и недропользование. №4(8) 2022г – с. 106-112.

7. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы (по данным глубокого бурения, испытания скважин и полевой геофизики: монография). Иркутск: ИРНИТУ, 2015. 247 с.

8. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и концепция освоения промышленных рассолов (на примере юга Сибирской платформы): Автореф. дис. докт. геол.-минерал.наук. М., 2009.

РОЛЬ НОВЕЙШЕЙ ТЕКТОНИКИ В ФОРМИРОВАНИИ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Ланкин Ю.К., Наумова О.О., Верхозина Е.С.
Иркутское отделение Сибирского регионального центра Государственного мониторинга состояния недр, филиал ФГБУ «Гидроспецгеология», Иркутск, yur-lankin@yandex.ru

Аннотация: Формирование естественных ресурсов подземных вод на юге Сибирской платформы связано с новейшими тектоническими условиями, обусловившими образование бассейнов речного и подземного стока. Постоянно действующая речная сеть в меженные периоды существует за счет разгрузки в нее подземных вод, контролируя распределение их гидростатических напоров. Формы изменения поверхности гидростатических напоров в определенной степени повторяют крупные формы земной поверхности и зависят от геолого-структурных условий территории. Территории с водовмещающими породами, имеющими низкие фильтрационные показатели, обычно бывают заболочены, с высокими – глубоко-дренированными. Сочетание пликативных тектонических дислокаций и морфоструктур ограничивают обводненные геологические тела сверху и снизу с определенным литологическим составом водовмещающих пород и содержанием соответствующего объема естественных ресурсов. Получение и анализ таких сведений, в значительной степени повышает информативность гидрогеологических исследований при поиске и разведке подземных вод.

Ключевые слова: *бассейны речного и подземного стока, гидростатические напоры, морфоструктуры, пликативные дислокации.*

Abstract: The formation of natural groundwater resources in the south of the Siberian Platform is associated with recent tectonic conditions that determined the formation of river and underground drainage basins. A constantly operating river network during low-water periods exists due to the unloading of groundwater into it, controlling the distribution of their hydrostatic pressures. The forms of changes in the surface of hydrostatic pressures to a certain extent repeat the large forms of the earth's surface and depend on the geological and structural conditions of the territory. Territories with water-bearing rocks that have low filtration rates are usually swampy, while those with high ones are deeply drained. The combination of plicative tectonic dislocations and morphostructures limit watered geological bodies from above and below with a certain lithological composition of water-bearing rocks and the content of a corresponding volume of natural resources. Obtaining and analyzing such information significantly increases the information content of hydrogeological studies in the search and exploration of groundwater.

Key words: *river and underground drainage basins, hydrostatic heads, morphostructures, plicative dislocations.*

Подземные воды являются самым подвижным компонентом литосферы. Их распределение в осадочной толще юга Сибирской платформы зависит от пространственной изменчивости водовмещающих пород. Формирование водовмещающих пород происходило в течение длительного тектонического времени, начиная с этапов седиментации, постседиментационного преобразования и современного рельефообразования.

Этапы седиментации характеризуются накоплением осадков различного генезиса, состава и сложения в зависимости от конседиментационных условий территории.

Этапы постседиментационного преобразования включают диагенетические изменения осадков, их пликативные и дизъюнктивные деформации.

Этапы современного рельефообразования относятся к новейшей тектонике. В процессе новейшей тектоники также происходило диагенетическое преобразование осадочной толщи, была частично обновлена тектоническая структура осадочного чехла, появились новые современные пликативные и дизъюнктивные дислокации. Сибирская платформа в этот период подверглась в значительной степени денудации. Осадконакопление имело подчиненное значение и происходило преимущественно в пределах отрицательных неотектонических дислокаций.

Новейшая тектоника явилась завершающей стадией формирования гидрогеологических коллекторов, следствие чего находит отражение в современном состоянии гидрогеологических условий юга Сибирской платформы [1]. Это обусловлено следующими причинами:

В зону инфильтрации атмосферных осадков были выведены геологические тела, которые в настоящее время определяют характер подземного стока.

Современное состояние гидрогеологических коллекторов осадочной толщи связано с характером разгрузки неотектонических напряжений. Например, если в геологическое время дизъюнктивная дислокация была раскрытой, то в неотектоническом времени она может быть обновлена или не обновлена. Если дислокация обновлена, то в настоящее время является хорошим гидрогеологическим коллектором, если же не обновлена, то может себя никак гидрогеологически не проявлять или в зависимости от заполнителя может быть либо менее проницаемой, чем окружающие породы, либо иметь свойства водоупора. Тоже самое касается и пликативных дислокаций. Например, если в геологическое время в процессе образования антиклинали, в ее своде была сформирована повышенная трещиноватость, то в новейшее время при совпадении ее с отрицательной неотектонической дислокацией трещиноватость будет закрыта и, наоборот, при совпадении с положительной дислокацией открыта. Кроме того, характер разгрузки неотектонических напряжений повлиял на перераспределение ресурсов подземных вод глубоких горизонтов, нефти и газа.

Дренирование подземных вод предопределяет рельеф, образующий гидростатические напоры (градиент разницы напоров) в преломлении с проницаемостью водовмещающих горных пород.

Постоянно действующая речная сеть юга Сибирской платформы в значительной степени обязана своим существованием подземному стоку (особенно в меженный период). Реки заложены преимущественно по системе дизъюнктивных дислокаций, вследствие чего гидростатические напоры могут действовать на значительную глубину. Урезы воды в реках имеют абсолютные отметки, различающиеся на сотни метров. Разница гидростатических напоров рек вызывает также восходящее дренирование подземных вод (пресных, соленых, рассолов), залегающих значительно ниже базиса дренирования.

Любое геологическое тело, содержащее подземные воды (гидрогеологическое тело), имеет границы. Нижняя граница, как правило, принимается по подошве или кровле геологической дислокации, обычно по водоупорной или слабопроницаемой толще [2, 3]. Верхней же границей является рельеф или неотектоническая дислокация. Выделенное таким образом геологическое тело относится в разряд морфоструктур. Морфоструктуры представляют собой единую водонапорную систему с определенными условиями формирования, транзита и разгрузки подземных вод.

Таким образом, новейшая тектоника явилась одним из главных факторов в современном формировании ресурсов подземных вод юга Сибирской платформы.

Наиболее наглядным результатом новейшей тектоники является рельеф. Рельеф в значительной степени регулирует современный подземный сток. Питание поверхностного и подземного стока осуществляется за счет атмосферных осадков. Во время их выпадения в жидкой или твердой фазе, и затем в процессе таяния, происходит инфильтрация определенной части осадков, которую могут принять горные породы, остальная же большая часть стекает по эрозионной сети. Вследствие инфильтрации в недрах в течение длительного времени накоплены значительные ресурсы подземных вод, которые в меженные периоды года питают поверхностный сток (реки) [4]. Поверхностный сток неравномерно распределен по долинам разного порядка. Продольный профиль рек имеет увеличение уклона от низовьев к верховьям. Крупные реки обладают более пологим продольным профилем, чем мелкие. Чем меньше река, тем более крутой продольный профиль для нее характерен [5]. В соответствии с законом преломления геофильтрационного потока следует, что подземный сток, реализующийся в мелкие реки, формируется в менее проницаемых коллекторах, чем сток, реализующийся в более крупные реки. При высокой проницаемости водовмещающих пород мелкие и средние долины являются сухими. В процессе гидрогеологических исследований юга Сибирской платформы установлена количественная связь подземного стока и порядков долин дрен (рек). Порядок долин принимался по классификации В.П. Философова [6, 7, 8].

Поверхностный сток достаточно хорошо проявляет себя в рельефе в виде различных водоемов, размеры которых и объем содержащейся в них воды возможно непосредственно измерить в любом месте. Сложнее дело обстоит с подземным стоком, так как для изучения подземных вод необходимо бурение скважин, которые в целом несут точечную информацию, так как водовмещающие горные породы могут иметь изменчивость, как в плане, так и в разрезе. Эту изменчивость можно оценить только с помощью бурения и комплекса геофизических работ. Морфологическую же изменчивость рельефа возможно увидеть непосредственно на местности, а значит оценить изменчивость поверхностного стока. Изучение поверхностного стока более доступно и достоверно чем подземного. Информация же, получаемая при изучении подземного стока, в большой степени зависит от технологии проведения геологоразведочных работ.

Объем разгрузки подземных вод в гидросеть различного порядка зависит от коллекторских свойств водовмещающих пород и характера гидрогеологического разреза. Меженный поверхностный сток вполне может характеризовать изменчивость гидрогеологических условий и дать характеристику условий формирования подземных вод.

Изучение рельефа (в соотношении с геологическим строением), как границы раздела атмосферы, гидросферы, и литосферы в значительной степени повышает информативность гидрогеологических исследований, так как новейшая тектоника оказала определяющее значение в формировании ресурсов подземных вод юга Сибирской платформы, унаследуя предшествующие периоды тектогенеза.

Список литературы

1. Лунева Т.Е., Ланкин Ю.К. Морфотектонические условия локализации ресурсов подземных вод в Ангаро-Ленском артезианском бассейне. XVIII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока, Иркутск, 2006, с.281-284.

2. Пиннекер Е. В., Писарский Б. И., Шварцев С. Л., Богданов Г. Я., Борисов В. Н., Караванов К. П. Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология. Новосибирск: Наука, 1980. 225-с.

3. Зекцер И.С., Бондаренко С.С., Боревский Л.В., Гавич И.К., Дзюба А.А., Ковалевский В.С., Пиннекер Е. В., Язвин Л.С. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983

4. Пиннекер Е. В., Писарский Б. И., Шенькман Б.М., Дзюба А.А., Кустов Ю.И., Стругов Е.А, Хаустов А.П., Куликов М.Ю. Естественные ресурсы подземных вод юга Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1976, 126-с.

5. Кизельватер Д.С., Раскатов Г.И., Рыжова А.А. Геоморфология и четвертичная геология

(геоморфология и генетические типы отложений), «Недра», Москва, 1986

6. Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур // Издательство Саратовского университета. Саратов, 1960. -19-27, 35с.

7. Философов В. П. Применение карт базисной поверхности для выявления современных тектонических движений. Научный ежегодник за 1955г. Саратовский университет, геологический факультет, Саратов, 1959.

8. Философов В.П. Порядки долин и их использование при геологических исследованиях. Научный ежегодник за 1955 г. Саратовский университет, геологический факультет. Саратов, 1959.

МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА В ПОДЗЕМНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОДАХ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

Лебедева Е.Г.[1], Брагин И.В.[2], Харитонова Н.А[3].

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, microbiol@mail.ru

[2]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, bragin_ivan@mail.ru

[3]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, tchenat@mail.ru

Аннотация. Показано, что для каждого геохимического типа подземных минеральных вод характерно преобладание определенных таксономических групп бактерий, что связано с разным химическим составом минеральных вод и водовмещающих пород. Выделенные чистые культуры гетеротрофных микроорганизмов обладали высокой внеклеточной ферментативной активностью и были способных расти в широком диапазоне температур, pH, концентрации NaCl, что делает их перспективными для применения в сфере биотехнологии.

***Ключевые слова**: подземные воды, бактерии, таксономические группы, численность, ферментативная активность.*

Abstact. It was shown, that each geochemical type of underground mineral water was characterized by the predominance of certain taxonomic groups of bacteria, which is associated with the different chemical composition of mineral waters and water-bearing rocks. The isolated pure cultures of heterotrophic microorganisms had high extracellular enzymatic activity and were able to grow in a wide range of temperatures, pH, and NaCl concentrations, which makes them promising for use in biotechnology.

***Key words**: groundwater, bacteria, taxonomic groups, abundance, enzymatic activity.*

На территории Дальнего Востока, которая характеризуется сложным геологическим строением, сконцентрированы значительные ресурсы минеральных подземных вод. В последние десятилетия химический состав минеральных вод Дальнего Востока и их генезис были изучены достаточно детально, однако механизмы формирования многих геохимических типов вод все еще остаются не раскрытыми [6]. Генезис минеральных вод обычно связывают с взаимодействием подземных вод с горными породами, газами и органическими веществами. Менее разработанными в гидрогеологии являются вопросы микробиологических процессов, также протекающих в подземной гидросфере. Работы последних лет показывают, что микроорганизмы активно изменяют гидрогеохимическую систему и частично преобразовывают физико-химические свойства подземных вод и пористое пространство водовмещающих пород. В местах излива подземных вод могут формироваться микробные маты, которые являются уникальным природным сообществом микроорганизмов и осуществляют сложные геохимические преобразования. Таким образом, изучение микробных

сообществ, населяющих различные подземные воды и микробные маты, представляет несомненный интерес.

В связи с этим целью работы являлось изучить распределение, разнообразие и некоторые физиолого-биохимические свойства микроорганизмов в термальных, углекислых и соленых подземных водах Дальнего Востока России.

Для реализации цели поставлены следующие задачи:

1. Изучить численность различных физиологических групп микроорганизмов в подземных водах и микробных матах

2. Исследовать таксономический состав доминирующих культивируемых гетеротрофных бактерий в подземных водах и микробных матах

3. Оценить метагеномный состав бактерий в разных типах подземных вод с использованием секвенирования на платформе Illumina MiSeq.

4. Изучить внеклеточную ферментативную активность и некоторые физиолого-биохимические свойства культивируемых представителей гетеротрофных бактерий), выделенных из подземных вод и микробных матов.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись термальные, углекислые и соленые подземные воды, расположенные в Дальневосточном регионе. Кульдурское месторождение термальных вод (Кульдур, скважина 3-87, t=61 ^{0}C). располагается во внутриконтинентальной части юга Дальнего Востока, в районе поселка Кульдур Еврейской автономной области. Соленые подземные воды проявления Речица локализованы в Приморском крае в прибрежной части Уссурийского залива (бухта Суходол), в пределах Партизанской впадины Южно-Приморского прогиба (скважина №2 ПР, глубина 300 м). Проявления холодных минеральных углекислых вод Глуховское и Раковское расположены на юге Приморья в Уссурийском районе. К отличительным чертам Кульдурских вод относятся: высокая температура (64–73 ^{0}C), низкая минерализация (варьирует от 0,22 до 0,38 г/л), щелочная среда (pH меняется в диапазоне 7,82–9,7). По химическому составу воды преимущественно гидрокарбонатные натриевые и обогащены фтором, кремнием, алюминием и другими элементами. Характерными особенностями рассолов проявления Речица (скважина № 2 ПР) является минерализация не ниже 29-50 г/л, повышенные концентрации кальция, магния и сульфат-иона. В составе свободного газа преобладает N_2 (25–70 об.%), CO_2 (30–70 об.%) и O_2 (2–11 об.%), метан и его гомологи (CH_4 – 1025–17738 нл/л). Глуховские минеральные воды относятся к углекислым гидрокарбонатным магниево-кальциево-натриевым водам. Минерализация углекислых вод этого месторождения составляет 0,48–0,55 г/л. В катионном составе преобладают натрий, калий, кальций, железо. Углекислые воды Раковского месторождения характеризовались температурой 10-12^{0}C, pH вод кислый и составляет 4,19–4,47. По химическому составу воды гидрокарбонатно-кальциевые с минерализацией 0,2–0,46 г/л с повышенным содержанием железа.

Пробы минеральных вод отбирали в стерильные стеклянные бутыли объемом 750 мл, образцы микробных матов собирали в одноразовые контейнеры. До обработки в лаборатории образцы хранили в холодильнике при 4 ^{0}C не более 12 часов. Для подземных вод с целью концентрирования бактерий производили фильтрацию подземных вод на мембранные фильтры (0,2 мкм, 47 мм диаметр) с последующим их наложением на различные селективные среды., получая единичные колонии. Для определения численности физиологических групп и культивирования бактерий использовали традиционные методы практической микробиологии. Бактерии выращивали в термостате при различных температурах в течение 7–30 суток. Выделение чистых культур гетеротрофных микроорганизмов производили посевом на чашки Петри методом истощающего штриха [3, 5].

Биомассу, полученную от единичных колоний, стерильно собирали для проведения молекулярно-генетического анализа гена 16S РНК. Пробы вод

для метагеномных исследований и последующего выделения ДНК отбирались из скважин путем фильтрации 5-10 л подземных вод (фильтры с размером пор 0,2 мкм). Полученные влажные фильтры с микробной биомассой упаковывали в стерильные пластиковые пробирки типа «Фалькон» и покрывали стерильным буфером для фиксации ДНК. Внеклеточную ферментативную активность, а также физиолого-биохимические свойства выделенных бактерий изучали стандартными методами [4].

Результаты и обсуждения

Результаты исследований показали, что в минеральных водах отмечена невысокая численность физиологических групп бактерий, достигающая максимум $9{,}1\times10^3$ кл/мл. Выявлены существенные различия в распределении численности и составе доминирующих физиологических групп бактерий, формирующихся в термальных, соленых, углекислых минеральных водах. Наименьшее количество бактерий различных функциональных групп отмечено в термальных водах Кульдур, что связано с высокой температурой вод (64-71 ^{0}C). Низкое количество бактерий отмечалось также нами ранее (Калитина и др., 2017)., что подтверждают низкие концентрации органического углерода, отмеченные другими авторами в термах Кульдур [2]. Во всех изученных скважинах термальных вод значительно преобладали тионовые бактерии, при этом наибольшая их численность выявлена в скважине 3-87 ($1{,}2\text{-}4{,}9\times10^2$ кл/мл). Также доминирование тионовых бактерий обнаружено в углекислых водах Глуховского месторождения и рассолах [7]. Известно, что тионовые бактерии являются хемолитоавтотрофами и способны в анаэробных условиях окислять восстановленные соединения серы с дальнейшим образованием серной кислоты.

В месторождении углекислых вод Раковское отмечена более высокая численность силикатных, сульфатредуцирующих, автотрофных железоокисляющих и марганец окисляющих бактерий. В подземных рассолах количество бактерий не превышало $9{,}1\times10^3$ кл/мл, при этом обнаружено значительное преобладание по численности хемолитоавтотрофных тионовых и железоокисляющих бактерий, что указывает на протекание в подземных водах биогенных процессов окисления железа и восстановленных соединений серы.

В результате проведения исследований из подземных вод и микробных матов было выделено 30 культур доминирующих гетеротрофных микроорганизмов, проведена их идентификация с помощью молекулярно-генетических методов. Показано, что в подземных водах среди гетеротрофной культивируемой микрофлоры существенно преобладали бактерии рода Bacillus. В термальных подземных водах Кульдур также отмечено присутствие экстремофильных микроорганизмов рода: Paenibacillus, Kocuria, Wiliamsia. Для углекислых подземных вод месторождения Глуховское было характерно присутствие бактерий рода Bacillus и Brevibacterium. В более кислых водах Раковского месторождения отмечены бактерии рода Pseudomonas, Stenotrophomonas, Achromobacter и Rhodococcus. В подземных рассолах показано присутствие микроорганизмов рода Bacillus, Paenibacillus, Brevibacterium. В циано-бактериальных матах, формирующихся на выходе подземных вод преобладали бактерии рода Bacillus, а также Brucella, Rhodococcus и галофильные Pseudalkalibacillus.Все выделенные бактерии часто встречаются в объектах окружающей среды.

По результатам метагеномного секвенирования и первичного филогенетического профилирования микробных сообществ по гену 16 S РНК обнаружено, что в термальных водах Кульдур (скважина 3-87) в доминанте отмечены термофильные бактерии семейств Aquificaceae (16,9%), Thermaceae (15,4%), Rhodothermaceae (4,9%). На уровне рода преобладали микроорганизмы Hydrogenobacter (16,9%), Thermus (14,6%), Rhodothermus (4,6%). Данные бактерии часто обнаруживают в различных экстремальных местообитаниях, в том числе термальных источниках.

Подземные рассолы характеризовались наибольшим разнообразием таксонов бактерий, здесь также отмечено более высокое количество архей (0,9%) из порядка

Hadarchaeales, семейства Methanomassiliicoccaceae, родов Methanosaeta, Methanobacterium.

В подземных водах обнаружены разнообразные таксоны железобактерий, гетеротрофной микрофлоры, микроорганизмов геохимического цикла серы, метанобактерий. Среди железобактерий значительно доминировали автотрофные бактерии рода Gallionella, которые составляли 55% от всего микробного сообщества, также выявлены микроорганизмы рода Siderooxidans (5,9%), Rhodoferax (4,01%), Crenothrix (0,7%), Ferribacterium (0,2%), которые способны окислять и восстанавливать железо в анаэробных условиях.

В месторождении углекислых вод Глуховское значительно доминировали матообразующие некультивируемые сульфидокисляющие бактерии семейства Thiotrichaceae, которые составляли 61% от всего микробного сообщества, а также хемолитоавтотрофные серобактерии родов Thiomicrospira (8,8%), Roseovarius (3,5%), и железоокисляющие микроорганизмы рода Gallionella (3,3%). В более кислых водах Раковского месторождения обнаружены в доминанте факультативно анаэробные, психротолератные, медленно растущие железовосстанавливающие бактерии рода Rhodoferax, доля которых составляла 82%. Также преобладали железоокисляющие бактерии рода Siderooxydans (2,4%) и Gallionella (1,6%), и автотрофные серобактерии рода Sulfuritalea, Sulfurispirillum, с доминированием Sulfurimonas – 3,1%.

Выделенные штаммы были способны утилизировать широкий спектр углеводов и спиртов. В целом, анаэробное использование сахаров было наиболее распространенным среди исследуемых штаммов. Изолированные культуры меньше всего использовали лактозу, а такие углеводы как фруктоза и глюкоза были наиболее предпочтительны. Исследования внеклеточной ферментативной активности выделенных штаммов показали, что микроорганизмы обладали наиболее высокой протеазной (62-90%), амилазной (25-100%) и целлюлазной (0-83%) ферментативной активностью. Наименьшее число культур проявляло липолитическую активность. Более высокая множественная гидролитическая активность отмечена у бактерий, выделенных из подземных рассолов.

Бактерии, выделенные из подземных вод и микробных матов, были способны расти в широком диапазоне температур, pH и концентрации NaCl. По отношению к температуре 38-100% от изученных штаммов, выделенных из холодных минеральных вод, были способны к росту при 100 С, 92-100% росли при температуре 25-350 С, 13-33% культур проявляли рост при 500 С. 0-38% микроорганизмов, выделенных из термальных вод Кульдур могли расти при температуре 5-100 С, 100% проявляли рост в диапазоне 35-600С. Изучаемые штаммы обладали высокой устойчивостью к различным значениям кислотности среды. Подавляющая часть штаммов, выделенных из рассолов и микробных матов (90-93%) проявляла рост в широком диапазоне pH 5,0-12,0. По отношению к концентрации NaCl особенно высокой осмотолерантностью отличались штаммы, выделенные из подземных рассолов и углекислых вод, 18-30% были способны расти при концентрации 22% NaCl. Наиболее устойчивыми к высоким концентрациям соли (20%) являлись культуры рода Brevibacterium и Pseudalkalibacillus.

Список литературы

1. Калитина, Е. Г. Распространение бактерий различных эколого-трофических групп в подземных термальных водах Кульдурского месторождения (Дальний Восток России) / Е. Г. Калитина, Н. А. Харитонова, Е. А. Вах // Современные проблемы науки и образования. 2017. – №5. С. 351.

2. Компаниченко, В.Н. Вариации состава органического вещества в водах Кульдурского геотермального месторождения (Дальний Восток России) / В. Н. Компаниченко, В. А. Потурай // Тихоокеанская геология. 2015. – №4. – С. 96-107.

3. Кузнецов, С. И. Методы изучения водных микроорганизмов / С. И. Кузнецов, Г. А. Дубинина. – М.: Наука, 1989. – 288 с.

4. Лысак, В. В. Микробиология. Практикум / В. В.Лысак, Р. А. Желдакова, О. В. Фомина. Минск:

БГУ, 2015. – 115 с.
5. Нетрусов, А. И. Практикум по микробиологии: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / А. И. Нетрусов, М. А Егорова, Л. М. Захарчук. – М.: Академия, 2005. – 608 с.
7. Харитонова, Н. А. Химический и изотопный состав азотных термальных вод месторождения Кульдур (ЕАО, Россия) / Н. А. Харитонова, Л. А. Лямина, Г. А. Челноков, И. В. Брагин, А. А. Карабцов, И. А. Тарасенко, Х. Накамура, Х. Ивамори // Вестник Московского университета. Сер. 4 Геология. 2020. – №5. – С. 77-91.
8. Lebedeva, E. G. Microorganisms of various ecological-trophic groups in the saline ground waters of Primorsky Region (distribution, number, participation in accumulation of microelements) / E. G. Lebedeva, G. A. Chelnokov, I. V. Bragin, N. A. Kharitonova // E3S Web of Conferences. 2019. – V.98. – № 020061.

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДОЛИНЫ РЕКИ ИНЯ

Максимова А.А.[1,2], Деркачев А.С.[1], Реутова А.П.[2]
[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, rock.nastaya64@gmail.com
[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск, a.reutova@g.nsu.ru

Аннотация. Настоящая работа посвящена изучению редкоземельного состава подземных вод долины реки Иня. Воды территориально были отобраны в Новосибирском, Тогучинском и Мошковском районах Новосибирской области. Установлено, что в водах Тогучинского района содержания РЗЭ выше, чем в водах остальных районов и сумма РЗЭ в среднем равна 3,1 мкг/дм^3. В подземных водах Мошковского и Новосибирского районов концентрации РЗЭ сопоставимы и в среднем ∑РЗЭ составляют 0,4 мкг/дм^3 и 0,9 мкг/дм^3 соответственно. Выявлены отрицательные зависимости Ho от глубины, Eu от pH, Sm, Gd, Tb от минерализации.
Ключевые слова: *гидрохимия, РЗЭ, подземные воды, р. Иня, Новосибирская область.*

Abstract. This work is devoted to the study of the rare earth composition of groundwater in the Inya River valley. The waters were geographically selected in the Novosibirsk, Toguchinsky and Moshkovsky districts of the Novosibirsk region. It has been established that in the waters of the Toguchinsky region the REE content is higher than in the waters of other regions and the amount of REE is on average equal to 3.1 μg/dm^3. In the groundwater of the Moshkovsky and Novosibirsk regions, REE concentrations are comparable and on average ∑REE are 0.4 μg/dm3 and 0.9 μg/dm3, respectively. Negative dependences of Ho on depth, Eu on pH, Sm, Gd, Tb on mineralization were revealed.
Key words: *hydrochemistry, REE, groundwater, Inya River, Novosibirsk region*

Редкоземельные элементы (РЗЭ) представляют интерес в гидрогеохимии в процессе изучения взаимодействия в системе вода-горная порода, а также использования их, как индикаторов геохимических процессов. Так как редкоземельные элементы имеют большой заряд и относительно большой радиус, они относятся к несовместимым элементам. Также их однородный трехвалентный заряд (также могут встречаться Ce^{4+} и Eu^{2+}) и постепенное уменьшение ионных радиусов с увеличением атомного номера могут дать представление о сложных и тонких геохимических процессах [1-3]. Настоящее исследование продолжает цикл работ [4-8], посвященных изучению особенностей геохимии и механизмов формирования состава природных вод Новосибирской области. Изучаемые объекты были отобраны из водозаборных скважин, располагающихся в долине реки Иня на территориях Новосибирского, Тогучинского и Мошковского районов Новосибирской области (НСО) (рис. 1).

На месте отбора проб проводилось определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2 и HCO_3^- на приборной базе мультипараметрового измерителя

pH/ОВП/проводимости Hanna HI98195, который оснащен платиновым датчиком для измерения окислительно-восстановительного потенциала и эталоном с двойным соединением серебро/хлорид серебра с гелеобразным электролитом, и оксиметра Hanna HI98198. Лабораторное изучение химического состава 66 проб проводилось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Название химического типа воды дано в соответствии с формулой М.Г. Курлова (более 10 %-экв) по оттеночному принципу от меньшего к большему.

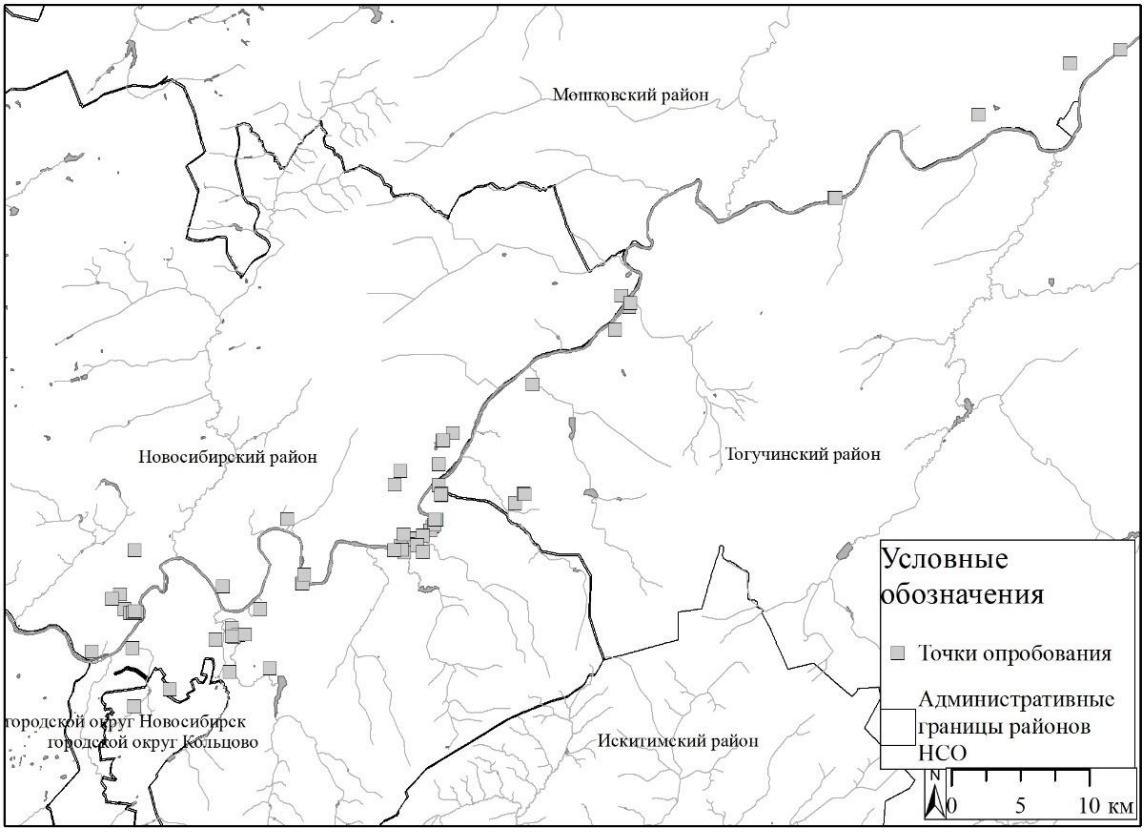


Рис.1. Местоположение района исследований.

Подземные воды Новосибирского района собственно пресные (минерализация 436 – 811 мг/дм^3), нейтральные и слабощелочные (pH 7,3 – 7,9) и характеризуются гидрокарбонатным магниево-кальциевым и гидрокарбонатным кальциево-магниевым составом (рис. 2 а). Были опробованы воды из частных скважин в интервале глубин от 20 до 99 м. установлена положительная зависимость HCO_3^- и Na^+ и отрицательная SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, K^+ от глубины. Спектры редкоземельных элементов пологие с легким уклоном в сторону тяжелых РЗЭ. Сумма легких РЗЭ варьирует в диапазоне от 0,003 до 18 мкг/дм^3, а тяжелых от 0,0007до 0,72 мкг/дм^3 (табл. 1). Установлена положительная европиевая аномалия (рис. 2 б), значение которой в среднем составляет 13. Были рассчитаны коэффициенты корреляции, по которым установлена слабая отрицательная зависимость Sm, Gd, Tb от величины общей минерализации (r = -0,3, доверительный интервал 95%, критические значения -0,27 и 0,27).

Также на территории Новосибирского района расположено проявление радоновых вод Инские источники [8], которые преимущественно характеризуются HCO_3 Mg-Ca составом с величиной общей минерализации 339 – 561 мг/дм^3. Выявлены отрицательные зависимости SO_4^{2-} и Cl^- от pH. Спектры РЗЭ повторяют спектры вод

Новосибирского района, но концентрации редких земель в водах Инских источников меньше в среднем в семь раз. Европиевая аномалия изменяется от 1,08 до 59 (табл. 1).

Подземные воды Мошковского района HCO_3 Mg-Ca состава с величиной общей минерализации 477 – 574 мг/дм^3, по величине водородного показателя слабощелочные (pH 7,5 – 7,8). Спектр редкоземельных элементов пилообразный (рис. 2 б) несмотря на то, что значения были нормированы на значения Северо-Американского сланца. Выявлено преобладание легких РЗЭ (0,4 мкг/дм^3) над тяжелыми (0,03 мкг/дм^3) в среднем в 24 раза (табл. 1). Установлена отрицательная зависимость европия от pH (r = -0,9, доверительный интервал 95%, критические значения -0,8 и 0,8).

Таблица 1. Редкоземельный состав подземных вод долины реки Иня

Район НСО	∑ЛРЗЭ	∑ТРЗЭ	∑РЗЭ	Eu/Eu*	Количество проб
	мкг/дм^3				
Новосибирский район	0,003 – 18,5 0,8	0,001 – 0,7 0,1	0,004 – 19,2 0,8	0,75 – 55,6 13,5	41
Инские источники	0,003 – 0,4 0,1	0,0004 – 0,1 0,01	0,003 – 0,5 0,1	1,1 – 58,9 13,1	12
Мошковский район	0,01 – 1,0 0,4	0,004 – 0,1 0,03	0,01 – 1,1 0,4	1,1 – 29,7 13,1	5
Тогучинский район	0,02 – 11,6 2,9	0,002 – 0,5 0,2	0,02 – 12,0 3,1	0,6 – 26,4 10,3	8

Подземные воды Тогучинского района отобраны в интервале глубин 20 – 48 м и в основном характеризуются гидрокарбонатным магниево-кальциевым составом, со значениями минерализации 494 – 614 мг/дм^3, которые относятся к собственно пресным, по pH воды нейтральные и слабощелочные (7,0 – 7,7). Выявлена отрицательная зависимость SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+} с глубиной. Спектры редкоземельных элементов от La до Eu пологие, от Gd до Yb отмечается резкий спад (рис. 2 б). Сумма легких РЗЭ изменяется от 0,02 до 12 мкг/дм^3, а тяжелых от 0,002 до 0,5 мкг/дм^3 (табл. 1). Установлена отрицательная зависимость Но от глубины (r = -0,7, доверительный интервал 95%, критические значения -0,6 и 0,6).

При сравнении значений редкоземельных элементов на четырех выбранных участках установлено, что наибольшие их концентрации проявлены в Тогучинском районе, а наименьшие в Инских источниках, значения РЗЭ Новосибирского и Мошковского районов практически одинаковы. На территории отбора проб распространены девонские отложения, представленные глинистыми сланцами и алевролитами, где, вероятно, высокие содержания кальция, который может изоморфно замещаться редкоземельными элементами. Предположительно воды Тогучинского района дольше взаимодействуют со вмещающими породами и накапливают в растворе РЗЭ. Положительную европиевую аномалию в водах Новосибирского района можно объяснить разрушением плагиоклаза, так как данный минерал служит концентратором редких земель.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области

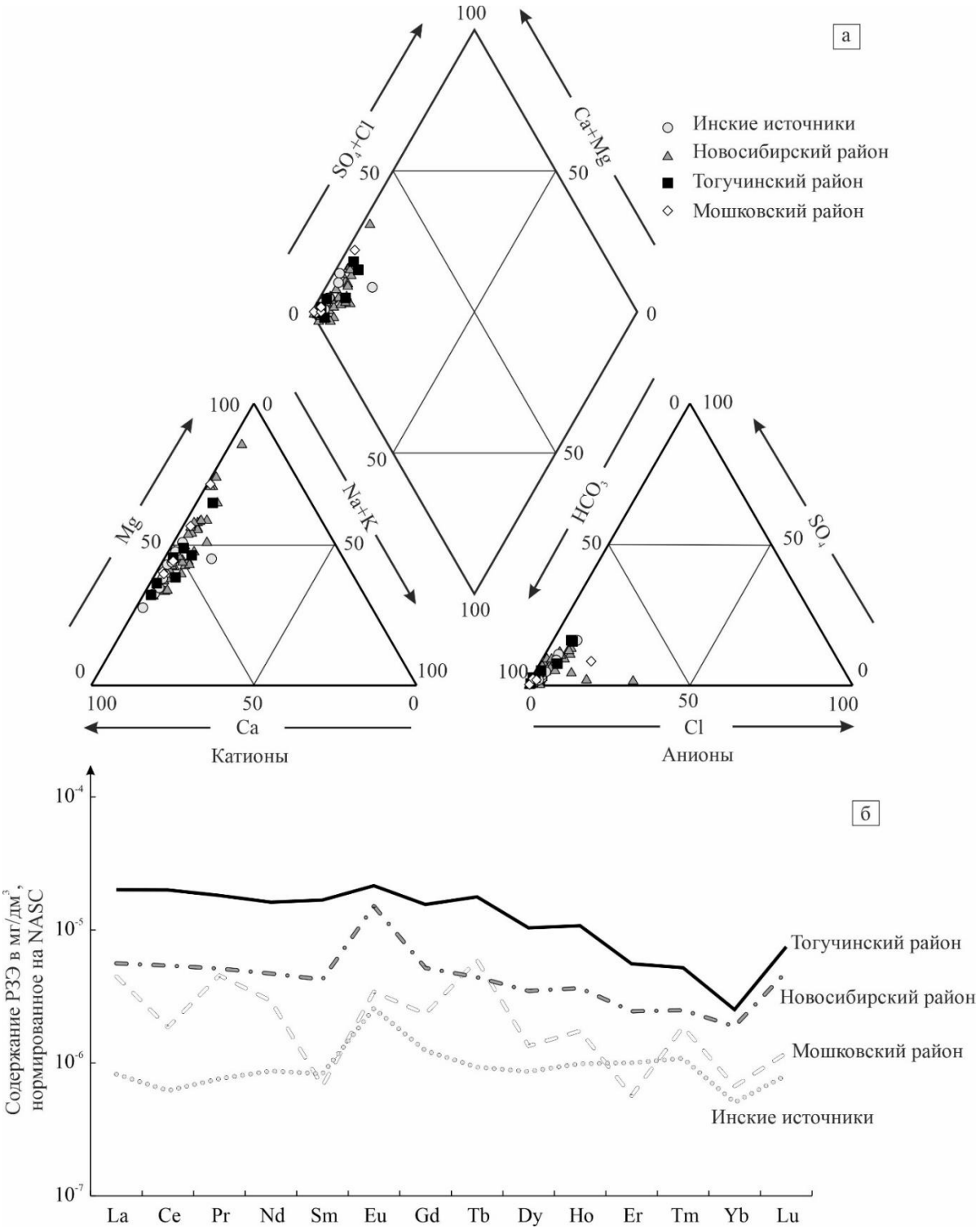


Рис. 2. Диаграмма Пайпера химического состава подземных вод долины реки Иня (а), спектры распределения редкоземельных элементов (б)

Список литературы

1. Johannesson K.H. Geochemistry of rare earth elements in groundwaters from a rhyolite aquifer, central México / K.H. Johannesson, A. Cortés, Leal J.A. Ramos, A.G. Ramírez, J. Durazo // Rare Earth Elements in Groundwater Flow Systems. – 2005. – Pp. 187-222.

2. Johannesson K.H. Rare earth elements in stromatolites – 1. Evidence that modern terrestrial stromatolites fractionate rare earth elements during incorporation from ambient waters / K.H. Johannesson, K. Telfeyan, D.A. Chevis, B.E. Rosenheim, M.I. Leybourne // Evolution of Archean Crust and Early Life, Modern Approaches in Solid Earth. – 2014. – Pp. 385-411.

3. Quinn K.A. Comparative scavenging of yttrium and the rare earth elements in seawater: competitive influences of solution and surface chemistry / K.A. Quinn, R.H. Byrne, J. Schijf // Aquat. Geochem. – 2004. –

V.10. – Pp. 59-80.
4. Novikov D.A. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.A. Maximova, A.S. Derkachyov, A.V. Chernykh // Geochemistry. – 2023. – V. 83. – Iss. 4. – Article 126016.
5. Novikov D.A. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachyov // Groundwater for Sustainable Development. – 2021. – V. 15. – Pp.1-8.
6. Novikov D.A. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, Yu.G. Kopylova, A.N. Pyryaev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachev, A.F. Sukhorukova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh, A.A. Khvashchevskaya, P.N. Kalinkin, A.V. Petrozhitsky // Groundwater for Sustainable Development. – 2023. – V. 20. – Pp.1-11.
7. Новиков Д.А. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод "Инские источники" (юг Западной Сибири) / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, Л.Г. Вакуленко, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С.135-145.
8. Новиков Д.А. Об открытии слаборадоновых вод - Инские источники / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, А.Ф. Сухорукова, Л.Г. Вакуленко, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, А.Н. Фаге, А.А. Хващевская, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, М.С. Мельгунов, П.Н. Калинкин, С.А. Растигеев // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 12. – С.1714-1732.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ЮГО–ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ПРИЧЕРНОМОРСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА

Морару К.Е.
Институт геологии и сейсмологии Молдавского государственного университета, Кишинев, cmoraru@yahoo.com

Аннотация. В юго-западной территории Причерноморского артезианского бассейна изучены промышленные подземные воды, которые содержат йод, бром, бор, литий, цезий, рубидий, стронции и калий. Приведены краткие сведения о месторождениях промышленных подземных рассолов и их геолого-гидрогеологическая характеристика. Для каждого месторождения приведены основные характеристики промышленных рассолов. Степень изученности месторождений соответствует предварительной гидрогеологической разведке.
Ключевые слова: *промышленные подземные воды, йод, бром, бор, литий, цезий, рубидий, стронции и калий.*

Abstract. For the southwestern territory of the Black Sea artesian basin, industrial groundwater has been studied, which contains iodine, bromine, boron, lithium, cesium, rubidium, strontium and potassium. Brief information about the deposits of industrial underground brines and their geological and hydrogeological characteristics is provided. For each deposit, the main characteristics of industrial brines are given. The degree of exploration of the deposits corresponds to preliminary hydrogeological exploration.
Key words: *industrial groundwater, iodine, bromine, boron, lithium, cesium, rubidium, strontium and potassium.*

Подземные рассолы содержат целый ряд редких химических элементов, которые служат сырьем для химической, фармоцевтической и других видов промышленности. Такие рассолы широко известны на Сибирской платформе [1, 3, 5, 7], в Мексике [8], Китае [19], США [15], Италии [11], Молдове [17], Японии [18] и в др. странах. Нет единого мнения по поводу происхождения рассолов [6, 9, 10, 12,13,16].

Геохимия подземных вод юго-западной территории Причерноморского артезианского бассейна определяется геолого-структурными и гидрогеологическими особенностями крайней юго-западной части Восточно-Европейской платформы. С точки

зрения геологии, эта территория расположена в структурном треугольнике: на северо-востоке граничит с Украинским кристаллическим массивом, на западе расположена складчатая Карпатская дуга и на юге – погребенная древняя Скифская платформа. Эти структуры, в течение геологического времени, на большей части исследуемой территории определили формирование моноклинального залегания горизонтов осадочных пород разного возраста, содержащих разнообразные растворимые минералы и осложненных разнонаправленными водопроводящими тектоническими разломами. В южной части, формировалось Преддобруждская впадина, заполненная различными осадочными и метаморфическими породами палеозоя и мезозоя.

В гидрогеологическом отношении, для юго-западной части Причерноморского артезианского бассейна характерны все три зоны водообмена подземных вод – активного, замедленного и весьма замедленного [4]. Время водообмена определяет процессы растворения – осаждения и равновесно - неравновесные геохимические условия в системе вода – порода. Промышленные подземные рассолы характерны только для палеозойских, мезозойских и кайнозойскихотложений, и развиты в пределах зон замедленного и весьма замедленного водообмена. Такие подземные воды содержат в промышленных концентрациях йод, бром, бор, литий, цезий, рубидий и стронции. Для них характерны аномальные содержания водорастворенного и газообразного гелия.

Объекты и методы исследований. Объектом исследований является крайняя юго- западная часть Причерноморского артезианского бассейна (географически совпадает с территорией Республики Молдова). В период 1946–1975 гг. на этой территории проводилась разведка на нефть и газ, преимущественно методами глубокого бурения. Тем самым были открыты рассолы в палеозойских, мезозойских и кайнозойскихотложениях. Гидрогеологические работы на промышленные рассолы продолжались самостоятельно вплоть до 1985 г. Разведка на промышленные рассолы дала много исходного фактического материала, который, в свое время, не был тщательно обработан. Нами использован этот фактический материал и новые данные по химическому составу рассолов. В совокупности, это информация обработана с использованием современных представлений о промышленных подземных водах и компьютерных методов (ГИС, ModFlow, AquaChem), а также геостатистического анализа (SPSS 29).

Основные результаты и обсуждение. В современной гидрогеологии отсутствует единое понимание понятия подземных рассолов. Нами принимается классическое определение [2] (например, Басков Е.А., Букаты М.Б., Валяшко М.Г., Зайцев И.К., Пиннекер Е.В., Посохов Е.В., Толстихин Н.И., Шварцев С.Л. и др.) что рассолами следует считать подземные воды с величиной минерализации более 35.0 г/л. Следует также отметить, что отсутствуют общепринятые пределы концентрации редких химических элементов в рассолах, которые могут буть извлечены в промышленных обьемах [5]. Для нашего исследования такие пределы приняты из опыта международных практик [2, 5, 15, 19].

Для подземных вод юго-западной части Причерноморского артезианского бассейна редкие химические элементы (йод, бром, литий и др.) распространены во всех гидрогеологических подразделениях. Промышленные концентрации редких химических элементов встречаются только в палеозойских, мезозойских и частично кайнозойских водоносных горизонтах. Степень изученности промышленных рассолов соответствует предварительной разведке. Обобщенные сведения о промышленных подземных рассолах территории Молдовы представлены в табл. 1.

Известно, что рентабельность промышленной эксплуатации подземных рассолов определяется не только концентрациями полезных элементов, но и другими факторами, такими как: глубина залегания подземных вод, глубина динамических уровней и дебиты скважин. От этих факторов зависит экономическая целесообразность освоения месторождений промышленных вод [2]. Нами приведены основные гидрогеологические

данные, которые характеризуют рентабельность эксплуатации промышленных подземных вод для исследуемой территории.

Таблица 1. Промышленные подземные рассолы Республики Молдова

Название месторождения и участка	Водоносные комплексы	М, г/л	Тип воды по химическому составу	Прогнозные запасы тыс. $м^3$/сут	Химический элемент	Содержание, мг/л	Ожидаемый годовой вынос, тонн
Преддобруджское, Чумайский участок	юрский байосс-оксфордский	50.0 - 115.0	хлоридная натриевая	10.5	J Br	29.0 129.0	100.0 445.0
Преддобруджское, Еникиойский участок	юрский келловей-оксфордский	81.0 - 105.8	Хлоридная натриевая, хлоридная кальциевая-	14.0	J Br B Li Rb Cs Sr K	19.0 246.0 21.0 8.6 1.9 0.32 215.0 1381.0	87.0 1131.0 97.0 40.0 8.7 1.5 989.0 6351.0
Преддобруджское, Чадыр-Лунгский участок	пермо-триасовый, палеозойский	68.0 - 195.6	Хлоридная кальциевая	15.8	J Br B Li Rb Cs Sr K	19.0 246.0 21.0 8.6 1.9 0.32 215.0 1381.0	96.5 1236.0 105.0 43.0 9.5 1.6 1080.0 6941.0
Скифское, участок Манта I	неогеновый баден-сарматский	51.0 - 70.0	хлоридная кальциевая	77.5	J Br B Li Rb Cs Sr	18.0 125.0 40.0 5.4 0.5 0.5 250.0	458.0 3182.0 1018.0 137.0 10.0 10.0 6365.0
Скифское, участок Манта II	допалеогеновый	57.9 - 83.8	Хлоридная кальциевая	12.3	J Br B Li Rb Cs Sr	21.7 119.4 47.3 5.2 0.3 0.2 400.0	87.7 482.0 190.0 21.0 1.2 0.8 1612.0

Примечание: М – величина минерализации.

Неогеновый водоносный комплекс (в основном баден – сармат) содержит промышленные воды только на территории Скифской платформы. Породы водоносного комплекса представляют собой трещиноватые кавернозные известняки с редкими прослоями глины, песка, песчаника и мергеля. Глубина кровли этого комплекса варьируется от 320.0 до 700.0 м, а глубина уровня воды до 170.0 м. Пьезометрическая поверхность имеет сложную конфигурацию и изменяется от (+20) м до (-50) м и ниже. Величина гидростатического давления изменяется от 300.0 до 620.0 м. Величина водопроводимости пород имеет интервал 50.0-250.0 $м^2$/сут. Величина коэффициента пьезопроводности составляет $2.6 \cdot 10^6$ $м^2$/сут. Дебиты скважин, из которых осуществлялась откачка в этом комплексе, зависят от технических способов откачки: электропогружными насосами получены дебиты от 200.0 до 350.0 $м^3$/сут, иногда увеличивающиеся до 953.0 $м^3$/сут; с компрессором - от 66.0 до 232.0 $м^3$/сут, а методом

желонирования получены потоки от 17.0 до 63.0 $м^3$/сут. Удельные дебиты в некоторых скважинах составляли 3.0-3.8 $м^3$/сут при понижении уровня от 50.0 до 70.0 м, в отдельных случаях удельные дебиты достигали значений 68.5-328.6 $м^3$/сут при понижении уровня до 29.0 м.

Допалеогеновый водоносный комплекс недостаточно изучен как с геологической, так и с гидрогеологической точки зрения. Данные о его территориальном распространении на Скифской платформе ограничены. Породы водоносного комплекса представлены песчаниками, среди которых встречаются прослои алевролитов и аргиллитов. Глубина залегания пород водоносного горизонта изменяется от 448.0 до 1036.0 м, а общая мощность пород водоносного горизонта составляет от 58.0 до 458.0 м. Дебиты скважин, полученные откачкой, составляли 108.0 - 319.0 $м^3$/сут при понижении уровней до 87.0 м. Удельные дебиты достигали 15.0 $м^3$/сут. Водопроводимость пород составляет 20.1 $м^2$/сут, а коэффициент пьезопроводности - $2.6 \cdot 10^6$ $м^2$/сут.

Юрский водоносный комплекс распространен в пределах Преддобруждской впадины. Водоносные породы этого комплекса представлены известняками, реже песчаниками. Глубина залегания этих пород меняется с запада на восток от 292.0 м до 1300.0 м. Общая мощность пород варьируется от 62.0 м до 447.0 м. Воды напорные и их напор увеличивается в восточном направлении, изменяясь от 300.0 - 500.0 м до 1200.0 м. Пьезометрическая поверхность подземных вод устанавливается на отметке до (-21.0) м в западной части, поднимаясь на восток до отметки (+22.0) м. В долинах рек, при бурении, скважины самоизливаются. Дебиты скважин, полученные откачкой компрессором или электропогружными насосами, реже желонками, изменяются от 221.0 до 1000.0 $м^3$/сут, с понижением статического уровня до 141.0 м. Наиболее частая величина расхода изменяется от 300.0 до 500.0 $м^3$/сут при понижении уровня от 20.0 до 50.0 м. Во многих случаях, данные о понижении уровней при откачке отсутствуют. Удельные дебиты скважин варьируют от 1.56 $м^3$/сут до 32.3 $м^3$/сут, наиболее частые значения находятся в интервале 10.0-25.0 $м^3$/сут. Значения водопроводимости пород изменяются в пределах 6.5-35.6 $м^2$/сут. Среднее установленное значение водопроводимости – 19.6 $м^2$/сут. Величина пьезопроводности пород этого комплекса изменяется в пределах $1.3 \cdot 10^4$-$4.66 \cdot 10^6$ $м^2$/сут, а среднее значение составило - $1.5 \cdot 10^6$ $м^2$/сут.

Пермо-триасовый водоносный комплекс развит в пределах Преддобруждской впадины и, возможно, на Скифской платформе. С гидрогеологической точки зрения он изучен недостаточно и в основном только в верхней части разреза. Пермо-триасовые отложения обнаружены на глубинах от 830.0 до 2588.0 м. Породы преимущественно представлены песчаниками, алевролитами и аргиллитами. По кернам установлено, что в южном направлении с увеличением глубины степень аргиллированности песчаников снижается. Статические уровни при откачке подземных вод устанавливались на глубинах от 106.0 до 218.0 м (абс. отметка от –28.0 до +11.9 м). Расходы скважин при закачке компрессором составляли 28.3 - 34.9 $м^3$/сут при понижении уровня от 85.0 до 246.0 м. Удельные дебиты составляли 0.14 - 0.33 $м^3$/сут. Гидрогеологические параметры не рассчитаны и необходимы дополнительные исследования для обоснования рентабельности эксплуатации этого комплекса.

Палеозойский вододоносный комплекс (силур, девон и каменоугольный) недостаточно изучен как с геологической, так и с гидрогеологической точки зрения. Фактические данные основаны только на результатах разведочных работ на нефть. Отложения этого комплекса сложены известняками, в которых залегает массив с большой мощностью гипса и ангидритов среднедевонского возраста. Встречаются также песчаники, аргиллиты, алевролиты и интрузивные образования. Верхний девон и весь каменноугольный период представлены только известняками. Этот комплекс распространен в основном в Преддобруждской впадине и в основании осадочных образований Скифской платформы. Статические уровни при откачке из скважин установлены на глубинах от 106.0 до 172.0 м (абсолютная отметка от –3.0 до –72.7 м).

Расходы скважин, опробовавших палеозойский водоносный комплекс, составили интервал 67.2 - 302.0 м^3/сут при понижении уровней от 3.0 до 298.0 м. Удельные дебиты варьировали от 0.73 до 22.4 м^3/сут. Гидрогеологические параметры этого комплекса не определены.

Выводы

1) В пределах юго-западной части Причерноморского артезианского бассейна (на примере территории Республики Молдова) выявлены и изучены промышленные подземные воды в виде рассолов, которые содержат йод, бром, бор, литий, рубидий, цезий, стронций и калий. Изучены геологическое строение и гидрогеологические условия месторождений промышленных вод, пределы содержания редких химических элементов, гидрогеологические параметры водоносных комплексов и общие объемы годового выноса из рассолов промышленных химических элементов. Это соответствует стадии предварительной разведки промышленных подземных вод.

2) Выбор рациональной схемы эксплуатации промышленных подземных вод целесообразно выполнять в следующей последовательности: выявление экономического рынка сбыта готовой продукции, приближенная технология извлечения химических элементов из рассолов, методы утилизации остаточных рассолов и детальная гидрогеологическая разведка промышленных подземных вод с определением конкретного месторождения и плана размещения водозаборного сооружения.

Исследования были выполнены при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований Республики Молдова, код 010902 по теме "Комплексные геолого-гидрогеологические и геохимические исследования с целью выявления участков для подземного хранения природных газов в центрально-западной части Республики Молдова (теория, методология и технико-экономическое обоснование)".

Список литературы

1. Алексеев, С.В. Литиевые подземные воды Иркутской области и Западной Якутии / С.В. Алексеев, Л.П. Алексеева, Вахромеев А.Г., Владимиров А.Г., Волкова Н.И.; Химия в интересах устойчивого развития, 2012.- 20.- С. 27-33.

2. Букаты, М. Б. Геология и геохимия подземных рассолов западной части Сибирской платформы: Автореф. докт. дис. докт. геол. - мин. наук /Институт геологии нефти и газа СО РАН. Томский политехнический университет. Томск, 1999. – 52 с.

3. Вахромеев, А.Г. Закономерности формирования и концепция освоения промышленных рассолов (на примере юга Сибирской платформы): Автореф. докт. дис. докт. геол. - мин. наук / Институт земной коры СО РАН, НПВФ «Брайнсиб». Иркутск, 2009. - 50 с.

4. Морару, К.Е. Гидрогеохимия подземных вод зоны активного водообмена крайнего юго-запада Восточно-Европейской платформы /К.Е. Морару. - Кишинев: Изд-во Елена В.И., 2009. - 288 с.

5. Шварцев, С.Л. Перспективы использования промышленных рассолов Сибирской платформы для извлечения лития и брома / С.Л. Шварцев, С. В. Алексеев, А.Г. Вахромеев, Л.П.Алексеева.; Сб. VIII Международная конференция "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых", т. 2. - Новосибирск, 2012. - с. 29-32.

6. Alexeev, S.V. Equilibrium-non-equilibrium of the brine-kimberlite system in the Udachnaya pipe, Russia, based on physicochemical modeling / S.V. Alexeev, L.P. Alexeeva, N.S. Trifonov // Applied Geochemistry. – 2022. – V. 138. – 105219. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105219.

7. Alexeev, S.V. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and rocessing prospects / S.V. Alexeev L.P. Alexeeva, A.G. Vakhromeev // Applied Geochemistry/ -2020 - 104588. doi:10.1016/j.apgeochem.2020.104588.

8. Birkle, P. Legal Aspects and Technical Alternatives for the Treatment of Reservoir Brines at the Activo Luna Oilfield, Mexico / P. Birkle, A.L. Cid Vázquez, J.L. Fong Aguilar // Water Environment Research – 2005. - 77(1). – pp. 68–77. doi:10.2175/106143005x41645.

9. Bozau, E. Hydrogeochemical classification of deep formation waters / E. Bozau, C.-D. Sattle, W. van Berk //Applied Geochemistry – 2015. – 52. - pp.23–30. doi:10.1016/j.apgeochem.2014.10.018.

10. Bottomley, D.J. The origin and evolution of Canadian Shield brines: evaporation or freezing of seawater? New lithium isotope and geochemical evidence from the Slave craton / D.J. Bottomley, A. Katz, L.H. Chan, A. Starinsky, M. Douglas, I.D. Clark, K. G. Raven // Chemical Geology – 1999. - 155(3-4) – pp. 295–

320. doi:10.1016/s0009-2541(98)00166-1.

11. Dini, A. Lithium Occurrence in Italy-An Overview. / A. Dini, P. Lattanzi, G. Ruggieri, E. Trumpy // Minerals – 2022.- 12.- 945 – 27 p. https:// doi.org/10.3390/min12080945.

12. Dugamin, E.J.M. Groundwater in sedimentary basins as potential lithium resource: a global prospective study/ Elza J. M. Dugamin, A. Richard, M. Cathelineau, M.-Ch. Boiron, F. Despinois, A. Brisset // Sci Rep -2021.- 11.-21091. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99912-7.

13. Ferguson, G., McIntosh, J.C., Grasby, S.E., Hendry, M.J., Jasechko, S., Lindsay, M.B.J., & Luijendijk, E. Thepersistence of brines in sedimentarybasins / G. Ferguson, J.C. McIntosh, S.E. Grasby, M.J. Hendry, S.Jasechko, M.B.J. Lindsay, E.Luijendijk// Geophysical Research Letters – 2018. – 45.- pp. 4851–4858. https://doi.org/10.1029/2018GL078409.

14. Hanor, J.S. History of Thought on the Origin of Subsurface Sedimentary Brines / J.S. Hanor // History of Geophysics- 2013.- V. 3. – pp.81–91. doi:10.1029/hg003p0081.

15. Krukowski, S.T. Iodine Production from Oilfield Brine / S.T. Krukowski // Iodine Chemistry and Applications – 2014. – P. 221–230. doi:10.1002/9781118909911.ch12.

16. Ma, L., M.C. Castro, and C.M. Hall. Crustal noble gases in deep brines as natural tracers of vertical transport processes in the Michigan Basin / L. Ma, Castro M.C., Hall C.M. // Geochem. Geophys. Geosyst. – 2009 – 10 - Q06001. doi:10.1029/2009GC002475.G3G3.

17. Moraru C.E. Hydromineral deposits of the Republic of Moldova / C.E. Moraru. - Chisinau: Elena V.I.- 2011 - 160 p. (in Romanian).

18. Muramatsu, Y. Recycling of iodine in fore-arc areas: evidence from the iodine brines in Chiba, Japan / Y. Muramatsu, U. Fehn, S. Yoshida // Earth and Planetary Science Letters – 2001.- 192 (4).- pp.583–593. doi:10.1016/s0012-821x(01)00483-6.

19. Zhou, X. Evolution of the Subsurface K-Rich Brines in the Triassic Carbonates in the Sichuan Basin of China / X. Zhou, X. Wang, J. Han, Q. Cao, C. Jiang, J. Guo, H. Zhou // Groundwater – 2017.- 56 (5).- pp.832–843. doi:10.1111/gwat.12614.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ЗОНЫ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН И ИХ ПРИРОДА

Мусин Р.Х.

Казанский федеральный университет, Казань, Rustam.Musin@kpfu.ru

Аннотация. Характер и динамика изменения качественных показателей подземных вод во времени (последние 60 лет) определены по изучению 4 крупных районов. Выявлено, что в сельскохозяйственных районах эти показатели не претерпели существенных изменений. Весьма локально они трансформированы в пределах и окрестностях крупной нефтеперерабатывающей промышленной зоны, что во-многом определяется высокими буферными свойствами геологической среды. Максимально негативно изменен состав пресных подземных вод на территории интенсивных и длительных нефтеразработок, где минерализация может достигать 10 г/л, а жесткость 70 мг-экв/л, при градиентах нарастания этих показателей до 43 мг/л*год и 0,6 мг-экв/л*год соответственно. Обозначены характер и природа латеральной и вертикальной гидрогеохимической зональности зоны пресных подземных вод.

Ключевые слова: *загрязнение подземных вод, буферные свойства геологической среды, полигоны промышленных отходов, вертикальная и латеральная гидрогеохимическая зональность подземных вод.*

Abstract. The nature and dynamics of changes in the quality indicators of groundwater over time (the last 60 years) were determined by studying 4 large areas. It was revealed that in agricultural areas these indicators did not undergo significant changes. Very locally they are transformed within and around a large oil refining industrial zone, which is largely determined by the high buffer properties of the geological environment. The composition of fresh groundwater is most negatively changed in the territory of intensive and long-term oil development, where mineralization can reach 10 g/l, and hardness 70 mg-eq/l, with gradients of increase in these indicators up to 43 mg/l*year and 0.6 mg-eq/l*year, respectively. The character and nature of the lateral and vertical hydrogeochemical zoning of the fresh groundwater zone are indicated.

Key words: *groundwater pollution, buffer properties of the geological environment, industrial waste landfills, vertical and lateral hydrogeochemical zoning of groundwater.*

Республика Татарстан (РТ) расположена в пределах Волго-Уральской антеклизы Русской платформы. Её площадь – 68 тыс. км^2, население – 3,6 млн. чел. Это один из наиболее развитых в экономическом отношении субъектов Российской Федерации в Приволжском федеральном округе. Основными отраслями промышленности являются – нефтехимия (ПАО "Нижнекамскнефтехим", ПАО "Казаньоргсинтез" и др.), машиностроение (ПАО "КАМАЗ" и др.), нефтедобыча и нефтепереработка (ПАО "Татнефть"). Весьма развитым и всемерно поддерживаемым является и сельскохозяйственное производство.

Верхняя часть геологического разреза РТ представлена комплексами полифациальных сульфатно-карбонатно-терригенных пермских, морских преимущественно глинистых юрско-меловых и аллювиальных песчано-глинистых плиоцен-четвертичных отложений [2, 14]. Это область преимущественного развития типичных платформенных междуречных и долинных потоков, связанных водообменом по схеме А.Н. Мятиева по [1, 15]. Основными областями питания пресных подземных вод (ПВ) являются водораздельные пространства, а областями разгрузки – речные долины. Эти воды отличаются широко варьирующим составом и минерализацией. В самой верхней части разреза, вне зон интенсивного антропогенного воздействия, обычно развиты воды гидрокарбонатного кальциевого и магниево-кальциевого состава с минерализацией 0,2–0,3 г/л (типы воды согласно [12]). На более низких уровнях за счет увеличения времени взаимодействия в системе "вода-порода" минерализация постепенно возрастает до 1,0 г/л, а особенности состава определяются различными соотношениями пяти основных ионов: HCO_3^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+. Природные условия определяют возможность относительно быстрого концентрирования в пресных ПВ компонентов жесткости, а также *Fe* и *Mn* до уровня, превышающего предельно допустимые концентрации для питьевых вод [3, 13]. Мощность зоны пресных подземных вод достигает 250–300 м. Величина их ресурсов составляет 5,6 млн. м^3/сут, а оцененных запасов – 2,5 млн м^3/сут [5].

Территория РТ отличается весьма высокой степенью геолого-гидрогеологической изученности. Полистные государственные гидрогеологические съемки масштаба 1:200000 проведены в 1960-1970-х гг. В 1990-2000-х гг. большая часть площади РТ была охвачена эколого-гидрогеологической съемкой масштаба 1:200000, а на локальных площадях велась и геологическая съемка 1:50000 масштаба. С этого же времени постоянно ведутся поисково-разведочные работы на ПВ питьевого качества.

Значительное количество первичного химико-аналитического материала по составу пресных ПВ позволяет провести анализ его пространственно-временной изменчивости. С этой целью были обработаны данные по 4 районам, отличающимся характером и уровнем антропогенного воздействия (рис.). Из них два района отличаются сельскохозяйственной направленностью производственной деятельности. Здесь нет крупных населенных пунктов и промышленных предприятий. Один из этих районов представляет Предволжский регион РТ (район № 1 на рис., площадь ~10 тыс. км^2), второй – часть Предкамского региона (3600 км^2). Третий район охватывает Нижнекамскую промышленную зону и её окрестности. Здесь на территории около 20 км^2 расположены такие крупные нефтехимические и нефтеперерабатывающие предприятия, как: ПАО "Нижнекамскнефтехим" (крупнейшее в Европе), АО "ТАНЕКО", АО "ТАИФ-НК", ПАО "Нижнекамскшина" (крупнейшее в СНГ) и ряд более мелких, а в окрестностях промзоны ведется сельскохозяйственная деятельность. Объём ежегодно перерабатываемой нефти на нижнекамских предприятиях превышает 16 млн. т. Четвертый район включает основные нефтеносные площади с расположенными здесь уникальными Ромашкинским и Ново-Елховским, а также крупным Бавлинским нефтяными месторождениями.

Временной диапазон аналитического материала (более 3 тысяч химических анализов ПВ) несколько варьирует в пределах отмеченных 4 районов. В целом он составляет около 60 лет – 1960-е–2020 гг. Сопоставление разновременных анализов ПВ было разноуровенным. Сравнивались анализы одних и тех же водопроявлений; данные, осредненные по определенной площади и определенным водоносным (слабоводоносным) горизонтам и комплексам. В сравнении участвовали основные интегральные показатели состава природных вод (минерализация, жесткость, перманганатная окисляемость, pH) и концентрации основных компонентов (HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, NO_3^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, $(Na+K)^+$). При сопоставлении учитывались следующие основные факторы: местоположение водопроявлений, время их опробования (в качестве сравнительного использовался только аналитический материал периодов летней межени), характер и интенсивность воздействия техногенного фактора. Для корректного сравнения также необходимы были данные по гидрогеологическим условиям рассматриваемых площадей и условиям формирования химического состава ПВ.

Основные гидрогеохимические показатели пресных ПВ в сельскохозяйственных районах не претерпели существенных изменений во времени [9, 11]. В Предкамском регионе отмечается некоторое слабое концентрирование хлоридов с преобладающих 7–10 мг/л в середине 1960-х гг. до наиболее часто встречающихся значений 15–40 мг/л в 2004 г., при постоянстве всех остальных показателей. При этом более интенсивное концентрирование отмечается в пределах водосборных площадей, в структуре которых преобладают лесные массивы. Данное изменение скорее всего связано с влиянием преобладающих в этом районе ветров субширотной ориентировки и расположением рассматриваемой площади между ПАО “Нижнекамскнефтехим” и “Казаньоргсинтез”. В Предволжском регионе наметилась тенденция улучшения качественных показателей пресных ПВ (табл.). Во многом это связано с уменьшением уровня антропогенного воздействия, обусловленного продолжающейся депопуляцией данной территории, а сложившаяся здесь среднемноголетняя интенсивность внесения органических и минеральных удобрений, соответственно, 0,6–1,0 т/га*год и 11,8–20 кг/га*год не оказывает сколь-нибудь ощутимого отрицательного воздействия на грунтовые воды [6].

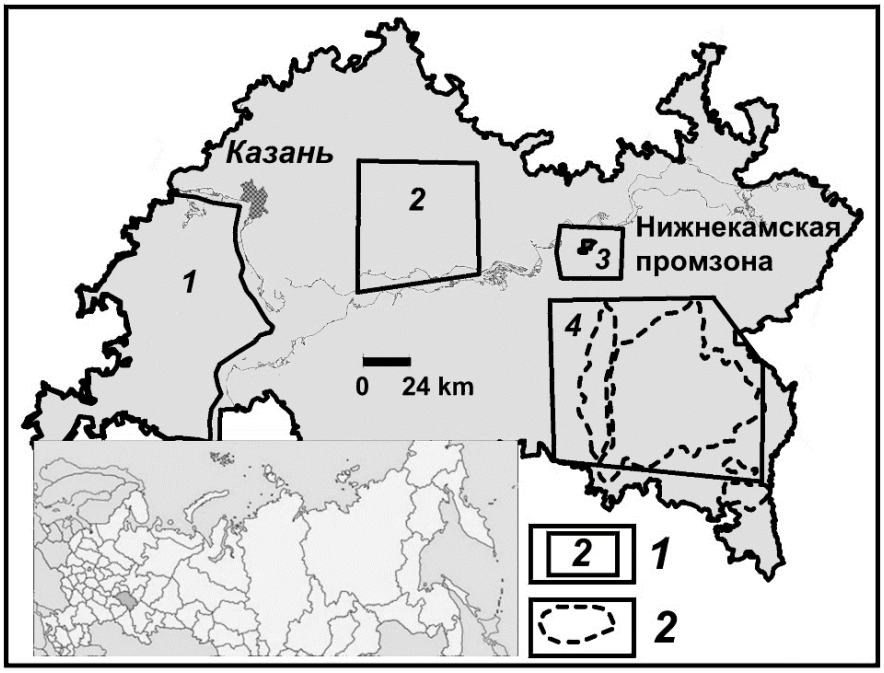


Рис. Расположение изученных площадей в пределах РТ: *1* – контуры изученных районов и их номера, *2* – контуры крупных нефтяных месторождений

Таблица. Сопоставление разновременных средних значений интегральных показателей состава ПВ в Предволжском регионе РТ

Индекс	Тип водопунктов	Кол-во проб	Минерализация, мг/л	Жесткость, мг-экв/л	Преобладающие типы воды
K	Родники	44 8	617 584	6,66 5,56	HCO_3/Ca и Mg-Ca
J	Родники	113 5	684 609	7,54 6,89	HCO_3/ и SO_4-HCO_3/Mg-Ca
	Скваж.	40 1	1234 839	7,55 7,38	HCO_3 и SO_4-HCO_3/ Mg-Ca-Na
P_3t	Родники	225 18	611 574	7,02 6,81	HCO_3/Mg-Ca
	Скваж.	33 7	773 748	7,28 5,99	HCO_3/Mg-Ca и SO_4-HCO_3/ Na-Mg-Ca
P_2ur	Родники	201 33	590 601	6,70 7,46	HCO_3/Mg-Ca
	Скваж.	253 48	903 744	7,50 6,51	HCO_3/Mg-Ca; SO_4-HCO_3/ Na-Mg-Ca и Mg-Ca-Na
P_2kz_2	Скваж.	150 23	1755 1581	20,60 17,66	HCO_3, SO_4-HCO_3, HCO_3-SO_4, SO_4/ Mg-Ca и Na-Mg-Ca
P_2kz_1	Скваж.	29 4	2763 2590	32,73 27,32	HCO_3-SO_4, SO_4/ Mg-Ca и Na-Mg-Ca

Примечание. В числителе данные 1996–2001 гг., в знаменателе – 2019–2020 гг.

В Нижнекамской промзоне негативные изменения в составе ПВ, в первую очередь грунтового водоносного горизонта, отмечаются непосредственно на производственных площадках и, в большей степени, в пределах и ближайшем обрамлении полигонов захоронения отходов и шламонакопителей. Так, действующий полигон захоронения промышленных отходов “Нижнекамскнефтехим” отличается накоплением в грунтовых водах широкого спектра токсикантов при максимальном концентрировании нефтепродуктов (почти до 1 г/л), фенолов (до 13,9 мг/л), железа (153 мг/л). При этом загрязнение имеет локальный характер и не распространяется более чем на 1–1,5 км по направлению фильтрационных потоков [8, 16]. Вне производственных площадок и полигонов отходов состав ПВ во временном диапазоне 1979–2018 гг. стабилен [9].

Иная картина отмечается в нефтяном регионе РТ, где промышленная добыча нефти ведется с 1943 г. Здесь на значительных площадях, особенно в центральных зонах отмеченных месторождений, пресные ПВ подвергнуты довольно интенсивному хлоридному загрязнению. В составе нижнеказанского водоносного комплекса, являющегося наиболее продуктивным элементом разреза в отношении ПВ питьевого качества, минерализация участками может достигать 10 г/л, а жесткость – 70 мг-экв/л. В анионном составе ПВ доля хлоридов начинает превышать 20 %-экв. Загрязнение в первую очередь связано с аварийными разливами на поверхности пластовых вод, попутно добываемых с нефтью. В период наиболее интенсивных нефтеразработок (1970–1980-е гг.) ежегодные потери попутно добываемых рассолов с минерализацией до 250 г/л и более в результате разливов, аварийных порывов и скрытых утечек составляли не менее 4–5 млн. $м^3$ [4]. Обработка площадных данных 1960-х и 1995-2000-х гг. по отдельным водосборным бассейнам, ограниченным крупными реками и водоразделами, площади которых – 150–200 $км^2$, позволила выделить 4 степени загрязнения ПВ нижнеказанского водоносного комплекса – “крайне слабую”, “слабую”, “среднюю” и “высокую”. Водосборные бассейны со “средней” и “высокой” степенью изменения состава ПВ выделяются в пределах наиболее интенсивно осваиваемых

площадей крупных нефтяных месторождений. Градиенты увеличения минерализации и жесткости ПВ могут достигать здесь 43 мг/л*год и 0,6 мг-экв/л*год, соответственно [9].

Таким образом, состав пресных ПВ в пределах РТ существенно трансформирован в пределах населенных пунктов, которые являются наиболее многочисленными источниками коммунально-бытового загрязнения, промышленных предприятий, полигонов захоронения разнотипных отходов и площадей интенсивных и длительных нефтеразработок. На всей остальной территории Республики пресные ПВ отличаются преобладанием природных факторов в формировании их состава и качества. Характер и масштабность процессов загрязнения определяются типом загрязняющих веществ, масштабом их выбросов, а также значительными буферными свойствами геологической среды [8, 9].

Зона пресных ПВ в РТ характеризуется ярко выраженной латеральной и вертикальной гидрогеохимической зональностью. Первая обычно проявлена при смене минералого-геохимического типа водовмещающих сред, особенно на участках появления гипсов, локальных зон интенсивных восходящих перетоков более минерализованных ПВ, а также при смене пермских и юрско-меловых коллекторов хорошо промытыми плиоцен-четвертичными породами, залегающими в крупных эрозионных врезах. Вертикальная зональность может иметь несколько форм проявления. При преобладании нисходящей фильтрации в одном случае происходит постепенное и неуклонное увеличение минерализации и жесткости, при этом преобладающий гидрокарбонатный анионный состав сменяется составом с долей сульфатов более 20 %-экв., а катионный состав в большинстве случаев остается постоянным – преимущественно магниево-кальциевым. Такая зональность отмечается на большей части развития пермских отложений. В другом случае нарастание минерализации с глубиной несколько затухает, а жесткость начинает снижаться. Гидрокарбонатные магниево-кальциевые воды сменяются содовыми или гидрокарбонатно-сульфатными с преобладанием натрия в катионном составе. В поле развития мезозойских отложений это отмечается с глубинного уровня 80–100 м [7], а в некоторых областях пермских образований с глубины 50–100 м [8]. Данная зональность связана с процессами ионного обмена по схеме Гедройца, а также с высаливанием карбонатов кальция и магния, возможно обусловленным повышенной щелочностью среды, вызванной недостатком углекислого газа для связывания гидроксил-ионов, непрерывно формирующихся в процессе гидролиза силикатов и алюмосиликатов. Данный вид зональности проявлен и в пределах Нижнекамской промзоны. Это, а также высокая буферность геологической среды в этом районе, во многом обусловленная тем, что верхняя часть разреза на 50% сложена пермскими глинами, позволяет получать непосредственно с производственных площадок воду благоприятного питьевого качества. Наиболее оптимальным является установка фильтров водозаборных скважин на глубинном уровне 150–180 м в коллекторах нижнеказанского комплекса. Подтверждением данного тезиса является многолетняя эксплуатация одного из месторождений питьевых ПВ на окраине одного из промышленных предприятий [8]. В крупных плиоцен-четвертичных врезах, которые обычно являются зонами разгрузки для более глубоко залегающих водоносных горизонтов, вертикальная зональность во многом определяется интенсивностью разгрузки относительно глубинных ПВ и их составом.

Характер вертикальной зональности ПВ пермских отложений в водораздельных областях нефтяного региона РТ, где преобладает нисходящая фильтрация, с расчетом градиентов концентраций основных макрокомпонентов, корреляционных связей этих компонентов с литологическим составом водовмещающих пород и их перекрытия детально отражен в [10].

Список литературы

1. Всеволожский, В.А. Основы гидрогеологии / В.А. Всеволожский. – М.: Изд-во МГУ, 2007. –

448 с.

2. Геология Татарстана: стратиграфия и тектоника / под ред. Б.В. Бурова. – М.: ГЕОС, 2003.–401 с.

3. Гидрогеология СССР. Т.13 Поволжье и Прикамье / под ред. Т. П. Афанасьева. – М.: Недра, 1970. – 800 с.

4. Гидрогеоэкологические исследования в нефтедобывающих районах Республики Татарстан / под ред. А.И. Короткова, В.К. Учаева. – Казань: Изд-во НПО “Репер”, 2007. – 300 с.

5. Государственный доклад о состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2021 г. – Казань, 2022. – URL: https://eco.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_3288791.pdf (дата обращения 02.09.2023).

6. Мусин, Р. Х. Влияние сельскохозяйственных удобрений на качество грунтовых вод / Р. Х. Мусин, И. С. Нуриев // Учен. Зап. Казанск. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2009. – Т. 151, кн. 3. – С. 136-142.

7. Мусин, Р. Х. Геохимия и условия формирования состава подземных вод в области развития мезозойских отложений в Республике Татарстан / Р. Х. Мусин, А. Д. Хамитов, З. Г. Калкаманова // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2023. – № 2. – С. 67–81.

8. Мусин, Р. Х. Особенности влияния на гидросферу комплекса нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий в Нижнекамской промзоне Республики Татарстан / Р. Х. Мусин, А. Р. Галиева, Т. Г. Кудбанов, Н. А. Курлянов // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 3. – С. 108–112.

9. Мусин, Р. Х. Особенности трансформации во времени состава пресных подземных вод в Республике Татарстан / Р. Х. Мусин, А. Р. Галиева, А. Д. Хамитов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2023. – Т. 165, кн. 3. – С. 427–446.

10. Мусин, Р. Х. Формирование состава подземных вод в верхней части гидролитосферы Восточно-Закамского региона Татарстана / Р. Х. Мусин, З. Г. Калкаманова // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 2. – С. 18-22.

11. Мусин, Р. Х. Характер и динамика изменения во времени химического состава пресных подземных вод в Республике Татарстан / Р. Х. Мусин, А. Р. Галиева, А. А. Ахметова, А. Д. Хамитов //Сборник научных трудов III научно-практической конференции по вопросам гидрогеологии и водообеспечения. – Ижевск: Изд-во типография «МарШак», 2021. – С. 45–52.

12. Отраслевой стандарт. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. – 12 с.

13. Подземные воды Татарии / под ред. М.Е. Королева. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1987. – 189 с.

14. Сводная геологическая карта доплейстоценовых отложений Республики Татарстан масштаба 1:200000. Пояснительная записка / под ред. С.А. Марамчина. – Казань: Изд-во “Арника”, 1997. – 118 с.

15. Шестаков, В. М. Гидрогеодинамика / В. М. Шестаков. – М.: Изд-во КДУ, 2009. – 334 с.

16. Musin, R.Kh. Environmental state and buffering properties of underground hydrosphere in waste landfill site of the largest petrochemical companies in Europe / R.Kh. Musin, N.A. Kurlyanov, Z.G. Kalkamanova, T. V. Korotchenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – Vol.33, Is.1. – Art. № 012019.

УРАН В СИСТЕМЕ ВОДА-ГОРНАЯ ПОРОДА

Новиков Д.А.[1,2]
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Впервые рассмотрено распределение урана в системе вода – горная порода в контрастных гидрогеологических условиях гранитоидных массивов, зон контактов и разновозрастных осадочных комплексов Обь-Зайсанской складчатой области. Содержание урана в водах варьирует от $6{,}71 \cdot 10^{-4}$ до 1162,81 мкг/дм^3. Значения γ ($^{234}U/^{238}U$) составляют от 1,3 до 18,0. Максимальные величины $^{234}U_e$ характеризуют воды, отобранные в пределах гранитоидов Приобского и Барлакского комплексов, которые являются основными источниками урана в природных водах изучаемого региона. Данные по водовмещающим горным породам подтверждают эти факты. Так, средние концентрации урана изменяются от 2,6 г/т в осадочных породах до 9,6 г/т – в магматических. При этом, в наибольшей степени обогащены ураном (до 65,1 г/т) интрузивные комплексы Колыванского гранитоидного массива.

Ключевые слова: *уран, система вода – горная порода, осадочные и магматические породы, Обь-Зайсанской складчатая область, юг Западной Сибири.*

Abstract: The distribution of uranium in the water-rock system in the contrasting hydrogeological conditions of granitoid massifs, contact zones and sedimentary complexes of different ages in the Ob-Zaisan folded region is considered. The uranium content in waters varies from $6.71 \cdot 10^{-4}$ to 1162.81 μg/l. The maximum values of ^{234}U characterize the waters of the granitoids of the Priobsky and Barlak complexes, which are the main sources of uranium in the natural waters of the studied region. Data on water-bearing rocks confirm these facts: average uranium concentrations vary from 2.6 g/t in sedimentary rocks to 9.6 g/t in igneous rocks. The intrusive complexes of the Kolyvan granitoid (Barlak complex) massif are most enriched in uranium (up to 65.1 g/t).

Keywords: *uranium, water-rock system, sedimentary and igneous rocks, Ob-Zaisan folded region, south of Western Siberia.*

Уран (U) в степени окисления +VI является доминирующим в природных водах. Он распространен в осадочных породах, а также развит в метаморфических и магматических комплексах [1]. Распределение урана в подземных водах определяется выветриванием урансодержащих пород и минералов, а его концентрация контролируется химической подвижностью [2]. Уран встречается в акцессорных минералах, в основном неподвижных в природе во время выветривания на месте, а затем с течением времени высвобождается при их выщелачивании [3]. Химический состав урана в водоносных горизонтах в основном контролируется pH, окислительно-восстановительным потенциалом (Eh) и комплексообразователями (карбонаты, фосфаты, сульфаты, силикаты и т.д.) [4]. Основными степенями окисления урана в природных системах являются U(IV) и U(VI). Обычно минералы U(IV) распространены в месторождениях урана (уранинит, настуран, коффинит и др.), и низкая растворимость комплексов U4+ приводит к его малым концентрациям в водах восстановительных геохимических обстановок.

Концентрации урана в природных водах Земли как правило колеблются в интервале от 0,1 до 10 мг/дм^3 [5-6]. ^{238}U является основным изотопом природного U (распространение 99,72%) и прародителем радиевого ряда. Отношение активностей $^{234}U/^{238}U$ (γ) равно единице в основной массе закрытых систем, однако процессы взаимодействия в системе вода-порода часто приводят к значениям γ больше единицы [6-8]. Были предложены различные механизмы для интерпретации повышенных γ в растворе. Например, Рошолт и др. [9] предположили возникновение повышенного химического растворения ^{234}U из-за радиационного повреждения кристаллической решетки или окисления U^{4+} в U^{6+} в результате распада исходного ^{238}U. Кигоши [10] показал, что бета-распад предшественника урана-234 также может вызывать рост γ в растворе [11]. γ в растворе может быть меньше или больше в зависимости от окислительно-восстановительных условий [8, 12]. Если преобладают окислительные

условия (положительные значения Eh), то U стремится оставаться в растворе, мигрируя на большие расстояния. Если преобладают восстановительные условия (отрицательные значения Eh), то имеет место тенденция к осаждению урана, что снижает его концентрацию в растворе [8]. На основе анализа изотопного разбавления данные γ и концентрации U используются также для определения долей подземных вод в смеси [8, 13-15].

Во время полевых работ и последующих аналитических исследований в лабораториях ИНГГ СО РАН, ТПУ, ИГМ СО РАН, ХАЦ «Плазма» был получен уникальный фактический материал по распределению урана в подземных водах (833 пробы) и горных породах (264 пробы), отобранных в контрастных гидрогеологических условиях гранитоидных массивов, зон контактов и разновозрастных осадочных комплексов Обь-Зайсанской складчатой области (ОЗСО) (рис. 1). Помимо этого, в 79 пробах подземных вод был проанализирован изотопный состав урана и радия.

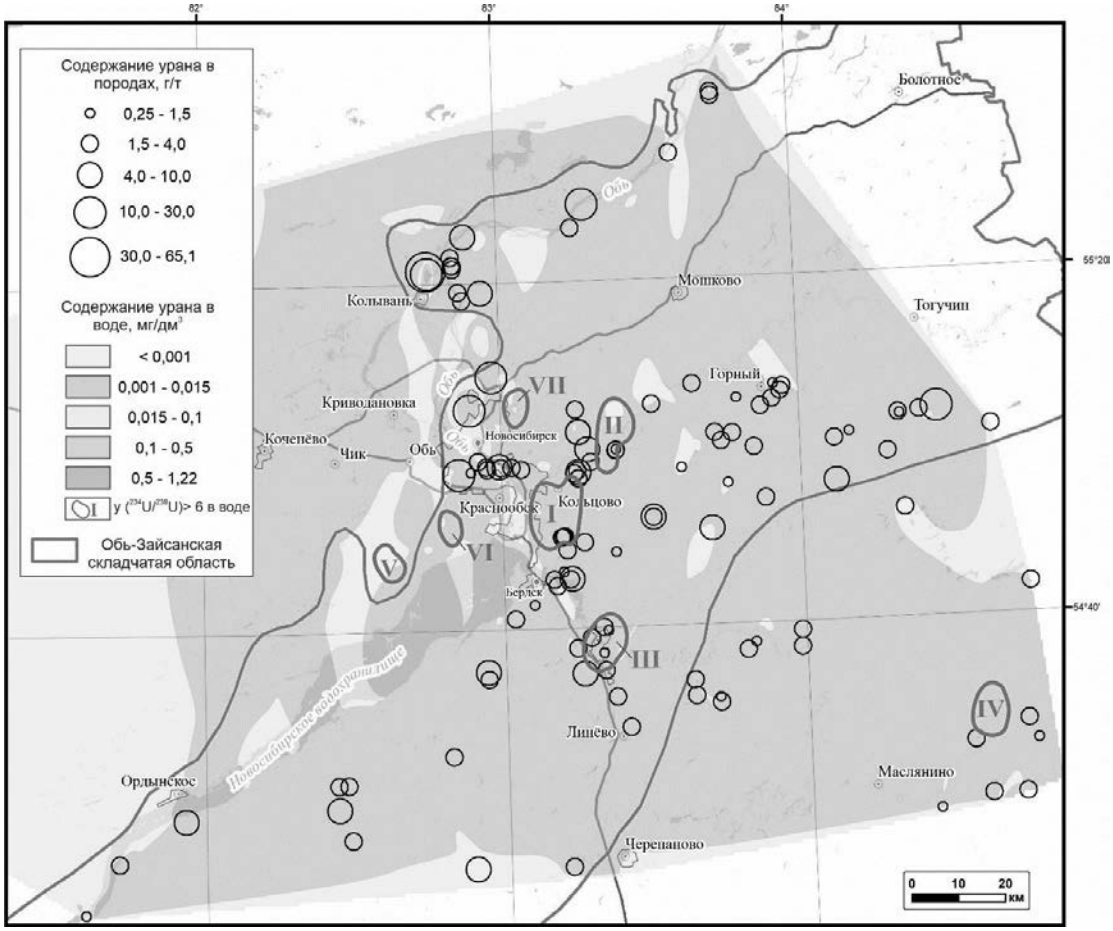


Рис. 1. Распределение урана в подземных водах и водовмещающих породах ОЗСО

Настоящая работа продолжает цикл наших исследований о природе радиоактивности подземных вод ОЗСО [16-29]. Содержания урана в проанализированных пробах воды колебались в широком диапазоне от $6{,}71 \cdot 10^{-4}$ до 1162,81 мкг/дм^3. Значения γ составляют от 1,3 до 18,0 (рис. 2а). Большая часть выявленных аномалий с величиной $\gamma > 6$ (I – Академическая, II – Инская, III – Искитимская, IV – Суенгинская), $\gamma > 4$ (V – Боровая, VI – Верх-Тулинская, VII – Новосибирская) фиксируется в непосредственной близости от основных гранитоидных массивов. Отношения, превышающие единицу в водах, типичны при активном взаимодействии вода-порода вследствие преимущественного химического растворения ^{234}U [9] и альфа-отдачи ^{234}Th на границе раздела вода-порода [10]. Климат, литология, стратиграфия, гидрогеология, геохимические условия и степень взаимодействия в

системе вода-почва/горная порода входят в число факторов, контролирующих различные концентрации растворенного урана и значения γ в изучаемой области. Различные типы горных пород имеют разные концентрации урана из-за их минералогического состава, и это, безусловно, относится к исследованным объектам, где происходит выщелачивание подземными водами песчаников, алевролитов, сланцев, известняков, базальтов, вулканических туфов, гранитов и многих других. Выявлено, что в магматических (от девона до триаса) породах содержания урана и тория в среднем составляют 9,6 и 17,7 г/т, а в осадочных породах (от нижнего кембрия до средней юры) – 2,5 и 4,6 г/т соответственно. Установлено, что в наибольшей степени обогащены ураном (до 65,1 г/т) и торием (до 108,8 г/т) интрузивные комплексы Колыванского гранитоидного массива.

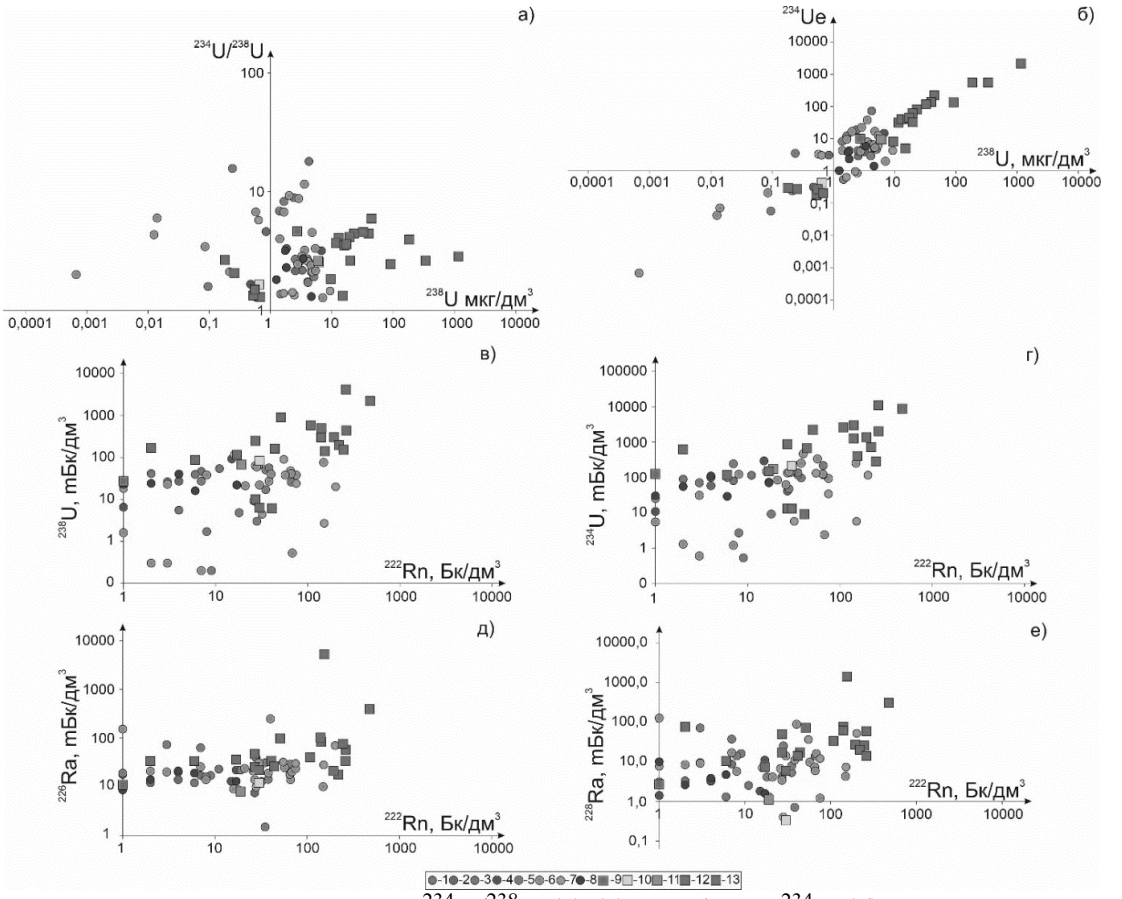


Рис. 2. Зависимость отношений $^{234}U/^{238}U$ (γ) (а) и избытка ^{234}U (б) от концентрации урана в водах; отношения активностей изотопов ^{238}U – ^{222}Rn (в), ^{234}U – ^{222}Rn (г), ^{226}Ra – ^{222}Rn (д) и ^{228}Ra – ^{222}Rn (е) в подземных водах.

Осадочные комплексы: 1 – Кинтерепско-гавриловская группа свит ($Є_1$ kg); 2 – Суенгинско-анчешевская группа свит ($Є_1$ san); 3 – Бердско-майская серия (D_{1-2} bm) 4 – Буготакская свита (D_2 *bg*); 5 – Пачинская свита (D_3 *pč*); 6 –Юргинская свита (D_3 *jur*); 7 – Инская серия. Саламатовская (чингисская) и ярская толщи нерасчлененные (D_3-C_1 sm-jar); 8 – Мозжухинская серия нерасчлененная (D_3-C_1 mz); ***Магматические комплексы:*** 9 – Буготакско-тогучинский риодацит-базальтовый комплекс ($^{m}\nu D_2$ bt); 10 – Буготакско-тогучинский риодацит-базальтовый комплекс ($g\delta\pi D_2$ bt); 11 – Выдрихинский кварцдиорит-тоналитовый комплекс (C_{2-3}? Vd), 12 – Приобский монцодиорит-граносиенит гранитовый мезоабисальный комплекс, вторая фаза (главная): монцограниты, граносиениты, граниты, гранодиориты амфибол-биотитовые и биотитовые, среднезернистые, порфировидные с директивной текстурой ($\varepsilon\gamma P_3$-T_1p_2); 13 – Барлакский гранит-лейкогранитовый мезоабиссальный комплекс, первая фаза: монцолейкограниты и лейкограниты биотитовые, среднезернистые, реже монцограниты биотитовые и амфибол-биотитовые ($\varepsilon l\gamma T_{1-2}$ b_1).

Избыток ^{234}U в системе показан на рисунке 2б и определяется [30] как: $^{234}U_e = [^{234}U/^{238}U - 1]\cdot C_u$, где C_u – содержание урана в пробе, мкг/дм^3. $^{234}U_e$ растет с увеличением в растворе урана. При этом, мы видим, что максимальные величины $^{234}U_e$ характеризуют

воды, отобранные в пределах гранитоидов Приобского и Барлакского комплексов, которые и являются основными источниками урана в природных водах Обь-Зайсанской складчатой области. Пять точек, отвечающих низким значениям, относятся к зонам контакта этих гранитоидов с осадочными породами и говорят о значительном разубоживании концентраций урана инфильтрационными (метеорными) водами. Этот факт подтверждается также при анализе парных отношений активностей изотопов ^{238}U – ^{222}Rn, ^{234}U – ^{222}Rn, ^{226}Ra – ^{222}Rn и ^{228}Ra – ^{222}Rn (см. рис. 2в-е). Учитывая, что радон не может мигрировать далеко от эманирующего коллектора (период полураспада 3,8 сут.), его максимальная активность также характеризует воды гранитоидов при высокой активности изотопов урана и радия.

Изотопное отношение активностей $^{222}Rn/^{226}Ra$ варьирует в диапазоне от 7 до 23333. Это, по-видимому, означает, что практически весь растворенный в воде ^{222}Rn происходит за счет эманирующего коллектора. Лишь очень небольшая часть, составляющая в некоторых изученных объектах максимум 20 % всех атомов, растворенных в подземных водах, может возникнуть вследствие радиоактивного распада материнского нуклида $^{226}Ra^{2+}$ растворенного в этой воде [31]. Соотношение активностей $^{226}Ra/^{228}Ra$ в исследованных подземных водах варьирует в диапазоне от 0,2 до 64,0 при среднем значении 5,2. Это может означать, что водовмещающие породы содержат более высокие концентрации ^{226}Ra, чем ^{228}Ra. С другой стороны, это можно объяснить преимущественным выщелачиванием из вмещающих горных пород изотопа ^{226}Ra по сравнению с ^{228}Ra. Каждый ά-распад вызывает разрушение кристаллической решетки и мобилизацию дочерних продуктов. В ряду распада урана ^{238}U изотоп ^{226}Ra образуется после трех последовательных ά-распадов, в отличие от изотопа ^{228}Ra, который образуется только в результате одного ά-распада изотопа ^{232}Th. Следовательно, разрушение решетки после трех ά-распадов больше, чем после одного, что и обуславливает преимущественное накопление в подземных водах ^{226}Ra при взаимодействии в системе вода-порода.

В исследованных водах обнаружено радиоактивное неравновесие между изотопами ^{234}U и ^{238}U, принадлежащими к одному ряду. Изотопы ^{222}Rn и ^{226}Ra лучше переносятся водой, чем родительский изотоп ^{238}U. Содержания (активности) изотопов радия сильно варьируют и не зависят от активности исходного изотопа ^{238}U. Полученные результаты соотношения активностей $^{226}Ra/^{228}Ra$ (медиана 5,2) в изученных водах позволяют предположить, что водовмещающие горные породы содержат более высокие концентрации ^{226}Ra, чем ^{228}Ra. Из-за более длительного времени взаимодействия воды с водовмещающими породами наблюдается тенденция роста отношения γ и активности изотопов радия с глубиной, что требует дополнительных исследований.

Полевые и аналитические работы выполнены при финансовой поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Список литературы

1. Gascoyne, M. Palaeoclimate determination from cave calcite deposits / M. Gascoyne // Quaternary Science Reviews. – 1992. – No. 11. – P. 609-632.

2. Tieh, T.T. Release of uranium from granitic rocks during in situ weathering and initial erosion (Central Texas) / T.T. Tieh, E.B. Ledger, M.W. Rowe // Chem. Geol. – 1980. – No. 29. – P. 227-248.

3. Guthrie, V.A. Changing uranium distribution during weathering of granite / V.A. Guthrie, J.D. Kleeman // Chemical Geology. – 1986. – No. 54 (1-2). – P. 113-126.

4. Langmuir, D. Aqueous Environmental Geochemistry / D. Langmuir // Prentice Hall, New Jersey. – 1997. – 600 p.

5. Fritz, P. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry / P. Fritz, J. C. Fontes // Elsevier, Amsterdam. – 1980. – 557 p.

6. Ivanovich, M. Uranium Series Disequilibrium: Applications to Environmental Problems, second ed / M. Ivanovich, R. S. Harmon // Clarendon Press, Oxford. – 1992. – 910 p.

7. Baskaran, M. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry / M. Baskaran // Springer, New York.

– 2011. – 951 p.

8. Osmond, J.K. The theory and uses of natural uranium isotopic variations in hydrology / J.K. Osmond, J.B. Cowart // At. Energy Rev. – 1976. – V. 14. – P. 621-679.

9. Rosholt, J.N. Isotope fractionation of uranium in sandstone / J.N. Rosholt, W.R. Shields, E. L. Garner // Science. – 1963. – V. 139. – P. 224-226.

10. Kigoshi, K. Alpha-recoil 234Th: dissolution into water and the 234U/238U disequilibrium in nature / K. Kigoshi // Science. – 1971. – V. 173. – P. 47-48.

11. Чердынцев, В.В. Естественное разделение 234U и 238U / В.В. Чердынцев, П.И. Чалов // Открытия в СССР. – М.: УНИИПИ, 1977. – С. 28-31.

12. Krauskopf, K.B. Introduction to Geochemistry, third ed / K.B. Krauskopf, D.K. Bird // McGraw-Hill, New York. – 1995. – 227 p.

13. Elliot, T. Dissolved uranium, radium and radon evolution in the continental intercalaire aquifer, Algeria and Tunisia. J. Environ / T. Elliot, D.M. Bonotto, J.N. Andrews // Radioact. – 2014. – V. 137. – P. 150-162.

14. Osmond, J.K. Uranium disequilibrium in groundwater: an isotope dilution approach in hydrologic investigations / J.K. Osmond, H.S. Rydell, M.I. Kaufman // Science. – 1968. – V. 162. – P. 997-999.

15. Osmond, J.K. U-series nuclides as tracers in groundwater hydrology. In: Cook, P., Herczeg, A.L. (Eds.), Environmental Tracers in Subsurface Hydrology / J.K. Osmond, J.B. Cowart; – Springer, New York, 2000. – P. 145-173.

16. Novikov, D.A. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, Yu.G. Kopylova, A.N. Pyryaev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachev, A.F. Sukhorukova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh, A.A. Khvashchevskaya, P.N. Kalinkin, A.V. Petrozhitsky // Groundwater for Sustainable Development. – 2023. – V. 20. – 100886.

17. Novikov, D.A. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachyov, A.V. Chernykh // Geochemistry. – 2023. – V. 83. – № 4. – 126016.

18. Максимова, А.А. Токсичные элементы в подземных водах северных районов Обь-Зайсанской складчатой области / А.А. Максимова, А.В. Черных, Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.С. Деркачев, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Никитенков, А.А. Хващевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 17-26.

19. Никитенков, А.Н. Формы миграции химических элементов в радоновых водах юга Сибири / А.Н. Никитенков, Д.А. Новиков, Т.В. Корнеева // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – № 2. – С. 81-90.

20. Черных, А.В. Микрокомпоненты в природных водах Новосибирской городской агломерации: распределение, фон, аномалии / А.В. Черных, Д.А. Новиков, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.С. Деркачев // Химия в интересах устойчивого развития. – 2023. – Т 31. – № 4. – С. 465-476.

21. Деркачев, А.С. Уран в природных водах Горловского угольного бассейна / А.С. Деркачев, Д.А. Новиков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2023. – Т. 2. – № 2. – С. 50-57.

22. Пыряев, А.Н. Изотопно-концентрационная характеристика природных вод Новосибирской области как инструмент контроля их взаимодействия с окружением / А.Н. Пыряев, Д.А. Новиков, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.С. Деркачев, А.В. Черных, А.А. Хващевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 22-33.

23. Новиков, Д.А. Об открытии слаборадоновых вод – Инские источники / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, А.Ф. Сухорукова, Л.Г. Вакуленко, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, А.Н. Фаге, А.А. Хващевская, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, М.С. Мельгунов, П.Н. Калинкин, С.А. Растигеев // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 12. – С. 1714-1733.

24. Новиков, Д.А. Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Новобибеевского проявления радоновых вод / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, А.Н. Фаге, А.А. Хващевская, А.С. Деркачев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 233. – № 1. – С. 57-72.

25. Новиков, Д.А. Об открытии слаборадоновых вод – Седова Заимка / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, А.Ф. Сухорукова, Ф.Ф. Дульцев, А.С. Деркачев, А.В. Черных, А.А. Хващевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 61-73.

26. Деркачев, А.С. Природа радиоактивности дренажных вод карьеров Новосибирской области / А.С. Деркачев, А.А. Максимова, Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.Ф. Сухорукова, А.В. Черных, А.А. Хващевская // Горные науки и технологии. – 2022. – Т. 7. – № 3. – С. 216–230.

27. Novikov, D.A. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky–Mochishche zone of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, R. Kamenova-Totzeva, T.V. Korneeva // Environmental Earth Sciences. – 2021. – V. 80. – No. 216.

28. Novikov, D.A. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachyov // Groundwater

for Sustainable Development. – 2021. – V. 15. – 8 p.

29. Новиков, Д. А. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) / Д. А. Новиков, А. Ф. Сухорукова, Т. В. Корнеева // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – № 4. –С. 1255–1274.

30. Cowart, J.B. Uranium isotopes in groundwater: Their use in prospecting for sandstone-type uranium deposits / J.B. Cowart, J.K. Osmond // Journal of Geochemical Exploration. – 1980. – V. 8. Iss. 1-2. – P. 365-379.

31. Przylibski, T.A. Mean annual (222) Rn concentration in homes located in different geological regions of Poland: first approach to whole country area / T.A. Przylibski, A. Zebrowski, M. Karpińska, J. Kapała, K. Kozak, J. Mazur, D. Grządziel, K. Mamont-Cieśla, O. Stawarz, B. Kozłowska, B. Kłos, J. Dorda, M. Wysocka, J. Olszewski, M. Dohojda // J. Environ. Radioact. – 2011. – V. 102. Iss. 8. – P. 735-41.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ВОДЫ ИСТОЧНИКА ДУСТУГ-ХЕМ (ЮГО-ЗАПАДНАЯ ТУВА)

Оргильянов А.И.[1], Аракчаа К.Д.[2], Крюкова И.Г.[1], Пыряев А.Н.[3,4], Сметанина И.В.[5], Рычкова К.М.[6]

[1]ФГБУН Институт земной коры СО РАН, Иркутск, aiorgil@crust.irk.ru

[2]ГБУ Научно-исследовательский институт медико-социальных проблем и управления Республики Тыва, Кызыл, chodura@yandex.ru

[3]ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск

[4]Новосибирский государственный университет, Новосибирск, pyrayev@gmail.com

[5]ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, unpc_voda@mail.ru

[6]Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, klara6@inbox.ru

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены результаты обследования уникального проявления субминеральных вод хлоридного натриевого состава с повышенной минерализацией, расположенного вне области континентального засоления. Во вмещающих породах, представленных девонскими гранитами, содержание хлора близко к среднему для континентальной коры. Источник приурочен к зоне глубинного разлома, что подтверждается повышенным содержанием гелия в воде. Это позволяет предположить глубинное происхождение хлора. В то же время вода источника Дустуг-Хем имеет метеорное происхождение, о чем свидетельствует изотопный состав водорода и кислорода.

Ключевые слова: *ландшафт, подземные воды, химический состав, изотопы кислорода и водорода, гелий.*

Abstract: In this paper was given the results of the investigation of unique submineral chloride sodium spring of water with increased mineralization. This spring is situated outside of continental salt-bearing region. Content of chlorine in the water-bearing rocks, which represented of Devonian granites, is close to average for continental crust. This spring is connected with deep fault zone what confirmed by high content of helium in water. It is possible to assume of deep genesis of chlorine. At the same time, water of Dustug-Chem spring has the meteoric genesis, what confirmed by isotopic composition of hydrogen and oxygen.

Key words: *landscape, ground waters, chemical composition, isotopes of oxygen and hydrogen, helium.*

Для формирования состава подземных вод большое значение имеют характеристики ландшафта, определяющие условия взаимодействия в системе «вода-порода». Изучением гидрогеохимических особенностей различных природных зон занимались такие известные ученые, как Каменский Г.Н., Перельман А.И., Пиннекер Е.В., Шварцев С.Л. и другие. В настоящее время такие исследования активно проводятся специалистами томской гидрогеохимической школы (Копылова Ю.Г., Гусева Н.В.,

Лепокурова О.Е. и др.). В результате этих исследований установлено, что каждому типу ландшафта соответствует свой геохимический тип подземных вод.

Однако в некоторых случаях в природе встречаются такие проявления подземных вод, которые не соответствуют общепринятым представлениям о геохимии ландшафтов. Одним из таких примеров может служить минеральный источник Дустуг-Хем (Шуйский), разгружающийся в правом борту реки Дустуг-Хем (Бай-Тайгинский район Республики Тыва). Он расположен в предгорьях хребта Цаган-Шибету, являющегося юго-западным обрамлением Тувинского межгорного прогиба (рис. 1).

Климат района континентальный, с продолжительной холодной зимой и относительно коротким, но жарким летом. Район выхода источника характеризуется достаточно высоким увлажнением, о чем свидетельствует наличие хорошо развитой древесной и кустарниковой растительности в узкой и глубоко врезанной долине р. Дустуг-Хем.

В тектоническом отношении место выхода источника приурочено к субширотной Шуйской зоне разломов, разделяющей область Тувинского прогиба и структуры Монгольского Алтая.

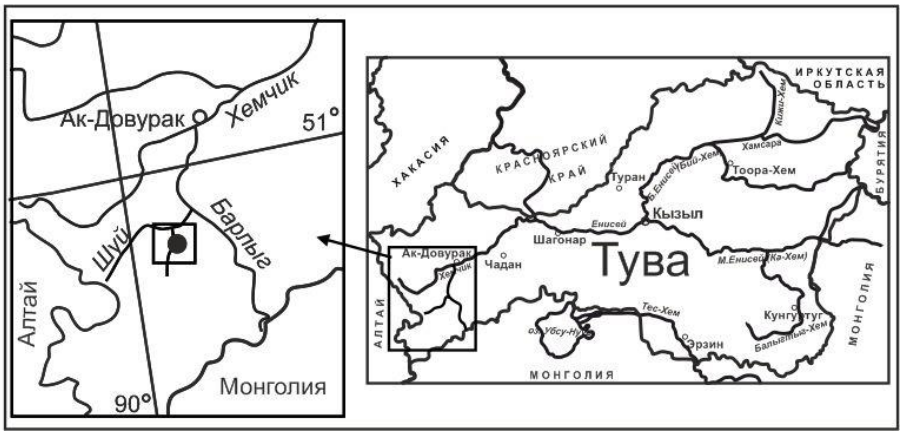


Рис. 1. Местоположение источника

Источник представляет собой полосу выходов воды вдоль подножия крутого правого склона, сложенного девонскими гранитами Чингекатского массива буйбинского комплекса.

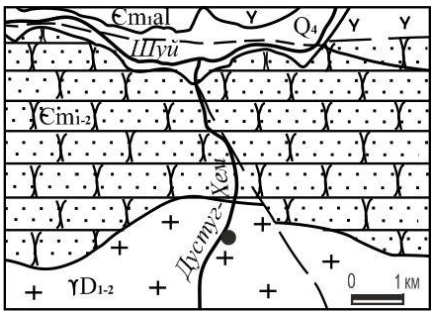


Рис. 2. Геологическое строение места выхода источника [1].

Примерно в 1 км севернее источника отмечается контакт девонских гранитов с прорываемыми ими отложениями нижнего-среднего кембрия, представленными сланцами, метаморфизованными песчаниками, измененными эффузивами (рис. 2) [1].

22 июля 2023 г. совместным отрядом НИИ медико-социальных проблем и управления Республики Тыва, Томского политехнического университета и Института земной коры СО РАН (г. Иркутск) было проведено комплексное обследование источника Дустуг-Хем, в процессе которого были отобраны пробы воды для производства общего химического, микроэлементного и изотопного анализов, а также образцы горных пород. Химический анализ воды производился в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ (Томск) и

лаборатории гидрогеологии ИЗК СО РАН (Иркутск), анализ образцов горных пород выполнен в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН. Определение изотопного состава водорода и кислорода воды выполнено с использованием прибора IRMS MAT 253 Finnigan, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II, в ЦКП «Многоэлементных и изотопных исследований» ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН (Новосибирск). Содержание гелия определялось в ИЗК СО РАН с помощью прибора ИНГЕМ-1. Содержание радона измерялось в поле радиометром альфа-активных газов РГА-01, уровень гамма-изучения – дозиметром-радиометром МКС-01СА1М.

Координаты самого высокодебитного («основного») выхода источника: N 50°44,923′; E 90°17,073′; абс. отм. 1492 м. Суммарный дебит источника не менее 5 л/с. Температура воды, измеренная в нескольких выходах, составила от 9,2 до 13,8 °С при температуре воздуха +18 °С. Эти значения выше фоновых величин температуры воды для источников этого района, которые обычно составляют не более 6 °С. Такая же температура воды для описываемого источника приводится в работах [2, 3]. Температура воды в реке Дустуг-Хем составила 6,8 °С.

Результаты общего химического анализа, приведенного в таблице, показывают, что вода характеризуется весьма своеобразным хлоридным натриевым составом с минерализацией, превышающей 2 г/л. Отметим, что в р. Дустуг-Хем, несмотря на перевод её названия – «соленая река», вода ультрапресная (0,068 г/л), с преобладанием в составе гидрокарбонатов и кальция. Величины коэффициентов rNa/rCl > 0,87 и Cl/Br > 300 свидетельствуют о том, что воды источника являются малометаморфизованными инфильтрационными [4]. О формировании состава воды за счет растворения хлоридных натриевых солей говорят и низкие значения коэффициента SO4/Cl [5].

Таблица 1. Химический состав воды

Показатель	Источник Дустуг-Хем											
	Выход «основной»			Выход «глазной»			Выход нижний, «под скалой»			Река Дустуг-Хем		
T, °C	13,3			12,7			9,2			6,8		
pH	7,3			7,25			7,66			7,1		
	Форма выражения анализа											
	мг/л	мг-экв/л	% экв	мг/л	мг-экв/л	% экв	мг/л	мг-экв/л	% экв	мг/л	мг-экв/л	% экв
K^+	5,78	0,15	1,27	8,88	0,23	0,98	15,3	0,39	1,05	0,53	0,01	2,02
Na^+	239,7	10,43	89,31	510	22,17	94,29	790	34,35	92,83	5,9	0,26	38,29
Mg^{2+}	2,43	0,2	1,71	1,3	0,11	0,5	2,0	0,16	0,43	0,61	0,05	7,5
Ca^{2+}	18,04	0,9	7,71	20	1,0	4,25	42	2,1	5,68	7,01	0,35	52,22
Cl^-	359,85	10,15	84,75	778	21,95	93,76	1251	35,29	95,19	7,45	0,21	28,19
Br^-	0,30	0,0	0,0	0,15	0,0	0,0	0,25	0,0	0,0	-	-	-
SO_4^{2-}	18,31	0,38	3,18	29	0,6	2,56	44	0,92	2,48	2,0	0,04	5,59
HCO_3^-	74,44	1,22	10,19	38	0,62	2,66	40	0,66	1,78	28,07	0,46	61,74
F^-	3,8	0,2	1,67	4,34	0,23	0,98	3,48	0,18	0,5	0,5	0,03	3,53
NO_3^-	1,33	0,02	0,18	0,86	0,01	0,04	1,04	0,02	0,05	0,44	0,01	0,95
H_4SiO_4	37,0			23,1			28,9			15,0		
TDS	761,3			1391,4			2188,8			67,5		
Формула Курлова	$\frac{Cl85HCO_3 10SO_4 3F2}{(Na+K)90Ca8Mg2}$			$\frac{Cl94HCO_3 3SO_4 2F1}{(Na+K)95Ca4Mg1}$			$\frac{Cl95SO_4 2HCO_3 2F1}{(Na+K)94Ca6}$			$\frac{HCO_3 62Cl28SO_4 6F3NO_3}{Ca52(Na+K)40Mg8}$		
Генетические коэффициенты												
Cl^-/Br^-	1200			5187			5004			-		
SO_4^{2-}/Cl^-	0,05			0,04			0,04			0,27		
rNa^+/rCl^-	1,03			1,01			0,97			1,24		

Из микроэлементов в воде исследованных выходов содержатся повышенные. относительно кларка для подземных вод зоны гипергенеза [6] концентрации лития – 0,222мг/л; мышьяка – 0,13 мг/л; брома – 0,3 мг/л; рубидия –0,108 мг/л; стронция – 0,79 мг/л; молибдена – 0,018 мг/л; цезия – 0,032 мг/л; бария – 0,152 мг/л; вольфрама – 0,016 мг/л; урана – 0,012 мг/л.

Содержание растворенного гелия составило $5{,}63 \times 10^{-4}$мл/л (в 10,8 раз выше атмосферного фона). Отметим, что авторами работы [3] для вод этого источника были зафиксированы близкие содержания гелия – $1{,}55\text{-}2{,}65 \times 10^{-3}$ мл/л. Это свидетельствует о приуроченности источника к зоне тектонического нарушения.

Значения δD_{VSMOW} и $\delta^{18}O_{VSMOW}$ в водах источника Дустуг-Хем составили -111,7 и -15,35 ‰, соответственно. В качестве объекта сравнения была использована проба воды, отобранная из р. Дустуг-Хем (δD_{VSMOW} = -100,3 ‰; $\delta^{18}O_{VSMOW}$ = -14,19 ‰).

Содержание радона в источниках Дустуг-Хема колеблется от 40 до 370 Бк/л. Радиологическая обстановка на территории аржаана нормальная, жесткое гамма-излучение не превышает 33 мкР/час.

Авторы предыдущих исследований связывали происхождение своеобразного хлоридного натриевого состава и повышенной минерализации воды с девонским соленосным горизонтом [3]. Действительно, на территории Тувы имеются проявления высокоминерализованных вод, связанные с соленосными отложениями девона. Это известные аржааны Хурегечи и Торгалыг, но они расположены на расстоянии не менее 100 км от источника Дустуг-Хем. О существовании вод с повышенным содержанием хлора в пределах исследуемого региона упоминал Н.М. Рассказов [7]. Он связывал наличие хлора в породах, а соответственно, и в циркулирующих в них подземных водах с рудными зонами, подвергшимися воздействию гидротермальных растворов. Было рекомендовано использовать воды такого состава в качестве гидрохимического показателя зон сульфидной минерализации в районах хорошо промытых, раскрытых гидрогеологических структур.

Результаты анализа образцов горных пород, отобранных в месте одного из выходов источника на правом берегу р. Дустуг-Хем, а также, для сравнения, на левом берегу, показали, что эти породы представляют собой типичные граниты, состоящие из кварца, плагиоклаза и К-полевого шпата со следами слюды. Химический состав образцов, отобранных на обоих берегах реки, практически одинаков: SiO_2 73,9-78,6 %; Al_2O_3 11,8-14,7 %; K_2O 4,4-5,7 %; Na_2O 3,1-3,4 %. Остальные окислы содержатся в количестве менее 1 %. Содержание Cl в образце гранита с правого берега составило 0,04 %, а с левого берега – 0,1 %. Такое незначительное содержание все же несколько превышает среднее содержание хлора для гранитов верхней части континентальной коры (0,019 %) [8], но вряд ли может интерпретироваться как соленосный горизонт. О присутствии эвапоритовых минералов в горных породах не упоминают ни авторы [1], ни геологи-съемщики соседних листов.

О наличии глубинного питания вод источника Дустуг-Хем свидетельствует повышенная величина отношения изотопов гелия $^3He/^4He$, равная $2{,}0 \times 10^{-7}$, что в два раза превышает среднее значение для палеозойской коры [9].

Изотопный состав кислорода и водорода вод источника и реки Дустуг-Хем несколько различается. Тем не менее, их положение относительно глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) [10] – сходно: значения дейтериевого эксцесса $d_{exc} = \delta D - 8\delta^{18}O$ [11], соответственно, составили 11,1 и 13,2 ‰. Очевидно, что воды как источника, так и реки Дустуг-Хем имеют метеорное питание. Однако для вод источника характерны более обедненные значения величин δD и $\delta^{18}O$, что обусловлено, по-видимому, усредненным спектром атмосферных осадков, питающих его в течение всего сезона, в то время как для реки изотопный состав вод может определяться кратковременными сезонными изменениями, поскольку находится в сильной зависимости от поверхностного стока [12].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что проявление хлоридных натриевых вод Дустуг-Хем, расположенное в зоне достаточного увлажнения, не связано с девонским соленосным горизонтом, и в формировании его состава участвуют глубинные компоненты. Это подтверждается повышенными значениями концентрации растворенного гелия, изотопного отношения $^{3}He/^{4}He$ и температуры воды. В то же время, очевидно, что воды этого источника имеют метеорное происхождение, о чем свидетельствует изотопный состав кислорода и водорода вод источника. Вероятно, метеорные воды, инфильтрующиеся на достаточно большие глубины, прогреваются и захватывают глубинные газовые и минеральные компоненты, а в дальнейшем мигрируют наверх, разгружаясь в виде источника Дустуг-Хем.

Источник Дустуг-Хем, несмотря на труднодоступность, является весьма популярным аржааном, на котором принимают лечение много людей, приезжающих из различных районов Республики Тыва. В народной практике он используется при заболеваниях периферической нервной системы, сердечно-сосудистой системы, опорно-двигательного аппарата, желудочно-кишечного тракта [13]. Лечение происходит как в виде питья, так и посредством ванных процедур, подогревая воду на костре. Этот источник является уникальным проявлением солоноватых вод в среднегорной ландшафтной зоне достаточного увлажнения с отсутствием в непосредственно примыкающей к месту выхода части геологического разреза соленосных отложений. Учитывая несомненные целебные качества, своеобразный химический состав и расположение в живописной местности источник нуждается в охране, т.к. его можно считать геологическим памятником.

Работа выполнена в рамках Базового проекта НИР (Гос. задание) № 0280-2021-0008 и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Определения изотопного состава кислорода и водорода вод проведено по государственному заданию ИГМ СО РАН (122041400171-5).

Список литературы

1. Геологическая карта СССР. 1:200000. Серия Западно-Саянская. Лист М-46-VII. Объяснительная записка / В.А. Благонравов, Л.А. Благонравова, Т.А. Ильина и др.; ред. Г.А. Кудрявцев. – М.: Недра, 1967. – 83 с.

2. Пиннекер Е.В. Минеральные воды Тувы / Е.В. Пиннекер; ред. И.С. Ломоносов. – Кызыл: Тувинское кн. изд-во, 1968. – 106 с.

3. Ойдуп Ч.К. Гидроминеральные ресурсы в подземных источниках Тувинского прогиба / Ч.К. Ойдуп, Ю.Г. Копылова, С.С. Шацкая // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов: мат-лы II Междунар. науч.-практ. конф. Республика Тыва, оз. Дус-Холь, б/о «Силбир», 1-4 июля 2015, т. 2. – Абакан: ООО «Кооператив «Журналист», 2015. – С. 99–102.

4. Карцев А.А. Принципы и пути палеогидрогеологических исследований (при изучении генезиса нефтяных и газовых залежей и оценке перспектив нефтегазоносности) / А.А. Карцев; отв. ред. О.К. Ланге // Проблемы гидрогеологии: Доклады к собранию Международной ассоциации гидрогеологов, 1960 г. – М.: Госгеолтехиздат, 1960. С. 271–276.

5. Гусева Н.В. Формирование химического состава подземных солоноватых и рассольных вод Тувинского прогиба и его обрамления / Н.В. Гусева, Ю.Г. Копылова, Ч.К. Ойдуп и др. // Геология и геофизика, 2018. – Т. 59, – №2. – С. 172–182. DOI:10.15372/GiG20180203.

6. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Недра, 1998. – 367 с.

7. Рассказов Н.М. Результаты гидрогеохимических исследований района хребта Кирса (Западный Саян) / Н.М. Рассказов; отв. ред. Л.Л. Халфин // Материалы по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири. – Томск: Изд. Томского Университета, 1964. – С. 417–420.

8. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры / Н.А. Григорьев; отв. ред. В.Н. Сазонов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 382 с.

9. Дучков А.Д. Оценки теплового потока Тувы по данным об изотопах гелия в термоминеральных источниках / А.Д. Дучков, К.М. Рычкова, В.И. Лебедев и др. // Геология и геофизика, 2010. – Т. 51, – №2. – С. 264–276.

10. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. Ninth edition. – Springer Nature Switzerland AG, 2021. – 528 p.

11. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. – 1964. – V. 16, – № 4. – P. 436–468.
12. Пыряев А.Н. Изотопно-концентрационная характеристика природных вод Новосибирской области как инструмент контроля их взаимодействия с окружением / А.Н. Пыряев [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2023. – Т. 334, – № 2. – С. 22–33.
13. Аракчаа К.Д. Аржаанология – инновационное направление в изучении аржаанов Тувы и феномена аржаанного лечения / К.Д. Аракчаа // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов: мат-лы IV Межд. науч.-практ. конф. Республика Тыва, г. Кызыл, 2-5 июля 2019, т. 4. / Гл. ред. К.Д. Аракчаа. – Кызыл: ООО «ИПП «Журналист», 2019. – С. 14–34.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА МИКРОКОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ПРИРОДНЫХ ВОД ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ОЗ. БАЙКАЛ

Петров В.В.
Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, pvvaquq@mail.ru

Аннотация. В настоящей статье представлены некоторые результаты мониторинга микрокомпонентного состава природных вод Прибайкалья. В регионе создана режимная наблюдательная сеть. Выполнено опробование водопунктов сети в летнее время. Показано, что концентрации ряда компонентов, в том числе Rb, Li, W, в азотных термальных водах имеют повышенные значения по сравнению с концентрациями в водах других водопунктов наблюдательной сети. Концентрации устойчивы во времени.
Ключевые слова: *природные воды, оз. Байкал, наблюдательная сеть, мониторинг, микрокомпоненты*

Annotation. This article presents some results of monitoring the microcomponent composition of natural waters in the Baikal region. A security surveillance network has been created. The water points of the network were tested in the summer. It has been shown that the concentrations of a number of components, including Rb, Li, W, in nitrogen thermal waters have increased values compared to concentrations in the waters of other water points and are stable over time.
Key words: *natural waters, Lake Baikal, observation network, monitoring, microcomponents*

Начиная с 2015 г. ФГБУ «ВСЕГЕИ» проводятся исследования опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории, в рамках реализации программы «Геологическое изучение опасных процессов, связанных с ЦЭЗ БПТ» ФЦП «Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие БПТ на 2012-2020 годы». Цели и задачи данных работ в целом приведены в [4]. Работы проводились в пределах Байкальского субаквального артезианского бассейна и его субаэральных бортовых частях. В комплекс этих работ, в частности, входили гидрогеохимические исследования газов и природных вод, как поверхностных, так и подземных. Важный вклад в изучение углеводородов данного региона [1, 2 и др.] и помощь в организации наших исследований внес профессор ИГУ (кафедра нефти и газа) В.П. Исаев. В ходе исследований было отобрано и проанализировано более 600 проб воды и газа. Результаты гидрогеохимических исследований, касающихся изучения общего химического состава вод, их микрокомпонентного и изотопного состава, а также изучение газового состава вод и состава свободного газа были опубликованы ранее [3]. Одним из важных результатов, полученных при гидрогеохимических исследованиях региона, явилось выявление устойчивой ассоциации микрокомпонентов в азотных термах (Li, B, Na, Si, K, Rb, Hf, W),

что позволило использовать этот показатель для прогнозирования участков разгрузки глубоко залегающих подземных вод в БПТ [3].

В ходе выполняемых работ, в том числе, была создана наблюдательная сеть мониторинга природных вод и газов. Основная цель наблюдений - оценка степени изменчивости физико-химических параметров природных вод и газов во времени, в том числе, регистрация резкие изменения некоторых из этих параметров. Результаты мониторинга, позволяют определить тенденции изменений интенсивности выделения и состава наблюдаемых флюидов во времени, что обеспечивает повышение геологической изученности, контроль за безопасностью состояния экологической системы озера Байкал, безопасность населения и объектов, а также уменьшить ущерб от воздействия опасных процессов и их последствий.

Сеть мониторинга в границах ЦЭЗ БПТ включает 14 пунктов, расположенных вдоль восточного побережья оз. Байкал от пос. Мурино (Иркутская обл.) до бухты Змеиная в зал. Чивыркуйский (Респ. Бурятия).

Пункты наблюдения характеризуют разные типы природных вод в разных типах водопунктов:

1 – напорные термальные воды, мигрирующие из пород кристаллического фундамента, изучались в самоизливающей скважине курорта Загза (ПН1), источнике Змеином (ПН10) и грифоне в Кулиных болотах (ПН11);

2 - грунтовые холодные воды, распространенные в неоген-четвертичном водоносном горизонте, изучались в:

А - скважинах: район пос. Новый Энхэлук (ПН2), пос. Исток (ПН4), пос. Посольское (ПН5), пос. Танхой (ПН13);

Б - колодце у ж/д ст. Прибой (ПН12);

В - шурфах на берегу оз. Байкал – сор Посольский (ПН9), сор Черкалово (ПН9-8), мыс Облом (ПН7), мыс Тонкий (ПН14), пос. Ранжурово (ПН3) у берега р. Селенги; у берега оз. Кулиного (ПН6).

Комплекс работ на пунктах наблюдения включает в себя отбор проб воды, свободного или водорастворенного газа для последующих химико-аналитических исследований (изучение общего химического, микрокомпонентного и изотопного составов кислорода и водорода воды и компонентного и изотопного состава углерода метана), а также экспресс-аналитические исследования портативными приборами (Hanna Instruments 98121), непосредственно в момент опробования (замер физико-химических параметров воды pH, Eh, T^0C).

Мониторинговые работы на пунктах наблюдения проводились с 2015 г. по ныне 3 раза в год, что, совместно с выбранным широким спектром химико-аналитических исследований, позволяет минимизировать негативный эффект, связанный с дискретностью получаемого материала и в конечном счете дать оценку изменчивости (или же напротив стабильности) во времени процессов, связанных с миграцией УВ. Общий объём опробования в ходе мониторинга составил 240 проб воды и газа.

Изучение общего химического состава вод и компонентного состава газов выполнялось в лаборатории ООО ПГК «Сибгеоком» (г. Иркутск); анализ содержаний 31 химического элемента в пробах воды выполнялся масс-спектрометрически с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в ЦХАЛ ФГБУ «ВСЕГЕИ» с использованием масс-спектрометра Agilent 7700.

Полученные результаты находятся в процессе обработки и анализа и ждут своего опубликования. Здесь приводятся лишь некоторые из них.

Охарактеризуем режим общей минерализации воды в перечисленных водопунктах (рис. 1) летом 2017-2020 гг.

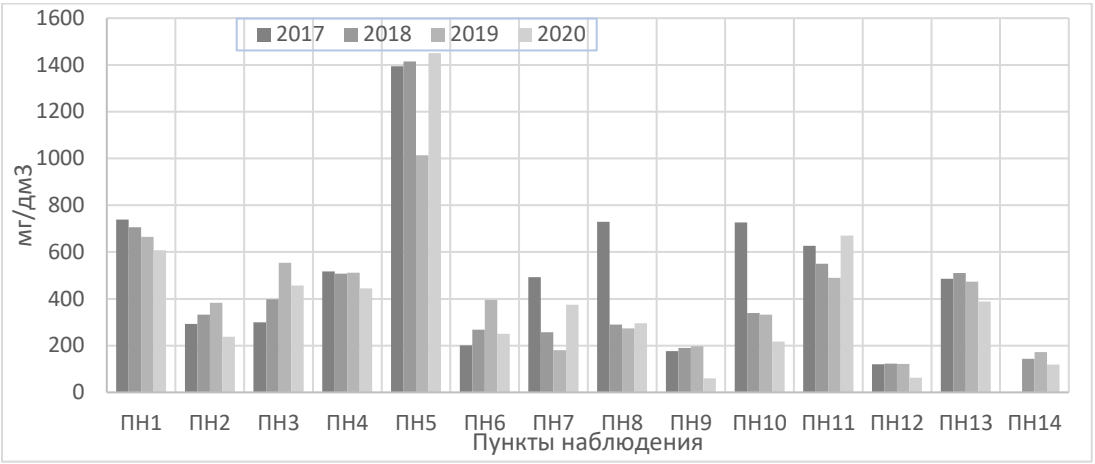


Рис. 1. Изменение минерализации природных вод в 2017-2020 гг.

Приведенная диаграмма позволяет выделить две группы водопунктов, отличающихся степенью постоянства величины общей минерализации воды в них: 1 – ПН1, 2, 3, 4, 5, 9, 11, 12, 13, 14; 2 – П6, 7, 8, 10. В первой группе водопунктов отмечается в течение рассматриваемых лет сравнительно устойчивая величина степени минерализации воды. В эту группу входят как напорные термальные воды, так холодные грунтовые воды скважин и колодца. Во вторую – входят воды шурфов, расположенных на берегу оз. Байкал и Кулиного озера. Также в этой группе оказался источник Змеиный с термальными водами (ПН10). Изменение минерализации воды в водопунктах второй группы, вероятно, связано с ростом общегодовой величины атмосферных осадков и изменением уровня воды в водоемах, на берегах которых они располагаются. Особенно этот процесс проявился на берегу Байкала, в котором еще в 2017 году был аномально низкий уровень (абс. отм. 455,54 м), а к 2020 г. и позднее (2021-2022 гг.) уровень резко поднялся (абс. отм. 457,85) [5] и воды озера подтопили берега. Сравнительно низкая по степени минерализации вода озера (100-200 мг/дм^3) вероятно разбавила грунтовые воды, понизив их минерализацию.

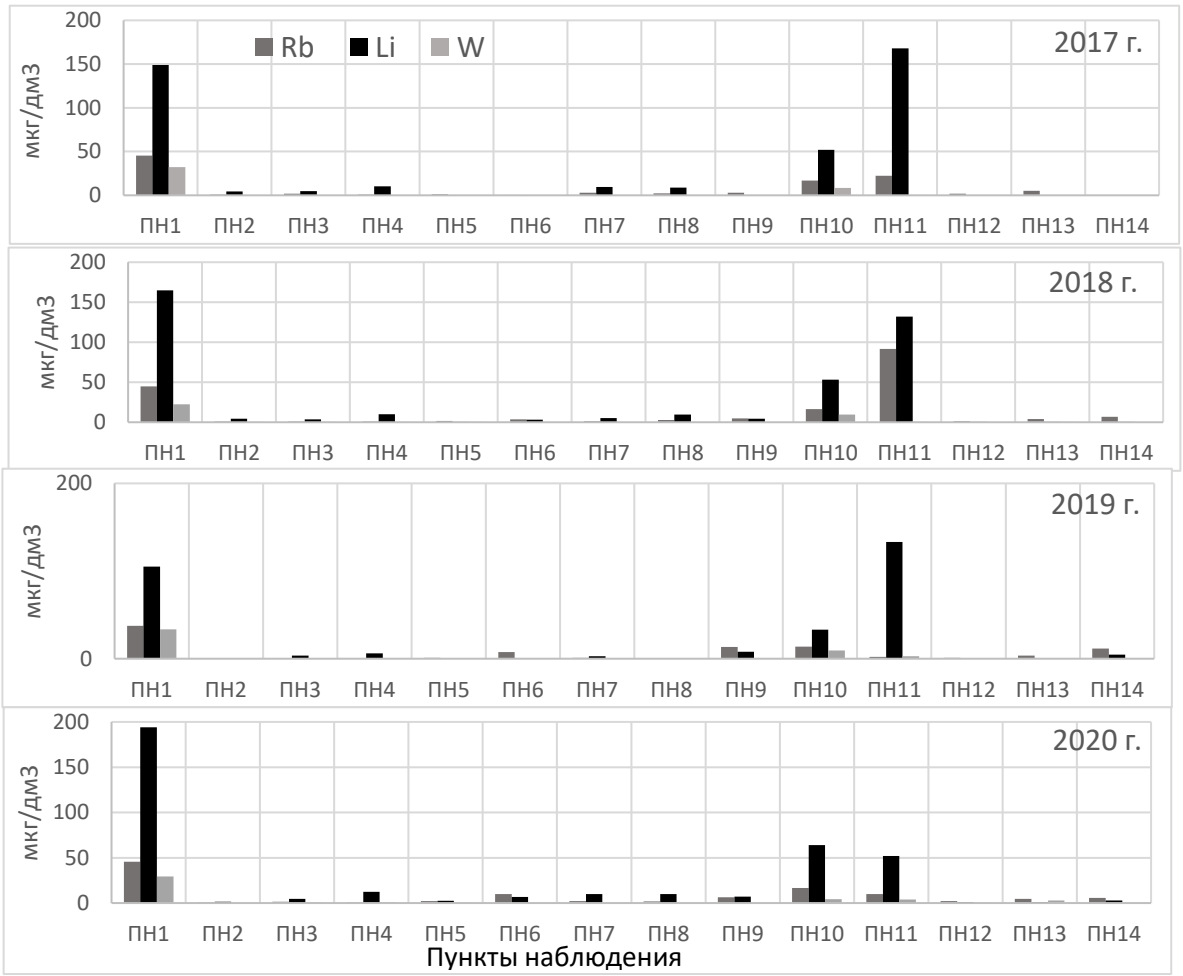


Рис. 2. Изменение концентраций микрокомпонентов (Rb, Li, W) в водах пунктов наблюдения

Имея в виду данное обстоятельство рассмотрим некоторые особенности режима микрокомпонентного состава вод в водопунктах наблюдательной сети в данный период времени. Обратим основное внимание на режим таких компонентов как литий, рубидий и вольфрам, отражающих общую закономерность изменения концентраций микрокомпонентов. ICP-MS анализ показал присутствие в водах региона довольно богатого спектра макро- и микрокомпонентов. Наиболее часто встречаемые компоненты обнаружены в следующих концентрациях: более 100 мг/л – Na; более 10мг/л - Si, K, Al, Fe; более 1 мг/л - B, Mn, Sr; более 100 мкг/л - Li, Zn, Rb, Ba, W; более 10 мкг/л - Ni, Cu, As, Mo; более 1 мкг/л - Co, Y, La, Pb, U; более 0,01 мкг/л - Te, Ag, Cd, Hf, Bi.

Таблица 1. Концентрации компонентов химического состава вод пунктов наблюдения (лето 2017 и 2020г г.), в мкг/дм^3

Пункт набл.	Li	B	Na	Si	K	Rb	Sr	Mo	La	W
Лето 2017 г.										
ПН1	**149**	**2630**	**298100**	**48900**	**7640**	**45,3**	152	0,62	0,003	**32,4**
ПН2	4,5	19,8	**33500**	136	1870	0,74	159	<0.006	0,0099	<0.01
ПН3	4,91	13,8	8760	11700	**6130**	2,02	297	0,12	1,99	<0.01
ПН4	10,4	29,2	11600	10600	1170	0,7	720	0,63	0,0049	0,034
ПН5	<2	**145**	**124900**	10200	**259100**	1,29	**1310**	**10,7**	0,012	0,054

ПН6	<2	11,9	11500	**36500**	173	0,37	93,2	0,007	0,0059	<0.01
ПН7	9,38	27,2	8210	9090	**5220**	3,01	328	0,054	**4,03**	0.01
ПН8	8,94	**45,8**	20600	9830	4360	2,31	**586**	0,11	**3,8**	<0.01
ПН9	<2	15,2	4900	9150	2610	3,02	120	0,92	**2,83**	0,024
ПН10	**51,9**	**194**	**168100**	**50700**	4040	**16,7**	88,2	0,094	0,056	**8,48**
ПН11	**168**	**303**	**215100**	**65300**	**6480**	**22,2**	**1970**	0,56	0,052	0,45
ПН12	<2	5,78	6360	6400	576	1,91	105	0,045	0,42	<0.01
ПН13	<2	**120**	**42200**	10400	4400	5,18	**2810**	<0.006	0,003	<0.01
Лето 2020 г.										
ПН1	**194**	**2260**	**246000**	**42200**	**6710**	**45,6**	116	1,1	0,0062	**29,3**
ПН2	1,52	12,7	14700	346	1440	0,65	410	0,018	0,0083	<0.01
ПН3	4,53	10,9	10900	12100	**5450**	1,34	231	1,81	0,2	0,63
ПН4	12,4	24,7	8620	9260	909	0,66	714	0,9	0,0033	**0,91**
ПН5	2,51	**107**	**91700**	9340	**181900**	2,21	**1150**	**6,98**	0,12	0,53
ПН6	6,79	8,39	**35900**	19700	5040	**9,96**	197	0,012	0,012	<0.01
ПН7	9,88	32,8	7040	8550	3620	2,17	443	0,065	1,05	<0.01
ПН8	9,86	11,4	7650	9630	2090	1,8	417	0,04	**3,93**	0.01
ПН9	6,93	**63,9**	4950	10300	1790	6,53	127	0,049	**11,1**	<0.01
ПН10	**63,9**	**156**	**143200**	**43800**	2380	**16,8**	101	0,15	0,077	**4,2**
ПН11	**52**	**126**	**151100**	**45100**	1510	**9,75**	134	0,26	0,54	**3,96**
ПН12	1,21	5,21	3330	4910	468	2,3	81,5	0,092	0,35	0,039
ПН13	1,16	**101**	**41200**	10800	3430	4,52	**2470**	0,26	0,0027	**3,01**
ПН14	2,92	14,3	4350	2550	2140	5,85	116	0,034	**4,56**	<0.01
Основные статистические характеристики										
Xср	4,96	15,79	10430,33	8183,44	1913,01	3,16	285,28	0,84	1,03	0,28
σ	2,73	9,11	5736,05	4504,13	1068,99	1,74	161,74	0,47	0,59	0,16
V%	55,13	57,69	54,99	55,04	55,88	55,08	56,70	55,32	57,29	57,33
3σ	8,20	27,33	17208,16	13512,39	3206,98	5,22	485,23	1,40	1,77	0,48
X+3σ	13,17	43,12	27638,50	21695,83	5119,99	8,38	770,50	2,25	2,80	0,77

Примечания. 1. Компоненты, выделенные жирным шрифтом обнаружены в аномальных концентрациях. 2. Компоненты, обнаруженные по преимуществу (в 70-90% проб) в концентрациях ниже средних значений в таблицу не включены.

Выполненный ранее статистический анализ [3] позволил выявить устойчивую ассоциацию компонентов в азотных термах Байкальской рифтовой зоны, включающую: Li, B, Na, Si, K, Rb, Hf, W. Исследования компонентного состава термальных вод показали устойчивость в выборке большинства указанных выше компонентов. Здесь они обнаружены в аномальных концентрациях (на уровне 3σ и выше). Фоном для выявления аномалий в термальных водах приняты средние значения концентраций компонентов вод разного типа, как термальных, так поверхностных и грунтовых. При расчетах использованы результаты анализов 162 проб, отобранных из источников, скважин, колодцев, озер, рек, ручьев, озер.

Результаты мониторинга подтвердили выводы, касающиеся устойчивости во времени повышенных концентраций компонентов в термальных водах (ПН1, ПН10, ПН11) и состава ассоциации компонентов (Li, B, Rb, W и др), выявленной ранее. На рис 2 и в табл. 1 видно, что летом 2017-2020 гг. (временной интервал выбран для примера, в

другие годы наших наблюдений картина та же) компоненты данной ассоциации в термальных водах находятся в повышенных концентрациях по сравнению с концентрациями их в водах других пунктов наблюдения. Вместе с тем понижение концентраций отмечено летом 2020 г. Например, по литию в пунктах ПН10, ПН11, эта величина уменьшилась более чем в два-три раза (со 120-170 до 50-60 мкг/дм^3). Важно отметить также устойчивые по величине и постоянству во времени концентрации компонентов в термальных водах самоизливающей скважины курорта Загза (ПН1). В ходе мониторинга в летние месяцы 2017-2020 гг. отобрано и проанализировано 55 проб воды.

Таким образом, наблюдение за режимом концентраций микрокомпонентов в природных водах восточного берега оз. Байкал показал устойчивость во времени их повышенных концентраций в азотных термальных водах. Кроме того, контакт напорных вод с грунтовыми и поверхностными водами влияет на режим общей минерализации и микрокомпонентного состава этих (напорных) вод.

Список литературы

1. Исаев, В. П. Проблемы седиментогенеза и нефтегазообразования в Байкальской рифтовой зоне // Материалы Международной научной конференции «Рифты литосферы». – Екатеринбург, 2002. – С. 331–332.

2. Исаев, В. П., Коновалова Н. Г., Михеев П. В. Природные газы Байкала // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43, № 7. – С. 638–643.

3. Петров, В.В. Геохимические особенности природных вод Центральной экологической зоны Байкальской природной территории / В.В. Петров, Д.В. Яковлев. - Региональная геология и металлогения. №95, 2023, с.42-53

4. Петров, О. В. Основные результаты работ по геологическому изучению процессов, связанных с миграцией углеводородов в акватории озера Байкал / О. В. Петров, А. И. Ларичев, В. А. Шахвердов, А. В. Брылина, Ю. П. Кропачев, О. В. Дронь, В. П. Исаев, А. Г. Кичигин, А. М. Лыгин // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 94. – С. 4–28. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_4-28.

5. https://www.sbras.ru/files/news/docs/vlinie_urovnya_vody.pdf

К ВОПРОСУ О ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕРОВОДОРОДНЫХ ВОД ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Труфанов А.И., Чернышов В.И.
Вологодский государственный университет, Вологда, trufanov_ai@mail.ru, kvarkeno58@mail.ru

Аннотация. Подземные сульфидные (сероводородные) воды на территории Вологодской области практически не используются. Дана характеристика двух групп проявлений сульфидных вод региона: Шелохачской и Волоховской. Приведён анализ, обосновано первоочередное изучение проявлений Шелохачской группы. Предложена схема проведения геологоразведочных работ.

Ключевые слова: *воды минеральные природные, сероводород, Шелохачская группа, поиски и оценка.*

Abstract: Groundwater sulfide water is practically not used in the Vologda Oblast. Characteristics of two groups of sulfide water occurrences in the region aregiven: Shelokhach and Volokhov. An analysis is given, and the primary study of the manifestations of the Shelokhach group is substantiated. A scheme of geological exploration is proposed.

Key words: *natural mineral waters, hydrogen sulfide, Shelokhach group, prospecting and evaluation.*

На территории Вологодской области подземные минеральные воды имеют практически повсеместное распространение, выходят на дневную поверхность в виде источников или вскрываются буровыми скважинами. Здесь выделяются четыре бальнеологические группы минеральных вод: лечебные без специфических компонентов и свойств (сульфатные, сульфатно-хлоридные, хлоридные), сульфидные (сероводородные), железистые и бромные. Из них в настоящее время достаточно широко используются лечебные воды без специфических компонентов и свойств и бромные. Вместе с тем, с нашей точки зрения, особого внимания для изучения и последующего использования заслуживают сульфидные (сероводородные) минеральные воды – природные воды различной минерализации и ионного состава, содержащие более 10 мг/дм3 общего сероводорода.

Подземные воды и источники с повышенным содержанием сероводорода широко распространены в западной части Вологодской области, являясь частью обширной провинции сульфидных вод севера Русской плиты. Провинция имеет прерывистый характер и тянется от Рижского взморья (Кемери), через Псковскую область (Хилово, Великие Луки, Назимово), Молого-Шекснинскую низменность в Вологодской области, далее в бассейны рек Онеги, Ваги (Вандыш, Мартыновская, Самойловская и др.), Северной Двины (Пускино, Семеновское, Солониха) и Вычегды (Сольвычегодск, Серёгово). На базе некоторых месторождений сероводородных вод открыты курорты, такие как, например, Кемери, который функционирует уже не менее двухсот лет, Хилово, Великие Луки, Сольвычегодск, где эти воды используются при лечении кожных, сердечно-сосудистых заболеваний, а также нервной системы и органов движения. Вместе с тем, невзирая на значительные перспективы и работы многих исследователей, в том числе и одного из авторов данной статьи [2-4], сульфидные воды на территории Вологодской области являются наименее изученными из перечисленных месторождений и проявлений.

Ареал распространения сероводородных вод приурочен к области развития локально загипсованных отложений верхнекаменноугольного и нижнепермского возраста (рис. 1).

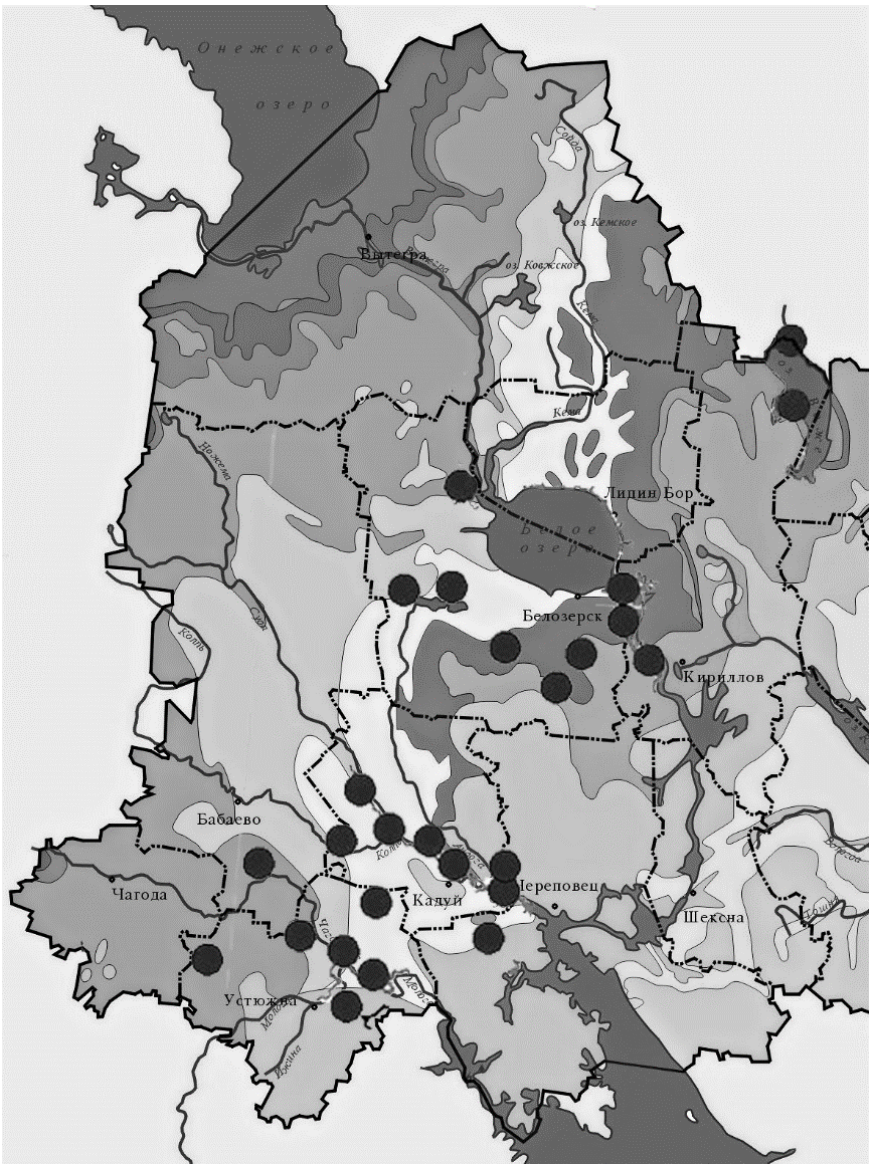


Рис. 1. Источники и скважины с сероводородными водами (показаны черными кружками)

Возникновение здесь очаговых месторождений сульфидных вод определяется благоприятным сочетанием широкого распространения торфяных болот с загипсованностью коренных пород. Большинство исследователей формирование сероводородных вод связывает с биохимическими процессами разложения сульфатов торфяной органикой (гуминовыми кислотами), проникающими с грунтовыми водами в загипсованные водовмещающие породы. При этом предполагается, что органическое вещество торфяных вод является хорошей питательной средой для развития сульфатвосстанавливающих бактерий. Принимая во внимание доказанность формирования сульфидных вод в гипергенных условиях за счет процессов бактериального восстановления сульфидов, предлагаются и другие механизмы образования сероводорода в подземных водах [3, 5]. Так, А. А. Дзюба [1] считает, что образование сероводорода в ряде случаев можно связать «с возможной современной гидротермальной деятельностью на древних платформах».

На территории Вологодской области выделяются две группы проявлений сульфидных вод. Первая группа – Шелохачские сероводородные источники (рис. 2) и их аналоги в загипсованных отложениях верхнекаменноугольного возраста.



Рис. 2. Шелохачские сероводородные источники в пойме р. Чагодощи.

Сероводородные воды этой группы занимают обширную территорию с естественными выходами минеральных вод и вскрыты скважинами в Устюженском, Бабаевском, Череповецком и Кадуйском районах (Усть-Колпь, Шелохачь, Нежбуй, Куракино, Попчиха, Елехово и др.). По химическому составу это слабоминерализованные (0,3-2,0 г/л), сульфатно-гидрокарбонатные магниево-кальциевые воды с содержанием сероводорода от 3 до 54,4 мг/л. Близкими аналогами сульфидных вод Молого-Судского междуречья являются воды широко известных месторождений Кемери в Прибалтике, Хилово в Новгородской области, Langehsalz в Германии.

Вторая группа т. н. Волоховских серных источников в Кирилловском и Белозерском районах известна с конца XVIII века. Сероводородные воды в виде родников разгружаются по правобережью р. Шексны (Лукинское, Десятовская, Чайка), в долине р. Ворбозомки (Ладунино) и западнее Ворбозомского озера (Иловские источники). К этой же группе следует отнести идентичные по составу и близкие по условиям формирования источники района озера Азатского и родник у д. Селище. Сульфидные воды этой группы родников встречаются в местах распространения загипсованных пород нижней перми. По составу воды сульфатные кальциевые, слабоминерализованные (1,14 – 2,6 г/л) с содержанием сероводорода от 3 до 10 мг/л.

Наиболее перспективными для первоочередного изучения, с нашей точки зрения, являются площади распространения Шелохачских сероводородных источников и их аналогов. Кроме кондиционно высокого, до 54,4 мг/л, содержания сероводорода, их потенциал увеличивается за счёт значительных ресурсов сероводородных вод. Район распространения подземных вод с содержанием сероводорода свыше 10 мг/л в междуречье Мологи и Суды занимает площадь около 2 тыс. кв. км. Удельный дебит скважин, пробуренных на глубину до 30 м у деревень Усть-Колпь и Елехово, составляет 2 – 10 л/с.

Наиболее известны воды родников у д. Шелохачь. Воды Шелохачских источников давно привлекали к себе внимание местного населения и использовались ими без соответствующего медицинского наблюдения при лечении главным образом кожных заболеваний. В руслах ручейков, идущих от источников, скапливаются отложения грязи. Эта грязь применялась в больнице пос. им. Желябова для лечения заболевания периферических неврозов (ишиас) и миозита.

Однако анализ имеющихся материалов по природным особенностям, геологическому строению и гидрогеологическим условиям района позволяет заключить, что каптаж источников минеральных сероводородных вод у д. Шелохачь нецелесообразен, так как в весеннее половодье они затапливаются и сильно

разбавляются поверхностными водами. На вскрытие кондиционных минеральных сероводородных вод перспективна площадь от д. Шелохачь до оз. Ваня, где по геолого-гидрогеологическим предпосылкам на глубине 10-15 м залегают напорные воды верхнего карбона с содержанием сероводорода более 10 мг/л (рис. 3).

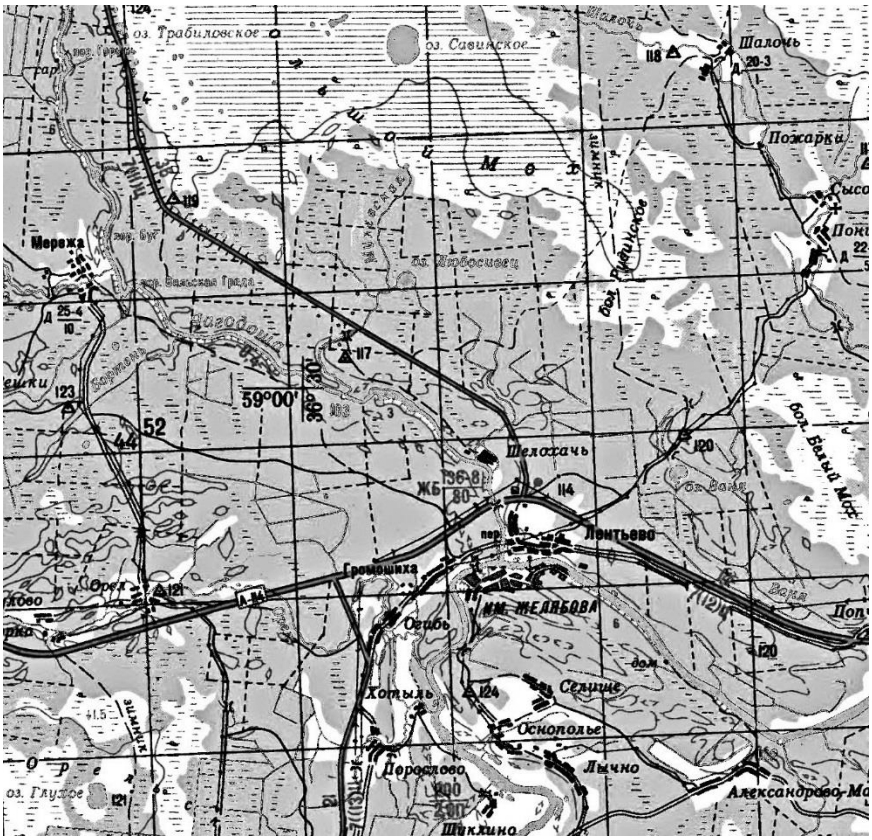


Рис. 3. Район проведения поисково-оценочных работ

Для выявления и оценки месторождения сероводородных вод предлагается проведение поисково-оценочных работ. Целевым назначением работ является оконтуривание в пределах перспективной площади месторождения сероводородных минеральных лечебных подземных вод промышленной значимости и его изучение со степенью, достаточной для предварительной оценки эксплуатационных запасов месторождения и участка, намечаемого к первоочередному промышленному освоению.

Исследования перспективной площади необходимо сориентировать на водоотбор лечебных вод из самоизливающихся скважин. Помимо надёжных и стабильных (в отношении количества и качества лечебных вод) условий будущей эксплуатации скважинный водоотбор получить их более высокую степень минерализации и увеличение содержания сероводорода, которые, в свою очередь, являются важнейшими показателями эффективности бальнеолечения. Глубину изучения следует ограничить изолинией кондиционных в отношении содержания сероводорода по разрезу подземных вод. Судя по общим гидрогеохимическим закономерностям образования сероводорода, глубина скважин не превысит 50 м.

На стадии поисковых работ на перспективной площади необходимо: обосновать наличие месторождения сероводородных минеральных лечебных вод в пределах перспективной площади, определить его границы в плане и разрезе; оценить эксплуатационные запасы (ЭЗ) месторождения по категории C_2 (выявленные ЭЗ); выделить в границах месторождения перспективный участок для проведения оценочных работ.

На стадии оценки месторождения площадь работ ограничивается предполагаемым контуром кондиционных по содержанию сероводорода (10 мг/л) минеральных подземных вод верхнекаменноугольного водоносного комплекса и составит ~ 1 км^2. На этой стадии необходимо: установить основные факторы и закономерности формирования ЭЗ сероводородных МЛПВ (их количества и качества) в пределах выявленного месторождения; обосновать природную гидрогеологическую модель месторождения (участка); обосновать принципиальную схему водозабора и дать оценку ЭЗ по категории не ниже C_1; принципиально оценить возможное влияние планируемого водоотбора на различные компоненты природной среды; определить соответствие качества воды её целевому назначению и дать предварительную оценку его возможных изменений в процессе эксплуатации; оценить антропогенную нагрузку и санитарное состояние территории, дать предварительную оценку границ зон санитарной охраны и возможности её организации.

Достижение указанных целей обеспечивается комплексом геологоразведочных работ, включающим: маршрутное обследование территории, измерение расходов родников, топогеодезические работы, буровые работы, опробование, геофизические скважинные исследования, опытно-фильтрационные работы, лабораторные исследования, режимные наблюдения (мониторинг), камеральные работы.

Список литературы

1. Дзюба А.А. Сероводородные воды Сибирской платформы как возможный продукт современной гидротермальной деятельности/ А.А. Дзюба, Э.А. Рубинчик// Тезисы докладов Девятого Совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Иркутск- Петропавловск-Камчатский,1979. – С.159-160.

2. Труфанов, А. И. Исследование проб минеральной воды в Устюженском районе. Отчет Вологодского государственного технического университета. НИР № 28.14.2000. – 60 с.

3. Труфанов, А. И. К вопросу о формировании сероводородных вод Вологодской области // Вузовская наука – региону: Материалы второй региональной межвузовской научно-технической конференции / ВоГТУ. – Вологда, 2001. – С. 150-152.

4. Труфанов, А. И. Сероводородные источники севера Русской плиты как объекты природного наследия и бальнеологии / А.И. Труфанов, А.Р. Труфанов // Геология в школе и в вузе: сборник докладов на международной конференции – С-Петербург: РГПУ им. А.И. Герцена, 2017. – С. 270-273.

5. Щека В.А. Роль органического вещества в формировании сероводородных вод Кемери. / В.А. Щека, Е.А. Кладовшиков. Москва: ВИЭМС, 1984. – 205 с.

V. ИЗОТОПЫ В ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЕ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ХЛОРА ($\delta^{37}Cl$) И БРОМА ($\delta^{81}Br$) В СОЛЁНЫХ ОЗЁРАХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

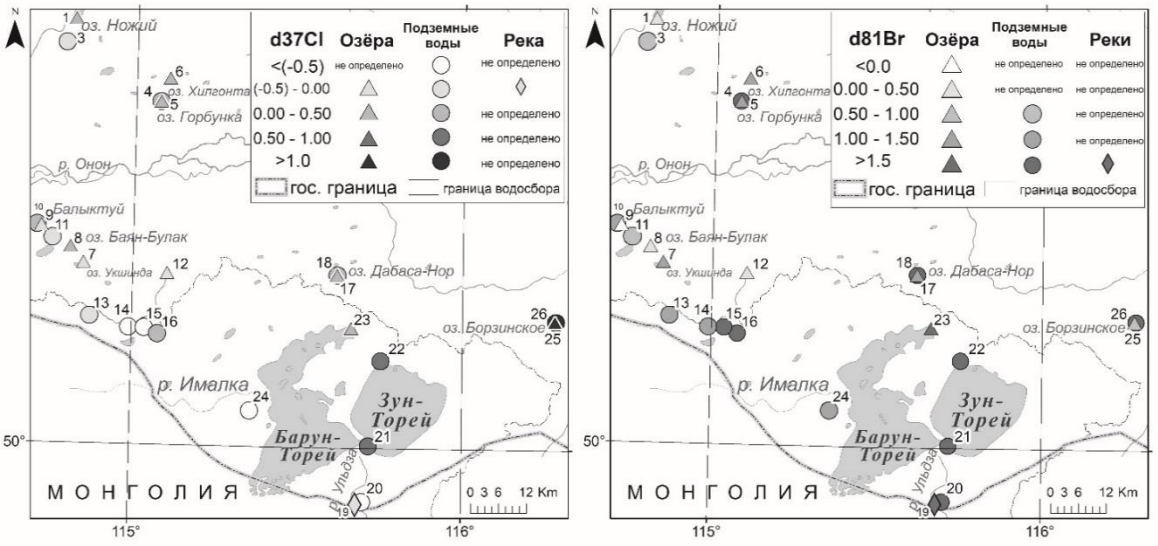
Дребот В.В.[1], Борзенко С.В.[2]
[1]*Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, DrebotVV@ipgg.sbras.ru*
[2]*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, svb_64@mail.ru*

Аннотация. Представлены первые результаты изучения стабильных изотопов $\delta^{37}Cl$ и $\delta^{81}Br$ в содовых и хлоридных озёрах Юго-Восточного Забайкалья, а также связанных с ними подземных вод. Оценено пространственное распределение показателей $\delta^{37}Cl$ и $\delta^{81}Br$, выявлена связь в системе озеро-скважина. Показана зависимость между химическим типом исследуемых озёр и содержаниями $\delta^{37}Cl$ и $\delta^{81}Br$, т.е. изотопный состав наследует геохимический облик исследуемых вод.
Ключевые слова: *изотопы хлора и брома, солёные озёра, испарительное концентрирование*

Abstract. The first results of the stable isotopes $\delta^{37}Cl$ and $\delta^{81}Br$ study in Na-rich and Cl-rich lakes of South-Eastern Transbaikalia, as well as associated groundwater, are presented. The spatial distribution of $\delta^{37}Cl$ and $\delta^{81}Br$ was assessed, and a relationship was identified in the lake-well system. The dependence of the chemical type of the studied lakes on the contents of $\delta^{37}Cl$ and $\delta^{81}Br$ was shown, i.e. the isotopic composition inherits the geochemical appearance of the studied waters.
Key words: *isotopes of chlorine and bromine, salt lakes, evaporative salt precipitation*

В настоящее время изотопно-геохимический подход широко используется при решении большого числа гидрогеологических задач. В частности, для изучения процессов солеобразования в последнее время все больше используются данные о стабильных изотопах хлора и брома. При этом, если ранее вышеописанный подход больше использовался для изучения формирования глубинных подземных вод с высокой солёностью [1–6], то в последнее время стал активно применяться и для систем солёных озер [7–9]. Целью настоящего исследования является исследование распределения стабильных изотопов хлора и брома в солёных озёрах Восточного Забайкалья, а также связанных с ними подземных вод.

Опробование проводилось в 2021 г. в наиболее засушливой и чувствительной к климатическим изменениям юго-восточной части Забайкальского края на границе с Монголией. Пробы воды обирались из десяти солёных озер (номера на карте указаны рядом с названием водоема в скобках): Барун-Торей (23), Ножий (1), Баян-Булак (8), Балыктуй (9), Укшинда (7), Горбунка (4), Дабаса-Нор (17), Борзинское (26), Хилганта (6), четырнадцати проб подземных вод и одной пробы из реки Ульдза (19), берущей начало в Монголии и впадающей в крупнейшее озеро – Барун-Торей (рис. 1)



а) б)

Рис. 1. Карта-схема точек опробования в зависимости от значений стабильных изотопов хлора (а) и брома (б)

Район исследования характеризуется недостаточностью увлажнения, обилием солнечного света, островным распространением вечной мерзлоты [10]. Абсолютные отметки рельефа территории понижаются с севера на юг – в сторону наиболее крупных озёр Зун и Барун-Торей (самая низкая отметка находится на дне озера Барун-Торей – 591.4 м н.у.м. в месте локализации изолированных от основного водоема озерков). Гидрохимические характеристики озёр подвержены значительным гидрологическим изменениям. Причина таких изменений – циклические колебания климатических условий, вызывающие периодическое наполнение и высыхание озёр [11]. Небольшие солёные озёра распределены как по центральной наиболее пониженной части Торейской впадины, так и по окраине на месте сочленения склоновых отложений предгорий с поверхностными отложениями днища впадины. Впадина заполнена современными осадочными отложениями, чаще всего представленными аллювиальными или озёрными песками, алевритами, галечниками и суглинками. Широкое распространение имеют осадочно-вулканогенные образования мела, представленные трахиандезибазальтами, туфами, алевролитами, песчаниками и т. д. [12]. В некоторых озёрах в летний и особенно зимний периоды, отмечается садка преимущественно хлористых и сульфатных солей натрия. На некоторых озёрах (оз. Дабаса-Нор, Горбунка и Борзинское) местное население собирает галит [13,14].

$^{37}Cl/^{35}Cl$ и $^{81}Br/^{79}Br$ определялись в канадской лаборатории Isotope Tracer Technologies Inc. (г. Уотерлу) методом масс-спектрометрии изотопных отношений при постоянном потоке (CF-IRMS) в сочетании с газовой хроматографией (GC), подробно описанной в работах [15,16] на приборах IsoPrime Micromass (Великобритания), Agilent 6890 (США) и CTC Analytics CombiPAL (Швейцария). Данные измерялись относительно Стандарта среднеокеанических хлоридов (SMOC) и Стандарта среднеокеанического брома (SMOB) соответственно и представлены в дельта-промилле (‰). Аналитическая точность анализов составляет ± 0,2‰. Концентрации хлора и общую минерализацию определяли в лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (г. Чита) титриметрическим методом. Содержание брома определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в Аналитическом центре Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск). Измерения pH проводили in situ с помощью карманного многофункционального измерителя AMTAST AMT03 (США).

Проведенные ранее исследования [12] показали, что исследуемые озёра по геохимическому типу являются содовыми и хлоридными с pH от 8,5 до 9,6 и минерализацией от 1 до 69,9 г/л. При относительно высоком значении pH (выше 9) в пределах содового типа были выделены два подтипа озёр: I подтип ($Na\text{-}HCO_3\text{-}CO_3$), к которому относятся водоёмы под номерами 1, 8, 9, 12 на рис. 1. Эти озёра выделяются меньшей солёностью воды и преобладанием в составе HCO_3^- и CO_3^{2-}, III подтип ($Na\text{-}Cl\text{-}HCO_3\text{-}CO_3$), к которому относятся водоёмы 7, 26, характеризуется более высокой минерализацией воды и преобладанием Cl^-. Хлоридный тип отличается более низким значением pH, но более высокой минерализацией воды (водоемы 4, 6, 17). Наибольшее содержание $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ определено в озёрах содового типа (в среднем 3,62 г/л). По мере увеличения солености содержание карбонатов постепенно уменьшается, параллельно снижается и pH. В хлоридных озёрах при более низких значениях pH среднее содержание $HCO_3^- + CO_3^{2-}$ составляет 0,45 г/л. В целом содержания брома и хлора в составе озёр изменяются от 0,22 мг/л до 212 мг/л и от 15,8 мг/л до 37095 мг/л соответственно. Минимальные их значения отмечаются в наполняющемся после длительного засушливого режима, сопровождающегося полным иссушением, озере Барун-Торей, а максимальные — в хлоридном озере Горбунка. Озеро Барун-Торей также отличается самой низкой минерализацией воды (0,9 г/л). Самым солёным озером является Борзинское (231 г/л). Озеро Горбунка имеет самое низкое значение pH (8,5) среди всех исследуемых водоёмов, а наиболее щелочными является озеро Балыктуй (pH 9,6) I подтипа и водоем без названия (под номером 9 на рис. 1).

Подземные воды также имеют пестрый химический состав. pH подземных вод колеблется от 6,7 (вода $Ca\text{-}HCO_3$, точки 3, 11, 13, 14, 15, 16, 18 на рис. 1) до 8,3 (вода $Na\text{-}HCO_3$, точки 10, 20, 21, 22, 24, 25), а минерализация - от 0,2 до 1,7 г/л. Максимальная концентрация брома и хлора подземных вод определена в скважине на водосборе оз. Горбунка (525 мг/л и 3,4 г/л соответственно), точка 5 на рис. 1. Река Улдза (точка 19 на рис. 1) пресная (минерализация=0,45 г/л) и слабощелочная (pH=7,8). По химическому типу: $HCO_3\text{-}Ca\text{-}Mg$.

В целом подземные воды имеют бóльший разброс значений $\delta^{37}Cl$ – от -1,1 до 1,2‰ SMOC, по сравнению с озёрными водами, имеющими более узкий диапазон (от -0,3 до +1,1‰ SMOC). Значения $\delta^{81}Br$ подземных вод обычно выше (от 0,7 до ~2,8 ‰ SMOB) по сравнению с озёрной водой (от -0,3 до +2,3 ‰ SMOB). Если сравнивать распределение значений соотношений стабильных изотопов хлора и брома в подземных водах, то отрицательные содержания характерны только для $\delta^{37}Cl$, тогда как для $\delta^{81}Br$ все значения положительные. Что касается озёр, то отрицательные значения $\delta^{37}Cl$ и $\delta^{81}Br$ в большей степени характерны для содовых озёр I подтипа. По мере увеличения степени испарения меняются типы и подтипы озёр [17], в озёрной воде накапливаются тяжелые изотопы (особенно ^{81}Br [7]). Таким образом, воды хлоридных и содовых озер III подтипа более обогащены ^{37}Cl и ^{81}Br, тогда как величина $\delta^{37}Cl$ содовых озер I подтипа не превышает 0,07 ‰.

Пространственная оценка распределения значений стабильных изотопов хлора и брома показывает, что обогащение ~~δ~~^{37}Cl и ~~δ~~^{81}Br происходит для подземных вод с северо-востока до озёр Зун и Барун-Торей на юго-запад, т.е. в сторону самых низких отметок (рис. 1). Положительные значения $\delta^{37}Cl$ (>0,2‰) обнаружены в озёрах Борзинское (26), Дабаса-Нор (4) и Горбунка (4), для которых характерно наличие в рапе отложений солей. Наиболее обогащенные ~~δ~~^{37}Cl воды обнаружены в самом солёном из содовых озёр Борзинском (точка 26, $\delta^{37}Cl$=1,05‰) и в подземных пресных водах $Na\text{-}HCO_3$ химического типа из скважины 25, расположенной на его берегу (~1,2‰) (рис. 1). В целом, величины $\delta^{37}Cl$ подземных вод близки к значениям озёрных вод, если они расположены на их берегах, в особенности если в этих озёрах отмечалась садка солей (озеро 4, 17 и 26). Например, помимо озера Борзинское (26) и наблюдательной скважины на его берегу (25) относительно высокое значение $\delta^{37}Cl$ было определено в воде скважины 18

($\delta^{37}Cl$=0,45‰) и в хлоридном озере Дабаса-Нор (17, $\delta^{37}Cl$=0,4‰). Положительные значения $\delta^{37}Cl$ обнаружены также в водах хлоридного озера Горбунка (4, $\delta^{37}Cl$=0,2‰) и воде из скважины, расположенной на его водосборе (5, $\delta^{37}Cl$=0,1‰).

Для вышеописанных парных систем (точки: 4 и 5, 10 и 9, 18 и 19, 26 и 25) наблюдается закономерная тенденция в поведении изотопов брома между грунтовыми и озёрными водами. Значения $\delta^{81}Br$ в скважинах всегда выше, чем в озёрах, т.е. наблюдается обеднение ^{81}Br в поверхностных водах относительно подземных. Аналогичная закономерность отмечается и для $\delta^{37}Cl$, однако, она менее выражена. Очевидно, что озёрные воды значительно разбавляются атмосферными осадками, в меньшей степени обогащёнными тяжелыми изотопами, однако степень участия их для каждого типа и подтипа озер различна. Следовательно, в грунтовых водах и озёрах наблюдаются разные соотношения данных изотопов. Сравнительно повышенные значения $\delta^{37}Cl$ и $\delta^{81}Br$ в подземных водах глубоких скважин (не подверженных испарению) указывают на дополнительный источник тяжелых изотопов – вмещающие породы. Следовательно, в них повышено содержание Cl^- и Br^-.

Как было упомянуто ранее, непостоянный гидрологический режим, который приводит к тому, что озёра почти полностью пересыхают и далее заново обводняются во влажный период, является основной природной особенностью района исследования. Последний раз озёра высыхали в конце прошлого века и оставались сухими вплоть до 2021 г. Начиная с 2021 года появились первые признаки обводнения. Это выражалось в появлении стока реки Ульдза (точка 19 на рис. 1), который полностью отсутствовал в течение предыдущих 20 лет, а также в появлении небольших озерков в котловине озера Барун-Торей, пробы, одной из которых были отобраны для данного исследования (точка 23). Результаты показали, что величина $\delta^{81}Br$ (1,5‰) в пробе 23 имеет выраженное отклонение от среднего значения этого показателя по выборке. Более того, оно ($\delta^{81}Br$ 1,5‰) наиболее близкое к значению $\delta^{81}Br$ в реке Ульдза (19, $\delta^{81}Br$=2,5‰), Повышенное содержание стабильных изотопов здесь нелегко объяснить предыдущими экспериментальными или теоретическими работами по фракционированию изотопов брома. Предположительно это может указывать на один источник в них брома, а именно на подземные воды, обогащенные этим элементом и/или участие самой реки в подрусловом питании этих изолированных озерков по трещинам и разломам, т.е. существует гидравлическая связь между этим озерком и рекой (рис. 2).



Рис. 2. Предполагаема схема разгрузки р. Улдза подземным стоком в устье у подножья Тореев

Таким образом, использование $\delta^{37}Cl$ и $\delta^{81}Br$ в сочетании с другими геохимическими данными позволяет улучшить понимание процессов, влияющих на химический состав вод высокой солёности, а также достоверно оценить влияние конкретных процессов на трансформацию их химического состава. Влияние процесса испарительного концентрирования на величину $\delta^{81}Br$ в солёных озёрах прослеживается через зависимость между величиной соотношения стабильных изотопов брома и его концентрациями. Связь между $\delta^{37}Cl$ и концентрацией хлора более сложная. Наименее солёные содовые озёра I подтипа в меньшей степени подвержены процессу испарения. Следовательно, точки, относящиеся к этому подтипу, имеют самые низкие значения соотношений стабильных изотопов. По мере увеличения степени испарения происходит смена наименее минерализованных содовых вод I подтипа на более минерализованные содовые III подтипа и хлоридный тип озер, параллельно утяжеляется изотопный состав воды [18] и накапливаются тяжелые изотопы хлора и брома. Поэтому, воды хлоридных и содовых озёр III подтипа в большей степени обогащены тяжелыми изотопами $\delta^{81}Br$ и частично $\delta^{37}Cl$. Однако наиболее высокие значения $\delta^{37}Cl$ (>0,2‰) определены в подземных и самосадочных озёрах, которые имеют также гидравлическую связь между собой. Существует еще одна тенденция в отношении солёных озёр и связанных с ними подземных вод. Для таких систем значения $\delta^{81}Br$ в скважинах выше, чем в озёрах, т.е. наблюдается обеднение ^{81}Br в поверхностных водах относительно подземных. Аналогичная закономерность отмечается и для $\delta^{37}Cl$, однако, она менее выражена. Полученные значения $\delta^{81}Br$ реки Ульдза и точки отбора проб единственного пресного озера Барун-Торей могут указывать на подземный источник питания подземных вод этого крупнейшего озера в регионе. Предполагается, что обогащение тяжелыми изотопами этих элементов происходит в результате потерь ^{35}Cl и ^{79}Br в открытой системе вода-порода под влиянием ряда различных процессов таких как диффузия, испарение, окисление и т.д., в масштабах геологического времени [5]. Однако, чем более открытой является среда, тем быстрее интенсивнее эти процессы [7]. Для уточнения полученных результатов планируется сопоставить соотношения стабильных изотопов хлора и брома ($\delta^{37}Cl$ и $\delta^{81}Br$) со стронцием ($^{87}Sr/^{86}Sr$) в водах, а также изучить $\delta^{37}Cl$ и $\delta^{81}Br$ во вмещающих породах и рапе исследуемых озёр.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ (№ 22-17-00035).

Список литературы

1. Алексеев С.В. и др. Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 3. С. 291–304.

2. Eastoe C.J. Stable chlorine isotopes in arid non-marine basins: Instances and possible fractionation mechanisms // Applied Geochemistry. Elsevier Ltd, 2016. Vol. 74. P. 1–12.

3. Shouakar-Stash O. et al. Geochemistry and stable isotopic signatures, including chlorine and bromine isotopes, of the deep groundwaters of the Siberian Platform, Russia // Applied Geochemistry. 2007. Vol. 22, № 3. P. 589–605.

4. Stotler R.L. et al. Stable bromine isotopic composition of coal bed methane (Cbm) produced water, the occurrence of enriched81 br, and implications for fluid flow in the midcontinent, USA // Minerals. MDPI AG, 2021. Vol. 11, № 4.

5. Stotler R.L., Frape S.K., Shouakar-Stash O. An isotopic survey of δ81Br and δ37Cl of dissolved halides in the Canadian and Fennoscandian Shields // Chem Geol. 2010. Vol. 274, № 1–2. P. 38–55.

6. Алексеева Л.П. и др. Изотопы хлора и брома в рассолах Западной Якутии // Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2015. Т. 13. С. 19–30.

7. Hanlon C. et al. Comparison of δ81Br and δ37Cl composition of volatiles, salt precipitates, and associated water in terrestrial evaporative saline lake systems // Isotopes Environ Health Stud. 2017. Vol. 53, № 5. P. 446–465.

8. Henkemans E. et al. A landscape-isotopic approach to the geochemical characterization of lakes in the Kangerlussuaq region, west Greenland // Arct Antarct Alp Res. 2018. Vol. 50, № 1. P. 1–20.

9. Drebot V.V. et al. Variability of chlorine and bromine stable isotopic composition in a closed system

of saline lakes and groundwaters during the drought season in the region of southeastern Transbaikalia and northeastern Mongolia // Proceedings WR-17 & AIG-14. Sendai, 2023. P. 1–5.

10. Давыдова Н.Д. Изменения в компонентах степных геосистем Юго-восточного Забайкалья в условиях потепления климата // Аридные экосистемы. 2022. Т. 28, № 90. С. 3–10.

11. Обязов В.А., Кирилюк В.Е., Кирилюк А.В. Торейские озера как индикатор многолетних изменений увлажненности Юго-восточного Забайкалья и Северо-восточной Монголии // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3, № 3. С. 204–232.

12. Borzenko S. V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia) // Applied Geochemistry. Elsevier, 2019. Vol. 103. P. 72–84.

13. Павлова В.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Приаргунская. Лист M-50-XV, XXI (Борзя, Даурия). Объяснительная записка [Электронный ресурс]. Москва, 2015. 1–206 с.

14. Куриленко А.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Даурская. Лист M-50-XIV (Ниж. Цасучей), XX (Соловьевск). Объяснительная записка [Электронный ресурс] / под ред. Нечепаев Е.В. М: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2019.

15. Shouakar-Stash O., Drimmie R.J., Frape S.K. Determination of inorganic chlorine stable isotopes by continuous flow isotope ratio mass spectrometry // Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2005. Vol. 19, № 2. P. 121–127.

16. Shouakar-Stash O., Frape S.K., Drimmie R.J. Determination of bromine stable isotopes using continuous-flow isotope ratio mass spectrometry // Anal Chem. 2005. Vol. 77, № 13. P. 4027–4033.

17. Borzenko S. V. et al. Ecosystems of soda lakes in the North-East of Central Asia in search of answers to the challenges of the time // Baikal – Gateway to Asia. Buryat Scientific Center of SB RAS Press, 2021. P. 59–62.

18. Борзенко С.В. Изотопный состав вод солёных озёр Восточного Забайкалья // ДАН. 2019. Т. 488. № 2. С. 176-180.

АНОМАЛЬНО ЛЕГКИЙ ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ КИСЛОРОДА НЕФРИТА КАВОКТИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ЕГО ФОРМИРОВАНИЕ

Кислов Е.В., Посохов В.Ф.

Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, evg-kislov@ya.ru

Аннотация. В настоящей статье показано, что для аподоломитового нефрита Кавоктинского месторождения характерен аномально легкий изотопный состав кислорода $\delta^{18}O$ -15,80 ÷ -21,50 ‰. Контактовые метасоматические породы при широких вариациях также достигают легких изотопных отношений -21,50 ÷ +8,90 ‰. Вмещающие породы района месторождения имеют более тяжелый изотопный состав кислорода: гранит -7,51 ÷ -0,71 ‰, амфиболит -8,38 ÷ +9,60 ‰, доломитовый мрамор +20,80 ÷ +24,10 ‰. Гранит – не источник флюида, не контактирует с нефритовыми телами, обеспечивает региональный разогрев, активизирующий метеорный флюиды. Предположено, что выделяющаяся при декарбонатизации доломита углекислота выносила из флюида изотопно тяжелый кислород. Этим объясняется аномально легкий изотопный состав флюида и нефрита.

***Ключевые слова**: нефрит, изотопный состав кислорода, метеорный флюид, углекислота*

Abstract. This article shows that the dolomite type nephrite of the Kavokta deposit is characterized by an abnormally light oxygen isotopic composition $\delta^{18}O$ -15.80 ÷ -21.50. Contact metasomatic rocks with wide variations also reach light isotopic ratios of -21.50 ÷ +8.90 %. The host rocks of the deposit area have a heavier oxygen isotope composition: granite -7.51 = -0.71 %, amphibolite -8.38 = +9.60 %, dolomite marble +20.80 = +24.10 %. Granite is not a source of fluid, does not come into contact with nephrite bodies, provides regional heating, activating meteor fluids. It is assumed that carbon dioxide released during the decarbonization of dolomite carried isotopically heavy oxygen out of the fluid. This explains the abnormally light isotopic composition of the fluid and nephrite.

***Key words**: nephrite, oxygen isotopic composition, meteor fluid, carbon dioxide*

Ранее была опубликована информация об аномально низких изотопных отношениях кислорода аподоломитового нефрита Витимской нефритоносной провинции по музейным образцам без точных привязок [2, 3]. Эти данные резко отличаются от преимущественно положительных составов аполомитового нефрита всех зарубежных месторождений [10, 14, 15]. Нами изучен изотопный состав кислорода нефрита, контактовых и вмещающих пород Кавоктинского месторождения **с целью установления причины аномального легкого изотопного состава нефрита**.

Кавоктинское – наиболее крупное месторождение аподоломитового нефрита России: на 01.01.2022 запасы по C_2 346,81 т. В 2021 г. добыто 70,36 т или 28,58 % добычи нефрита России. Месторождение выделяется высоким качеством нефрита – повышенной блочностью, светлой окраской белого, салатного оттенка, каемками прокрашивания бурого (медового) оттенка, позволяющими вырезать многоцветные изделия, интенсивной просвечиваемостью. Район месторождения сложен гранитами, диоритами 1 фазы позднепалеозойского витимканского комплекса. В меньшей степени проявлены небольшие тела лейкократовых гранитов 2 фазы витимканского комплекса. В гранитах залегают ксеноблоки сложной формы, останцы в провисах кровли пород талалинской толщи (ранее - суванихинской свиты) нижнего протерозоя (?). Они представлены метапесчаниками, кристаллическими сланцами, амфиболитами, доломитовыми мраморами. Полная метасоматическая зональность: доломитовый мрамор – кальцифир – кальцит-тремолитовый скарн с нефритом – эпидот-тремолитовый скарн – амфиболит или диорит. Чаще наблюдаются сокращенные варианты зональности [5, 7].

Измерения изотопного состава кислорода выполнялись на газовом масс-спектрометре FINNIGAN MAT 253 в ЦКП «Геоспектр» (ГИН СО РАН, Улан-Удэ), аналитик В.Ф. Посохов, с использованием двойной системы напуска в классическом варианте (стандарт - образец). Подготовка образцов для определения величин $\delta^{18}O$ проводилась с использованием метода лазерного фторирования (ЛФ) на опции “лазерная абляция с экстракцией кислорода из силикатов” в присутствии реагента BrF_5 по методу [12]. Расчеты проводились относительно рабочего стандарта O_2, калиброванного в шкале V-SMOW посредством регулярных измерений кислорода в международных стандартах NBS-28 (кварц) и NBS-30 (биотит). Правильность полученных значений контролировалась регулярными измерениями собственного внутреннего стандарта ГИ-1 (кварц) и лабораторного ИГЕМ РАН Polaris (кварц). Погрешность полученных значений величин $\delta^{18}O$ находилась на уровне (1s) ± 0.2 ‰.

Измерения изотопного состава кислорода в карбонатах выполнялись в виде CO_2 в режиме непрерывного потока гелия с применением конфигурации газбенч – масс-спектрометр FINNIGAN MAT 253 в ЦКП "Геоспектр" ГИН СО РАН. Разложение карбонатов осуществлялось по классической методике в 100% ортофосфорной кислоте при температуре 70°С в течении 2-4 часов. Для расчета $\delta^{18}O$ использовались международные стандарты кальцитов NBS-18 и NBS-19. Воспроизводимость полученных значений находилась на уровне ± 0,2 ‰.

Были исследованы 25 образцов керна из главных продуктивных залежей 1 участка Прозрачный, в меньше мере 18 и 19,20 участка Медвежий, вмещающих толщ района участка Медвежий, а также 4 штуфных образца бурого нефрита, гранита и амфиболита, взятых в ходе геологических маршрутов района участка Медвежий. Выполнено 44 анализа изотопного состава нефрита, контактовых пород: кальцит-тремолитового скарна по доломиту, эпидот-тремолитового скарна по амфиболиту, тесно связанных с телами нефрита эпидозита и кварц-полевошпатовой редкометальной породы; а также вмещающих пород района: гранита, гранодиорита, амфиболита, доломитового мрамора. Положение кварц-полевошпатовой породы не совсем ясно – либо она ранняя и экранирует флюид, что приводит к формированию нефрита, либо более поздняя и сечет нефритовые тела.

Результаты 16 анализов изотопного состава нефрита серовато-серой, светло-салатной, салатной, серовато-салатной, мутно-зеленой, оливковой, серовато-медовой, медовой, темно-бурой окраски попали в узкий диапазон $\delta^{18}O$ -15,80 ÷ -21,50 ‰.

Единственный анализ тремолитита показал -11,3 ‰. Результаты 7 анализов кальцит-тремолитового скарна: -21,50 ÷ +8,90 ‰, при этом 4 анализа соответствуют диапазону нефрита. Утяжеление состава вызвано наличием кальцита – он проанализирован в 4 образцах скарна и показал значения -4 ÷ +17 ‰. Результаты 8 анализов эпидот-тремолитового скарна: +5,00 ÷ -20,70 ‰, при этом только 3 анализа отвечают диапазону нефрита. Пониженное, хотя и более высокое, чем в нефрите, отношение в двух пробах метасоматического эпидозита -13,33 ÷ -6,94 ‰ и в двух пробах редкометальной по данным электронно-микроскопического исследования кварц-калишпатовой породы -7,60 ÷ -7,38. Форстеритовый скарн показал значение +9,20 ‰.

Результаты показывают отсутствие во вмещающих породах района месторождения таких низких изотопных отношений кислорода. В трех пробах гранита и гранодиорита -7,51 ÷ -0,71 ‰, в трех пробах амфиболита -8,38 ÷ +9,60 ‰, в двух пробах доломитового мрамора +20,80 ÷ +24,10 ‰.

Наиболее близки к полученным нами данным показатели месторождения Чхунчхон в Южной Корее [13]. Месторождение залегает в докембрийских доломитовых мраморах и амфиболовых сланцах, прорванных постколлизионными позднетриасовыми гранитами Чхунчхон. Карбонаты в доломитовом мраморе и нефрите имеют изотопный состав кислорода –0,1÷+18,2 ‰ и –0,4÷+3,5 ‰ соответственно. Эти данные согласуются с процессами декарбонизации, обусловленными инфильтрацией флюидов, образующих залежи нефрита в доломитовых мраморах в интервале температур от 330° до 430°C. Стабильные изотопные составы силикатов однородны и крайне обеднены ^{18}O: тремолит –9,9÷–7,9 ‰; диопсид –13,6÷–11,5 ‰; три образца гроссуляра –4,4, +10,4 и +11,5 ‰; клинохлор –9,5÷–9,0 ‰; две жилки талька –7,7 и –7,3 ‰. Кварц и амфибол во вмещающих амфиболовых сланцах также имеют переменный изотопный состав кислорода -4,7÷+0,5 ‰ и -8,4÷-0,6 ‰, соответственно, не находятся в изотопном равновесии. Предполагается, что образование нефрита произошло после метаморфизма вмещающих пород. Отчетливо отрицательные значения $\delta^{18}O$ также указывают на то, что флюид имел в основном метеорное происхождение и его циркуляция, скорее всего, была связана с внедрением во вмещающую толщу посттектонических гранитов Чхунчхон. Модельные расчеты авторов показывают, что соотношение флюид/порода было высоким, что изотопный состав кислорода в нефрите в основном амортизировался флюидной фазой, и что X_{CO2} флюидной фазы во время образования нефрита был очень низким [13].

Среди остальных месторождений нефрита минимальные значения показывает россыпной нефрит рр. Каракаш и Юрункаш в нефритоносной провинции Хотан Синцзян-Уйгурского автономного района Китая – +1,5÷+5,6 ‰ [11]. Изотопный состав флюидов, находящихся в равновесии с нефритом, указывает на смесь магматических вод и метеорных вод. Однако конечный флюид, находящийся в равновесии с нефритом, мог иметь изотопный состав, отличный от исходного флюида, поскольку рудообразующие флюиды для аподоломитового нефрита могли иметь различное происхождение. Учитывая, что месторождения нефритовых руд в Хотане связаны с гранитными породами, авторы полагают, что магматические воды, вероятно, были доминирующим рудообразующим флюидом.

В случае Кавоктинского месторождения аномально изотопно легкий кислород фиксируется в нефрите, в меньшей мере в связанных с ним метасоматических породах. Во вмещающих породах района он гораздо более тяжелый. Таким образом, источник флюида не связан с вмещающими породами. Прежде всего, на изотопный состав кислорода нефрита не влиял изотопный состав доломита, имеющего значения +20,80 ÷ +24,10 ‰ $\delta^{18}O$, хотя нефрит фактически образовывался по доломиту. Вряд ли он может быть связан и с поровыми водами доломита. Поровые воды морских осадков должны,

как и океанская вода в целом, иметь $\delta^{18}O$ около ноля. К тому же интенсивно метаморфизованный доломитовый мрамор вряд ли мог содержать поровый раствор в достаточном количестве.

Аномально низкий изотопный состав кислорода нефрита также не связан и с гранитами, для которых такие низкие значения не характерны. Гранит – не источник флюида, он не контактирует с нефритовыми телами Кавоктинского месторождения непосредственно, в отличие от большинства зарубежных месторождений. Гранит обеспечивает региональный разогрев, при котором были активизированы флюиды, аномально обедненные изотопом ^{18}O. При этом в самих граните и гранодиорите также обнаруживаются довольно низкие отношения изотопов кислорода -7,51÷-0,71 ‰, явно аномальные для гранита и гранодиорита.

В связи с этим высказанное ранее [2, 3] предположение, что нефритообразующий флюид имел метеорное происхождение, выглядит убедительно. Аномально легкий изотопный состав их кислорода был объяснен участием талых поверхностных вод [4]. Резко отрицательные отношений изотопов кислорода в других случаях объясняются и другими механизмами формирования: кинетическими эффектами [6] и термодиффузией [1, 8].

В работе [10], используя ранее полученные данные по изотопному составу кислорода нефрита Витимской нефритоносной провинции [3], были проведены расчеты изотопного состава кислорода во флюиде, равновесном при температуре 350°С по уравнению для тремолита. Для аподоломитового нефрита Витимской нефритоносной провинции получен изотопный состав кислорода флюида -19 ‰ $\delta^{18}O$. Если считать основным источником флюида метеорные воды, то они, имеющие по современным измерениям состав -14÷-16 ‰ $\delta^{18}O$, явно не достигают значений гипотетического флюида.

Для выяснения причины аномально низкого изотопного состава кислорода нами был проведен эксперимент - разложение кальцита и доломита концентрированной соляной кислотой с последующим измерением изотопного состава воды, образовавшейся в результате реакции и выделившейся из самой кислоты. При этом предположено, что изотопный состав воды в составе самой кислоты, который напрямую измерить невозможно, находится в пределах значений изотопного состава воды региона, в котором эта кислота производится: -10 ÷ -16 ‰ $\delta^{18}O$ V-SMOW. В результате измерения изотопного состава кислорода воды после реакции как с кальцитом, так и доломитом, получены значения -28 ‰ $\delta^{18}O$ V-SMOW. Эти очень низкие значения объяснены нами тем, что при реакции соляной кислоты с карбонатом выделяется CO_2, в результате изотопного обмена с водой обогащающаяся более тяжелым кислородом и выносящаяся из раствора. На этом принципе работают установки по получению CO_2 с утяжеленным изотопным составом кислорода в ней [9].

Аналогично происходит удаление углекислоты при метасоматической декарбонатизации доломита с образованием силикатных минералов – форстерита, диопсида, тремолита в процессе образования нефрита. При этом и должно происходить формирование аномально легкого изотопного состава кислорода нефрита.

Выводы: для апокарбонатного нефрита Кавоктинского месторождения характерен аномально легкий изотопный состав кислорода $\delta^{18}O$ -15,80 ÷ -21,50 ‰. Контактовые метасоматические породы показали более широкие вариации, в том числе также аномально легкие изотопные отношения -21,50 ÷ +8,90 ‰. Вмещающие породы района месторождения характеризуются более тяжелым изотопным составом кислорода: гранит и гранодиорит -7,51 ÷ -0,71 ‰, амфиболит -8,38 ÷ +9,60 ‰, доломитовый мрамор +20,80 ÷ +24,10 ‰. Гранит – не источник флюида, он не контактирует с нефритовыми телами Кавоктинского месторождения непосредственно, лишь обеспечивает региональный разогрев, активизирующий метеорный флюиды, аномально обедненные изотопом ^{18}O. Предположено, что выделяющаяся при декарбонатизации доломита в

процессе его превращения в кальцит-тремолитовый скарн и нефрит углекислота выносила из флюидной системы изотопно тяжелый кислород. С этим и связан аномально легкий изотопный состав нефритообразующего флюида, а, следовательно, и нефрита.

Авторы признательны за предоставленные материалы АО «Забайкальское горнорудное предприятие», персонально А.П. Суздальницкому, Д.Б. Шаракшиновой и Е.В. Раевской. Анализы выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20003, https://rscf.ru/project/22-27-20003 с использованием оборудования ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН (Улан-Удэ). Тезисы и доклад подготовлены в рамках темы НИР АААА-А21-121011390003-9.

Список литературы

1. Акимова, Е.Ю. Происхождение корундовых пород Беломорского подвижного пояса по данным геохимии изотопов благородных газов / Е.Ю. Акимова, Е.Н. Козлов, К.И. Лохов // Геохимия – 2017 – № 11 – С. 1015–1026.

2. Бурцева, М.В. Нефриты Восточной Сибири: геохимические особенности и проблемы генезиса / М.В. Бурцева, Г.С. Рипп, В.Ф. Посохов, А.Е. Мурзинцева // Геология и геофизика – 2015а – Т. 56, № 3 – С. 516-527.

3. Бурцева, М.В. Источники флюидов, формировавших нефритовые породы южного складчатого обрамления Сибирского кратона / М.В. Бурцева, Г.С. Рипп, В.Ф. Посохов, А.Ю.Зяблицев, А.Е. Мурзинцева // Доклады Академии наук – 2015б – Т. 460, № 3 – С. 324-328.

4. Высоцкий, С.В. Геохимия стабильных изотопов кислорода и водорода корундоносных пород и минералов Северной Карелии как индикатор необычных условий формирования / С.В. Высоцкий, А.В. Игнатьев, В.И. Левицкий, В.П. Нечаев, Т.А. Веливецкая, В.В. Яковенко // Геохимия – 2014 – № 9 – С. 843–853.

5. Гомбоев, Д.М. Кавоктинское месторождение светлоокрашенного нефрита: условия залегания и особенности вещественного состава / Д.М. Гомбоев, П.В. Андросов, Е.В. Кислов // Разведка и охрана недр – 2017 – № 9 – С. 44-50.

6. Дубинина, Е.О. Изотопнокислородные эффекты при дегидратации глаукофанового сланца: экспериментальные данные при P–T условиях зоны субдукции / Е.О. Дубинина, А.Л. Перчук, О.С. Корепанова // Доклады Академии наук – 2012 – Т. 444, № 5 – С. 534–538.

7. Кислов, Е.В. Отходы переработки аподоломитового нефрита и направление их использования / Е.В. Кислов, Л.И. Худякова, А.Г. Николаев // Горные науки и технологии – 2023 – Т. 8, № 3 – С.195–206. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-75

8. Лохов, К.И. Изотопно и элементно фракционированные He, Ne и Ar во флюидных включениях минералов метаморфических пород Северной Карелии с аномальным изотопно легким кислородом: фракционирование изотопов в эндогенном флюиде по механизму термодиффузии с каскадированием / К.И. Лохов, Э.М. Прасолов, Е.Ю. Акимова, Д.К. Лохов, С.А. Бушмин // Вестник СПбГУ. Сер. 7 – 2016 – № 1 – С. 29-47.

9. Третьякова, С.Г. Разделение изотопов кислорода методом каталитического изотопного обмена в системе вода - углекислый газ / С.Г. Третьякова: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.01. – Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева, М., 2012 – 131 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-5/1555

10. Gao, K. Hydrogen and oxygen stable isotope ratios of dolomite-related nephrite: relevance for its geographic origin and geological significance / K. Gao, T. Fang, T. Lu, Y. Lan, Y. Zhang, Y. Wang, Y. Chang // Gems & Gemology – 2020 – V. 56, No. 2 – P. 266–280. http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.56.2.266

11. Liu, Y. Geochemistry and petrogenesis of placer nephrite from Hetian, Xinjiang, northwest China / Y. Liu, J. Deng, G.H. Shi, X. Sun, L. Yang // Ore Geol. Rev. – 2011 – V. 41, No 01 – P. 122-132. doi:10.1016/j.oregeorev.2011.07.004

12. Sharp, Z.D. A laser-based microanalytical method for the *in-situ* determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides / Z.D. Sharp // Geochimica et Cosmochimica Acta – 1990 – V. 54 – P. 1353-1357.

13. Yui, T.F. Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea / T.F. Yui, S.T. Kwon // Economic Geology – 2002 – V. 97, No. 3 – P. 593–601. http://dx.doi.org/10.2113/97.3.593

14. Wang, R. Progress on the nephrite sources of jade artifacts in ancient China from the perspective of isotopes / R. Wang, X. Shi // Front. Earth Sci. – 2022 – V. 10 – No 1008387. doi:10.3389/feart.2022.1008387

15. Zhang, C. Spatial-temporal distribution, metallogenic mechanisms and genetic types of nephrite jade deposits in China / C. Zhang, F. Yang, X. Yu, J. Liu, E.J.M. Carranza, J. Chi, P. Zhang // Front. Earth Sci. – 2023 – V. 11 – No 1047707. doi 10.3389/feart.2023.1047707

ТРИТИЙ В АТМОСФЕРНЫХ, ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Лебедева Л.С.[1], Шамов В.В. [1,2], Горячев В.В.[3]
[1]*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, lyudmilaslebedeva@gmail.com, napavlova@mpi.ysn.ru*
[2]*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, vlshamov@yandex.ru*
[3]*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, goryachev@poi.dvo.ru*

Аннотация. В статье представлен массив данных по активности трития в природных водах Восточной Сибири, а также оценки "старой" (до 1953 г.) и "новой" воды в подземных водах Центральной Якутии. Массив включает результаты определений активности трития в 196 пробах воды, отобранных с 2019 по 2023 г., и опубликованные в литературе данные (более 800 значений). Выявлено отсутствие "старой" воды в надмерзлотных таликовых водоносных горизонтах, различные ее доли в межмерзлотных горизонтах и полное доминирование «старой» воды в подмерзлотных водах. Полученные расчетные оценки долей «старой» и «новой» воды согласуются друг с другом и с общим представлением о функционировании сложной гидрогеологической системы Центральной Якутии.
***Ключевые слова**: тритий, подземные воды криолитозоны, трассер, датирование подземных вод*

Abstract. The article presents a dataset on the tritium activity in the natural waters of Eastern Siberia, as well as estimates of "old" (pre-1953) and "new" water in the groundwaters of Central Yakutia. The dataset includes results from the determination of tritium activity in 196 water samples collected from 2019 to 2023, and published literature data (over 800 values). It revealed the absence of "old" water in the suprapermafrost talik aquifers, varying proportions of it in intrapermafrost aquifers, and the complete dominance of "old" water in subpermafrost waters. The obtained estimates of the proportions of "old" and "new" water are consistent with each other and with the general understanding of the functioning of the complex hydrogeological system of Central Yakutia.
***Key words**: tritium, permafrost groundwater, tracer, groundwater dating*

Введение. Тритий, радиоактивный изотоп водорода с массой 3 а. е. м. и периодом полураспада 12,32 года, входит в молекулу сверхтяжелой воды и может играть роль трассера, по содержанию которого оценивается происхождение и время нахождения воды в водном объекте. В криолитозоне, где взаимодействие поверхностных и подземных вод затруднено из-за присутствия криогенного водоупора, оценка времени нахождения воды в подземных горизонтах может позволить сделать важные выводы о распространении и динамике многолетнемерзлых пород и таликов в условиях изменения климата.

С 1945 по 1963 г. было произведено около 450 ядерных взрывов, вследствие которых концентрации трития в атмосфере резко увеличились на несколько порядков. После подписания Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в 1963 г. концентрации трития начали постепенно снижаться и в XXI веке приблизились к естественным уровням. Именно искусственное введение огромного количества трития позволяет использовать его в качестве трассера поверхностных и подземных вод.

Цель работы – исследование многолетней динамики содержания трития в атмосферных осадках, поверхностных и подземных водах Восточной Сибири на основе литературных и полученных в 2019–2023 гг. новых данных, а также предварительная оценка доли «старой» воды, которая попала в водоносный горизонт в доядерную эпоху и «новой» воды, которая выпала на земную поверхность после этого, в подземных водах региона.

Методы. С 2019 г. мы отобрали 196 проб атмосферных, поверхностных и подземных вод в бассейне р. Лена. Подземные воды отбирались в марте, июне или августе. Поверхностные воды р. Лена у с. Табага отбирались регулярно раз в месяц. Снежный покров опробовался в конце зимнего периода, как правило, в марте. Дожди отбирались по мере выпадения, если набирался необходимы объем для пробы. Обработка проб производилась в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева

ДВО РАН. Для измерения трития использовался низкофоновый жидкосцинтилляционный счетчик QUANTULUS 1220. Имеющаяся в лаборатории система двухступенчатого электролитического обогащения позволяет понизить минимальный порог измерения концентрации трития до 0,08 ТЕ.

Был составлен массив данных, характеризующий активность трития в природных водах Восточной Сибири с 1969 по 2023 г. по литературным источникам и собственным материалам (рис.1). Массив включает данные по бассейнам рек Лена (705 значений), Индигирка (83 значения), Оленек (75 значений) и Яна (70 значений). В массив вошли 613 концентраций трития в атмосферных осадках, 82 – в подземных водах, 282 – в речных водах, 22 – в снежном покрове и 6 – в наледях.

Согласно С. Ясечко [1] каждая проба подземных вод рассматривается как смесь разновозрастной воды. Она характеризуется не абсолютным возрастом, а некоторым его распределением. Для каждой пробы можно рассчитывать доли воды моложе и старше определенного порога. При использовании трития пороговым значением является 1953 г. Вода, которая попала в водоносный горизонт до 1953 г., относится к «старой» воде, после 1953 г. – к «новой» воде.

Массовая доля «новой» воды F_{new} в пробе определяется по формуле:

$$F_{new} = \frac{{}^{3}H_{sample} - {}^{3}H_{old}}{{}^{3}H_{new} - {}^{3}H_{old}}$$

где $^{3}H_{sample}$ – активность ^{3}H в пробе подземных вод, $^{3}H_{old}$ – активность трития в осадках, выпавших до 1953 года, с поправкой на распад, а $^{3}H_{new}$ – активность ^{3}H осадков, выпавших после 1953 года, с поправкой на распад. Как правило, $^{3}H_{old}$ близко к 0 ТЕ. Фоновая (т.е. до 1953 г.) активность трития в осадках в момент их выпадения была менее ~15 ТЕ, поэтому сейчас содержание трития в воде, которая выпала до 1953 г. ($^{3}H_{old}$) составляет не более ~0,5 ТЕ и, скорее всего, <0.1 ТЕ, так как с 1953 г. прошло более пяти периодов полураспада трития. Поэтому F_{new} аппроксимируют следующим образом:

$$F_{new} \approx \frac{{}^{3}H_{sample}}{{}^{3}H_{new}}$$

$^{3}H_{sample}$ определяется в лаборатории для каждой исследуемой пробы. $^{3}H_{new}$ рассчитывается с использованием исторических данных по содержанию трития в атмосферных осадках:

$${}^{3}H_{new} = ({}^{3}H_{precipitation(t)} \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t_{sample}-t}{12.3\ years}})_{t}$$

где $^{3}H_{precipitation(t)}$ – активность трития в осадках в момент их выпадения t, t_{sample} – календарный год, когда проба подземных вод была проанализирована на содержание трития, t – любой возможный календарный год между 1953 и годом анализа пробы (т. е. $1953 < t < t_{sample}$). Значения $^{3}H_{precipitation(t)}$ значительно варьировались с 1953 года.

Для расчета $^{3}H_{new}$ мы использовали данные МАГАТЭ об активности трития в осадках г. Якутска [2] и данные, опубликованные в ежегодниках «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств» [3]. Средневзвешенные данные за каждый год доступны с 1969 по 1983 гг., с 1996 по 2000 гг. и с 2013 по 2022. Данные с 1953 по 1968, с 1984 по 1995 и с 2001 по 2012 гг. были восстановлены с помощью экспоненциальной функции, которой подчиняется уменьшение концентрации трития в осадках г. Якутска.

Результаты. На рис. 1 видно, что активность трития в атмосферных осадках, снежном покрове и речных водах Восточной Сибири закономерно снижается от значений, превышающих 500 ТЕ в начале 1970-х гг., до 10-40 ТЕ в 2010-х. Относительно высокие концентрации трития (до 70 ТЕ) в снежном покрове Центральной Якутии в 2013 г. могут быть связаны с радиационной аварией на АЭС «Фукусима-1» в Японии в 2011 г. [4]. Отдельные выбросы до 900 ТЕ в речных водах в 2010 г. относятся к

малым рекам в зоне влияния подземных ядерных взрывов в бассейне р. Вилюй. Так как подземные воды имеют намного более длительное время водообмена, чем поверхностные, концентрации трития варьируют в широких пределах от нулевых значений в водоносных горизонтах, куда не попадали атмосферные воды, загрязненные антропогенным тритием, до значений, близких к современным атмосферным осадкам.

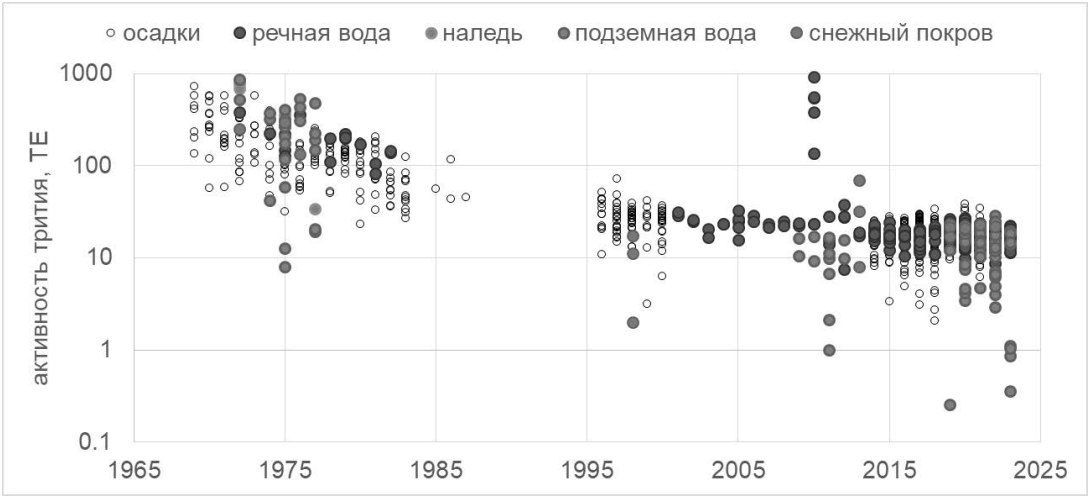


Рис. 1. – Активность трития в природных водах бассейна р. Лена с 1969 по 2023 г., ТЕ по литературным источникам (1969-2018) и собственным данным (2019-2023)

Активность трития в осадках и в речных водах имеет сезонный ход с максимальными значениями в летние месяцы и минимальными в холодный период года (рис. 2). Усиленный обмен между стратосферой и тропосферой в весенне-летнее время приводит к формированию весенне-летнего максимума и осенне-зимнего минимума в сезонном распределении содержания трития в атмосферных осадках [5]. Сезонные колебания концентрации трития в речных водах более сглаженные и имеют меньшую амплитуду, чем в атмосферных осадках. Минимальные концентрации трития в воде рек Восточной Сибири фиксируются в зимнюю межень и объясняются существенным увеличением доли подземного питания в этот период. Во время прохождения половодья, когда проходят максимальные уровни воды, активность трития в речных водах увеличивается. Максимальные активности трития наблюдаются в период летних паводков, когда велика доля дождевых осадков в питании реки.

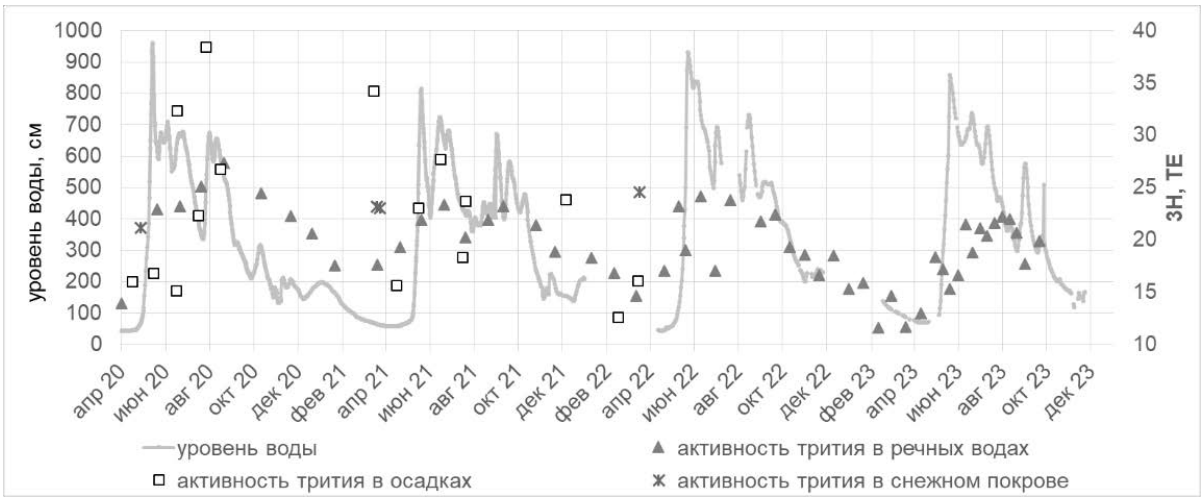


Рис. 2. – Активность трития в осадках, снежном покрове около г. Якутск, в водах р. Лена у с. Табага и уровень воды с 2020 по 2023 г.

Оценка доли «старой» и «новой» выполнялась для подземных вод надмерзлотно-межмерзлотных водоносных горизонтов, широко распространенных в песчаных отложениях IV (бестяхской) надпойменной террасы р. Лены в Центральной Якутии, а также для надмерзлотных таликов на водосборе р. Шестаковки, левого малого притока р. Лены.

На рассматриваемой территории мощность многолетнемерзлых пород достигает 200–400 м. В ее гидрогеологическом строении выделяют два этажа. К нижнему этажу относятся подмерзлотные водоносные горизонты, содержащие слабосолоноватые (минерализация 1.2–3.2 г/дм^3) воды хлоридно-гидрокарбонатного или гидрокарбонатного натриевого состава. С учетом больших гидростатических напоров (отдельные скважины при вскрытии подмерзлотных водоносных горизонтов фонтанировали), не исключается разгрузка подземных вод нижнего этажа на участках сквозных субаквальных таликов под руслом р. Лены и крупными озерами. К верхнему этажу в пределах бестяхской террасы относят надмерзлотно-межмерзлотный водоносный комплекс со значительными ресурсами пресных подземных вод. При широкой площади его распространения подземные водные потоки в нем локализованы. Наибольшее развитие этот комплекс получил в южной части IV (бестяхской) надпойменной террасы. В настоящее время его инфильтрационное питание происходит через надмерзлотные субаквальные талики, которые распространены под озерами и мелкими реками, и через субаэральные талики, приуроченным к выположенным участкам, покрытым сосновым редколесьем. На участках транзита и разгрузки надмерзлотные воды переходят в категорию межмерзлотных. Верхним водоупором комплекса здесь служит промороженная часть песчаных четвертичных образований мощностью 10–50 м. Межмерзлотные воды циркулируют как в песчано-галечниковых отложениях, так и в самой верхней трещиноватой части кембрийских карбонатных пород. Естественные ресурсы водоносного комплекса, оцененные по родниковой составляющей, превышают 43000 м^3/сут [6]. Источники межмерзлотных вод действуют круглогодично. Крупнейшие из них – это родники Улахан-Тарын, Булуус, Ерюю, Суллар, а также озеро-источник Юнюгестях. Разгрузка подземных вод зимой фиксируется наледями или полыньями. Одна из особенностей источников в области криолитозоны – смешение в очагах разгрузки подземных вод различных типов.

В таблице 1 показаны измеренные значения активности трития и рассчитанные доли «старой» и «новой» воды в каждом объекте исследования. Для точек, где были отобраны несколько проб, показаны медианные значения. В правой часть таблицы добавлены оценки долей «старой» и «новой» воды по концентрациям трития в нескольких источниках за 2009-2012 гг., опубликованным в статье Т. Хияма и соавт. [7].

Как и ожидалось, подмерзлотные воды практически не содержат трития, что говорит об отсутствии «новой» воды в них. В озере-источнике Юнюгестях зимой наиболее высокая доля «старой» воды (72%) среди всех отобранных надмерзлотно-межмерзлотных вод. Это может объясняться наличием гидравлической связи между озером и глубокими подмерзлотными водами, либо вода преодолевает протяженный путь фильтрации, прежде чем произойдет ее разгрузка в озеро. Полынья в озере и круглогодичный сток из него в виде незамерзающего ручья, при очень небольшой площади поверхностного водосбора (3.3 км^2), подтверждают существования гарантированного источника питания озера [8]. В источнике межмерзлотных вод Улахан-Тарын (цирк В) доля «старой» воды составляет 67%. Этот источник и оз. Юнюгестях находятся относительно близко друг от друга, геологическое строение территории, где они расположены, в целом, аналогичное. Близкое содержание трития и химический состав воды оз. Юнюгестях и источника Улахан-Тарын свидетельствуют о сходном генезисе вод, разгружающихся здесь на поверхность.

Таблица 1. Медианное значение активности трития и оценок доли «старой» и «новой» воды в опробованных подземных водах

Место отбора	2019-2023, данные авторов				2009-2012, данные по [7]			
	Количество проб	^{3}H (ТЕ)	F_{new} (%) **	F_{old} (%) ***	Количество проб	^{3}H (ТЕ)	F_{new} (%)	F_{old} (%)
область транзита ист. Ерюю*	3	14.7	100	0				
область разгрузки ист. Улахан-Тарын*	1	14.0	100	0				
надмерзлотный талик у оз. Малая Чабыда	4	14.3	100	0				
надмерзлотный талик около р. Левая Шестаковка	2	16.4	100	0				
область питания ист. Булуус*	2	10.7	82	18				
ист. Булуус	5	7.8	55	45	4	9.75	47	53
ист. Ерюю	1	7.1	56	44	1	11.1	56	44
ист. Суллар	3	7.4	52	48				
ист. Улахан-Тарын, цирк В	1	4.6	33	67	1	6.7	34	66
оз.-ист. Юнюгестях	4	3.7	28	72				
подмерзлотные воды	1	0.3	0	100				

Примечания.* пробы отбирались из скважин, ** F_{new} – массовая доля «новой» воды, *** F_{old} – массовая доля «старой» воды

В источниках Суллар, Ерюю и Булуус доли «старой» и «новой» воды близки к 45% (44-48%). В надмерзлотных водах из скважины, пробуренной в зоне питания источника Булуус, доля «старой» воды была оценена в 18%. Это согласуется с общим представлением о более молодой воде в зоне питания и более старой воде в зоне разгрузки водоносного горизонта.

Оценки долей «старой» и «новой» воды, полученные по пробам, отобранным в 2009-2012 гг. и в 2019-2023 гг., близки между собой, что говорит о постоянстве гидрогеологической системы источников Булуус, Ерюю и Улахан-Тарын.

В небольших надмерзлотных водоносных горизонтах, приуроченном к субаэральным таликам в бассейне р. Шестаковка (у оз. Малая Чабыда и около р. Левая Шестаковка), «старая» вода отсутствует. Это согласуется с небольшой мощностью таликов до 6-20 м, и преимущественным питанием таликовых вод за счет атмосферных осадков.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 *«Субаэральные и подозёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата»*.

Список литературы

1. Jasechko S. Global isotope hydrogeology—review // Reviews of Geophysics. – 2019. – №57. – P. 835–965.

2. IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nucleus.iaea.org/wiser. Дата обращения: 20.03.2023.

3. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013-2022 годах. Ежегодники. – Обнинск, 2014-2023.

4. Makarov V.N. Tritium in the Snow Cover at Mid-Taiga Landscapes in Central Yakutia // Geochemistry International. – 2016. – Vol. 54, № 11. – P. 1005–1010.

5. Поляков В.А., Ферронский В.И. Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.

6. Павлова Н. А., Шепелев В. В., Галанин А. А., Ефремов В. С. Гидрохимия подземных вод надмерзлотно-межмерзлотного стока на участках их разгрузки (Центральная Якутия) [Текст] // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47. – № 4. – С. 391-401.

7. Hiyama T., Asai K., Kolesnikov A.B., Gagarin L.A. Estimation of the residence time of permafrost groundwater in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia // Environmental Research Letters. – 2013. Режим доступа: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/035040/pdf.

8. Pavlova N., Lebedeva L., Efremov V. Lake water and talik groundwater interaction in continuous permafrost, Central Yakutia // E3S Web of Conferences. – 2019. – №98. – 07024.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА, КИСЛОРОДА И УГЛЕРОДА ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ВОД В СРЕДАХ, БОГАТЫХ ОРГАНИЧЕСКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Домрочева Е.В.
[1]Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Приведены данные по изотопному составу кислорода, водорода и водорастворенного углерода для природных вод юго-востока Западной Сибири, обогащенных органическими веществами. Определены характерные тренды изменения изотопного состава вод и растворенной углекислоты для различных водных объектов. Показано, что поверхностные и подземные воды активного и замедленного водообменов по изотопному составу (δD и $\delta^{18}O$) являются инфильтрационными. Несмотря на широкий диапазон значений $\delta^{13}C$ в регионе, по-видимому, присутствуют только два источника углекислоты: биогенный и атмосферный, при этом для подземных вод превалирующим является биогенный.

Ключевые слова: *изотопы воды и водорастворенного углерода, воды, обогащенные органическим веществом, юго-восток Западной Сибири, торф, уголь, нефть*

Abstract. Data on the isotopic composition of oxygen, hydrogen and water-dissolved carbon for natural waters of the south-east of Western Siberia, enriched with organic substances, are presented. Characteristic trends in changes in the isotopic composition of water and dissolved carbon dioxide for various water bodies have been determined. It has been shown that surface and underground waters with active and slow water exchange in terms of isotopic composition (δD and $\delta^{18}O$) are infiltration. Despite the wide range of $\delta^{13}C$ values in the region, there appear to be only two sources of carbon dioxide: biogenic and atmospheric, with biogenic being predominant for groundwater.

Key words*: isotopes of water and water-dissolved carbon, waters enriched with organic matter, south-east of Western Siberia, peat, coal, oil*

Введение

Изотопы указывают как на генезис воды и растворенных веществ, так и на преобладающие процессы, происходящие в водах. Комплексное использование гидрохимических и изотопных исследований имеет большой потенциал для получения информации, необходимой для более эффективной оценки ресурсов подземных вод и осуществления прогнозирования состава и качества подземных вод. Однако на

практике часто можно столкнуться с узкими пределами использования изотопов, поскольку при описании объекта накладываются сразу несколько геохимических процессов, которые и затрудняют достоверную интерпретацию данных. Авторы не ставят перед собой задачу решить полностью эту проблему, которая лежит не в их компетенции. Предлагается на основе накопленного фактического материала выделить основные критерии, на которые необходимо обратить внимание при исследовании вод, обогащенных органическими веществами, а именно: угольных, болотных, озерных и нефтяных вод. Поскольку, во-первых, накоплена геохимическая информация по этим водам. Во-вторых, для данных вод наиболее показательны будут данные по водорастворенному углероду, определяющему формирование состава вод, обогащенных растворенным органическим веществом (РОВ).

Объект и методы исследований

Коллективом накоплены данные по изотопному составу разнообразных по условиям формирования водных объектов юго-востока Западной Сибири [1–3], обработка которых должным образом не была проведена или осталась нерешенной часть вопросов. Объединяет эти объекты то, что формируются они в средах, богатых органическими веществами. Это широко распространенные болотные воды (самое крупное в мире Васюганское болото) и связанные с ними почвенные, озерные, речные и подземные воды активного водообмена, воды угольных отложений (один из крупнейших угольных бассейнов мира – Кузнецкий), воды нефтяных отложений (крупнейшие месторождения нефти и газа).

Полевые исследования проходили в течение трех лет, в летне-осенний период 2020–2022 гг. Объектами изучения были: 1) поверхностные воды: 9 речных, 11 озерных, 2 пробы почвенных вод и 3 пробы воды просадок (начальная стадия образования термокарстовых озер) и 2) подземные воды: 19 проб из скважин на хозяйственно-питьевое водоснабжение (в основном атлым-новомихайловский водоносный горизонт), 10 проб из скважин, добывающим угольный метан, и 3 пробы из нефтедобывающих скважин (апт-альб-сеноманский водоносный комплекс). Для сравнения также были привлечены данные по водам, отобранным на других месторождениях. Всего изучен изотопный состав 59 проб воды. Аналитические исследования проводились стандартными методами в ПНИЛ гидрогеохимии ТПУ и в ТФ ИНГГ СО РАН. Исследования изотопного состава кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты (DIC – dissolved inorganic carbon) проводилось в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II и FlashEA 1112.

Результаты химико-изотопных исследований вод

Речные воды. Рассматривались реки северных территории Сибири (Обь, Таз, Пур, Надым) и их притоки, богатые РОВ. Характеризуются самыми высокими значениями минерализации для поверхностных вод (от 9 до 140 мг/л), более высоким показателем pH, но с большими разбросами значений (от 4,1 до 7,8): ручьи и маленькие реки более кислые (4,1–6,0), большие водотоки более щелочные (6,0–7,8). Концентрации РОВ самые низкие: показатели Сорг от 3,2 до 26,3 мг/л. Среди анионов преобладает гидрокарбонат-ион, среди катионов – кальций, иногда натрий и магний. Интервалы значений δD и $\delta^{18}O$ речных вод: от -114,9 до -100,0‰ от -15,4 до -12,3‰ соответственно. Значения изотопного состава гидрокарбонат-иона достаточно тяжелые, $\delta^{13}C$ в интервале от -17,2 до -3,9‰ (табл. 1).

Таблица 1. Изотопный состав природных вод, обогащенных РОВ, юго-востока Западной Сибири и водорастворенных веществ по данным авторов 2020–2022 гг, ‰

Водные объекты	N	δ^2H	$\delta^{18}O$	КС	d_{exc}	$\delta^{13}C_{DIC}$
Речные	9	–126,8…–100,0 –111,7	–16,9…–12,3 –15,1	–1,1…1,4 0,1	–1,3…18,7 9,2	–17,2…–3,9 –10,4
Почвенные	2	–110,2…–106,2 –108,2	–15,3…–15,0 –15,1	–0,5…–0,3 0,4	12,6…14,1 13,8	–23,5…–17,9 –20,7
Воды просадок	3	–101,3…–89,6 –94,5	–14,0…–11,6 –12,6	–0,1…0,9 0,5	2,9…10,9 6,3	–23,0…–19,5 –21,7
Озерные	11	–101,6…–69,3 –87,2	–14,1…–7,3 –10,2	–0,2…2,8 1,9	– 12,1…11,3 –5,2	–25,9…–6,0 –14,8
Пресные подземные воды	19	–135,2…–103,1 –126,9	-19,6…-12,3 -17,4	-1,4…1,8 -0,3	-7,1…14,1 17,1	-30,4…-4,1 -13,1
Подземные воды угольных отложений	10	-149,6…-125,6 -138,4	-16,3…-12,2 -13,8	2,2…7,4 4,8	-20…-17,0 -18,6	24,0…29,9 27,4
Поземные воды нефтяных месторождений	5	-64,2…60,3 -62,3	-8,5…-6,5 -7,8	0,5…2,3 1,2	-9,3…8,8 -9,0	0,3…23,6 13,3

Примечание. В числителе – мин. и макс. значения, в знаменателе – среднее, КС – кислородный сдвиг, d_{exc} – дейтериевый эксцесс.

Почвенные воды и воды просадок. Характеризуются самыми низкими значениями минерализации (от 2 до 35) среди поверхностных вод, кислой средой (3,9–5,9), самыми высокими концентрациями РОВ: Сорг от 12,2 до 95,2 мг/л. В анионном составе преобладает сульфат-ион, в катионном – ион аммония. Изотопный состав почвенных вод достаточно легкий δD от -110,2 до -106,2‰, $\delta^{18}O$ от -15,3 до -12,0‰. Для вод просадок данные уже потяжелее: δD от -101,3 до -89,6‰, $\delta^{18}O$ от -14,0 до -11,6‰. Интервал значений $\delta^{13}C$(DIC) облегченный относительно речных и озерных вод: от -23,5 до -16,1‰.

Озерные воды. Рассматривались озера северных территории Сибири? J,jufotyyst HJD. Характеризуются промежуточными между водами просадок и речными водами значениями минерализации (от 2 до 33), pH (4,1–6,4), Сорг от 6,2 до 44,2 мг/л. Анионы и катионы имеют сложный смешанный состав. Изотопный состав озерных вод отличается утяжеленными значениями: δD от –101,6 до –69,3 ‰ и $\delta^{18}O$ от –14,0 до –7,3 ‰, и большим разбросом значений $\delta^{13}C$ от -23,4 до -6,0‰.

Пресные подземные воды зоны активного водообмена. Рассматривались в основном воды, используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения, в большинстве случаев атлым-новомихайловского водоносного горизонта с глубин 10–180 м. Пресные с минерализацией от 29 до 357 мг/л, pH от 5,5 до 7,9. По химическому составу воды в основном гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией. Концентрации органических веществ значительно ниже, чем в поверхностных водах: Сорг – 0,6–12,7 мг/л. Воды обеднены тяжелыми изотопами: δD от -135,2 до -117,2 ‰, $\delta^{18}O$ от -19,6 до -15,9 ‰. Интервал значений $\delta^{13}C_{DIC}$ широкий: от -30,4 до -4,1 ‰.

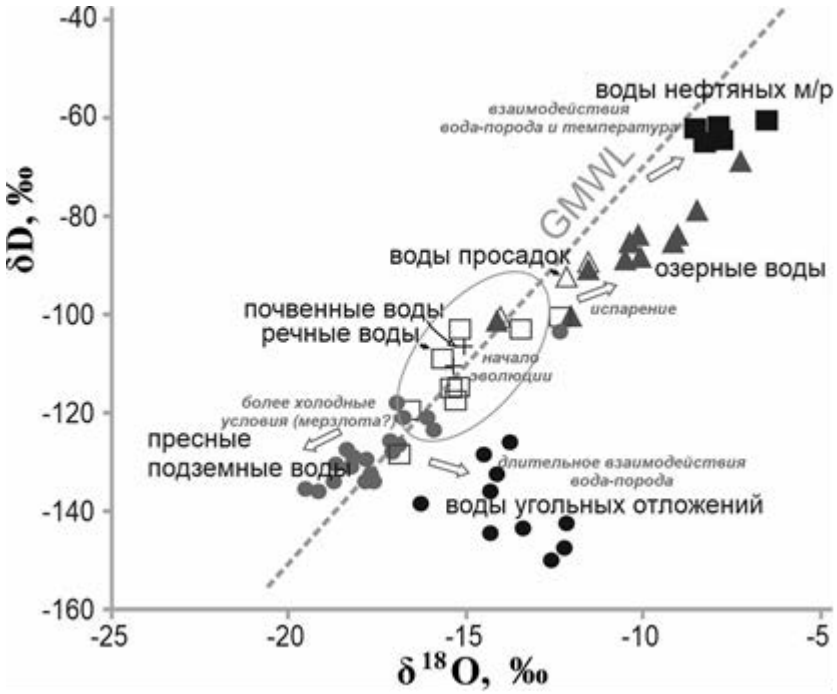
Подземные воды угольных отложений замедленного водообмена. Рассматривались в основном воды пермских терригенно-угленосных отложений Нарыкско-Осташкинской площади Кузнецкого угольного бассейна, циркулирующих на глубинах 400–1200 м. В целом, воды имеют минерализацию в диапазоне 7,8–25,1 и выше

г/л, значения pH преимущественно от 7,5 до 8,5, содовый состав с высокими концентрациями органических веществ, особенно фульвокислот (ФК до 120 мг/л). Воды выделяется утяжеленным изотопным составом кислорода (от –16,3 до –12,2‰) и аномально тяжелым положительным изотопным составом углерода $\delta^{13}C_{DIC}$ от 24,0 до 39,9 ‰.

Подземные воды весьма замедленного водообмена нефтяных месторождений. Воды в основном нейтральные (pH 6,9–7,4) с величиной общей минерализации 18,3–20,2 г/л, по химическому составу достаточно однотипные – хлоридные натриевые. Изотопный состав воды значительно утяжелен: значения δD составляют от –64,2 до –60,3 ‰ при $\delta^{18}O$ от –8,5 до –6,5 ‰. Гидрокарбонат-ион имеет положительные значения $\delta^{13}C$ от 0,3 до 23,6 ‰, по данных других авторов [4] – $\delta^{13}C_{DIC}$ от –51,8 до 21,8 ‰.

Обсуждение результатов исследований

Для сравнения с глобальной линией метеорных вод (GMWL) были нанесены фигуративные точки по изотопному составу вод разных водных объектов на диаграмму δD–$\delta^{18}O$ (рис. 1). На линию хорошо ложатся группы точек, отвечающие изотопному составу речных и почвенных вод, это можно назвать начальным этапом изменения изотопного состава. Далее эволюционное развитие идет двумя путями: 1) на поверхности формируются сначала просадки, затем озера; 2) воды фильтруются через почвы и породы в подземные воды.



.
Рис. 1. Распределение изотопов H и O в поверхностных и подземных водах региона, обогащенных РОВ. *Стрелками показаны направления эволюции состава и подписаны возможные причины его изменения*

Озёрные воды формируются в застойном режиме, вода успевает нагреться по сравнению с речными и почвенными водами, начинают проявляться эффекты эвапотранспирации, которые выражаются как в утяжелении значений δD и $\delta^{18}O$, так и в отклонении фигуративных точек вправо от GMWL.

Подземные воды зоны активного водообмена, наоборот, обеднены тяжелыми изотопами воды, что может быть следствием более холодных условий питания вод. Можно предположить, что в формировании подземных вод верхнего гидрогеологического этажа участвовали воды, образовавшиеся при оттаивании мерзлых пород, широко развитые на данных глубинах.

Несмотря на значительное отклонение от GMWL, подземные воды угленосных отложений являются инфильтрационными. Так называемый «кислородный сдвиг» (КС до 7,4) объясняется, в отсутствие высоких температур (~20°C), достаточно длительным взаимодействием подземных вод с вмещающими алюмосиликатными горными

породами, у которых $\delta^{18}O$ на 20–30‰ тяжелее, чем в водах. При относительно длительном времени взаимодействия вода–порода, происходит изотопный обмен «легкого» кислорода вод с «тяжелым» кислородом пород.

В пластовых водах нефтяных отложений севера Западной Сибири наблюдается значительное утяжеление изотопного состава воды. Можно предположить, что, по мере просачивания вод из зоны активного водообмена в зону замедленного и весьма замедленного водообменов, изотопный состав воды значительно утяжеляется, особенно по кислороду (КС от 0,5 до 2,3 ‰). Данный эффект довольно ожидаем для вод глубоких водоносных горизонтов и объясняется наличием более высоких температур на глубине и достаточно длительным взаимодействием подземных вод с вмещающими алюмосиликатными горными породами. Вопрос о возможности смешения инфильтрационных вод с седиментационными требует дополнительных исследований и на данном этапе не рассматривался.

Составлена схема эволюции состава водорастворенного углерода в регионе, значения которого варьируют в очень широком диапазоне: от резко отрицательных до крайне положительных (рис. 2).

Совместно с привлечением данных по геологии и гидрогеологии региона, можно сделать вывод о присутствии двух источников углекислоты: биогенного и атмосферного. В водах почв и просадок принимает участие только биогенный CO_2, а в речных и озерных водах, с увеличением размера озер и интенсивности потока движения, начинает принимать активное участие атмосферная утяжеленная углекислота. В подземной гидросфере атмосферная углекислота перестает принимать участие в формировании состава вод. Согласно геологическим условиям, не участвует углерод, образующийся при разложении карбонатных пород (по крайней мере, в больших масштабах), и любой глубинный (магматический, метаморфический). Остается только биогенная углекислота, изменения изотопного состава которой связаны с различными процессами.

Пресные подземные воды верхнего этажа наследуют изотопный состав гидрокарбонат-иона поверхностных вод смешанного генезиса. Сохранение достаточно высоких значений $\delta^{13}C_{DIC}$ при отсутствии атмосферной углекислоты, возможно, связано с криогенной метаморфизацией вод.

Воды угольных отложений имеют аномально положительные значения $\delta^{13}C_{DIC}$, что объясняется длительным взаимодействием системы «вода–уголь–метан», которое привело к масштабному фракционированию изотопов углерода: метан забрал «легкий» углерод, а углекислый газ – «тяжёлый», затем последний унаследовал гидрокарбонат ион. Широкий разброс значений $\delta^{13}C$ в водах нефтяных месторождений объясняется микробиологической деструкцией органического вещества, протекающей по двум схемам: 1) низкие значения $\delta^{13}C$ (<–10 ‰) являются результатом разложения анионов органических кислот сульфатредуцирующими бактериями; 2) высокие значения $\delta^{13}C$ являются результатом деградации анионов метаногенными бактериями (как в случае и с угольными отложениями, описанными выше).

Заключение

Это первый этап в комплексном изучении эволюции изотопного состава вод, обогащенных РОВ, которое мы собираемся продолжать с привлечением бóльшего фактического материала и углублением в расшифровках. Но уже сейчас определены некоторые реперные характеристики, на которые можно ориентироваться при интерпретации формирования состава вод. При рассмотрении генезиса и условий формирования данных вод необходима комплексная изотопно-гидрогеохимическая оценка, которая предоставит наиболее достоверные результаты.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 24-27-00372.

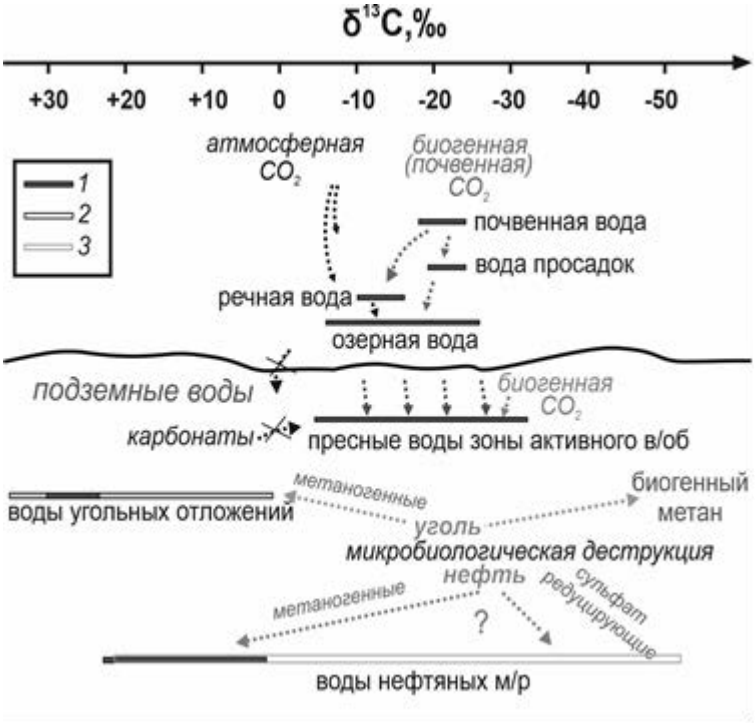


Рис. 2. Схема распределения значений $\delta^{13}C_{DIC}$ в поверхностных и подземных водах региона, обогащенных РОВ. *1 – данные авторов за 2020–2022 гг; 2 – данные авторов по ранним исследованиям; 3 – литературные данные [4]*

Список литературы

1. Lepokurova O.E. Sodium-bicarbonate groundwaters in southeastern West Siberia, Russia: Compositions, types, and formation conditions // Applied Geochemistry. 2020. Vol. 116. 104579.

2. Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Пыряев А.Н. Использование стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода при интерпретации условий формирования поверхностных водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 6. С. 7–19.

3. Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Пыряев А.Н., Исмагулов О.А. Распределение стабильных изотопов H, O и C в природных водах района Тазовского нефтегазоконденсатного месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округ) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 2. С. 157–169.

4. Новиков Д.А., Пыряев А.Н. Стабильные изотопы O, H, C в подземных водах нефтегазоносных отложений северных районов Западно-Сибирского осадочного бассейна // Геология и минеральные ресурсы Сибири. 2023. Т. 2 (54). С. 23–30.

РАДИОУГЛЕРОДНОЕ ДАТИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОБЬ-ЗАЙСАНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

Пыряев А.Н.[1,2], Новиков Д.А.[2,3], Петрожицкий А.В.[2,4], Кулешов Д.В.[2,5]
[1]Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, pyrayev@igm.nsc.ru
[2]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск
[3]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
[4]Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
[5]Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск

Аннотация. В настоящей статье представлены данные комплексного изотопного анализа природных вод Обь-Зайсанской складчатой области: состав стабильных изотопов H, O, C, а также содержание радиоизотопа углерода ^{14}C. Проведенное исследование позволило получить ответ на вопрос о существенном различии в составе стабильных изотопов подземных вод Новосибирской области, где влияние высотного градиента - минимально, а влияние широтного эффекта в пределах изученной области – очень невелико.

Ключевые слова: *подземные воды, стабильные изотопы H, O, C, радиоуглерод ^{14}C, датирование вод*

Abstract. In this paper data of complex isotope analysis of natural waters of Ob-Zaisan folded region (stable isotope analysis of H, O, C and radiocarbon ^{14}C concentration) are presented. The study made it possible to decide problem of significant differences in the composition of stable isotopes of groundwater in the Novosibirsk region, where the influence of the altitudinal gradient is minimal, and the influence of the latitudinal effect within the studied area is very small.

Key words: *ground waters, stable isotopes H, O, C, radiocarbon ^{14}C, dating of waters*

Радиоуглеродное датирование растворенного в водах углерода (РВУ) применяют для решения различных гидрогеологических и палеогидрогеологических задач: скоростей фильтрации отдельных водоносных горизонтов и их баланса; установление периодов оледенения, смены климата, привноса разных типов вод [1, 2]. Метод, разработанный коллективом Либби (Libbi) [3] исходно рассматривался исключительно применимым для органических археологических и геологических образцов. Позже, в 1957-1968 гг. Мюнних (Münnich) на базе концепции Фрэнка (1951 г) разработал концепцию датировки древних грунтовых вод, основные принципы которой детально изложены в [1, 2] и, коротко, сводятся к вымыванию современным ВРУ с pMC = 100 (per cent modern carbon – процентным содержанием современного углерода) карбонатов в породах водоносного горизонта с pMC, близким к 0. Соответственно, получаемые таким образом датировки – специфические величины для каждого водоносного горизонта, несущие свой индивидуальный набор неточностей, обусловленный вторичными гидрогеохимическими и физическими изменениями.

Для оценки возраста РВУ вод, дренирующихся через водоносные горизонты в гидрогеологических системах применяют различные модели массопереноса и выбор конкретной модели может оказать существенное влияние на конечный результат. В большинстве случаев оперируют поршневой моделью Мюнниха [4]. Существует несколько важных факторов, оказывающих влияние на активность радиоуглерода в водах и, соответственно, корректность оценки возраста вод. Для преодоления этих затруднений в оценке радиоуглеродного возраста подземных вод был предложен эмпирический подход, основанный на статистике, сводящийся к объединению всех внешних региональных параметров, гидрогеохимических реакций и процессов изотопного фракционирования в параметр содержания ^{14}C в исходной воде, проходящей через водоносный горизонт. При этом для различных геологических обстановок эта поправка

индивидуальна [5] и составляет от -1000 лет для закрытых горизонтов до -5000 лет для открытых карстовых и дюнных систем.

Также при анализе радиоуглеродного возраста DIC следует принимать во внимание процессы, изменяющие относительное содержание радиоуглерода в водах не только за счет радиоактивного распада, но и за счет реакций, протекающих при силикатном выветривании, растворении/переотложении карбонатных пород коллектора, а также изотопный обмен с ними [1, 2]. При использовании ^{14}C-хронометров всегда важно помнить, что такие датировки определяют время удержания некоторого трассера в водоносном горизонте, а не возраст самих вод [2]. Каждая датировка представляет средневзвешенную и интегрированную информацию по смешению, старению вод, а также физическим и химическим процессам, модифицирующим подземные вод между областью питания и водозаборной скважиной (источником).

Настоящая работа является продолжением ранее проведенных исследований природных вод Новосибирской области [6-13], объединивших комплексный анализ химического и изотопного состава вод и РВУ. Очевидно, что датирование РВУ для выраженных поверхностных вод (реки, озера, карьерные воды) представляется малоинформативным, поэтому в этой работе мы акцентировали свое внимание на подземных водах (скважин и источников), объединив ранее полученные отдельные радиоуглеродные датировки с новыми данными. Первоочередной задачей было проверить работоспособность метода радиоуглеродного датирования для определения возраста РВУ, содержащегося в подземных водах с невысокой степенью минерализации, а также сопоставить полученные материалы с результатами определений состава стабильных изотопов. Проведенное исследование позволяет получить ответ на вопрос о существенных различиях в составе стабильных изотопов подземных вод Новосибирской области, где отсутствует/минимально влияние высотного градиента [1], а влияние широтного эффекта в пределах изученной области – очень невелико.

Для проведения исследований было отобрано 29 проб вод из различных объектов. Карта точек отбора проб приведена на рисунке (рис 1). Процедура отбора проб для анализа стабильных изотопов проводилась по методике, описанной в [14] с использованием нейлоновых фильтров 0,22 мкм. проб была следующая. Пробы в течение дня транспортировались в лабораторию и помещались в холодильник (при +5°C) до проведения изотопного анализа. Анализ состава стабильных изотопов проводили в максимально сжатые сроки, чтобы нивелировать влияние эффекта хранения. Исследование изотопного состава кислорода, водорода вод, а также РВУ проводилось в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. Подробное описание использованного оборудования, методик и стандартов представлено в [14].

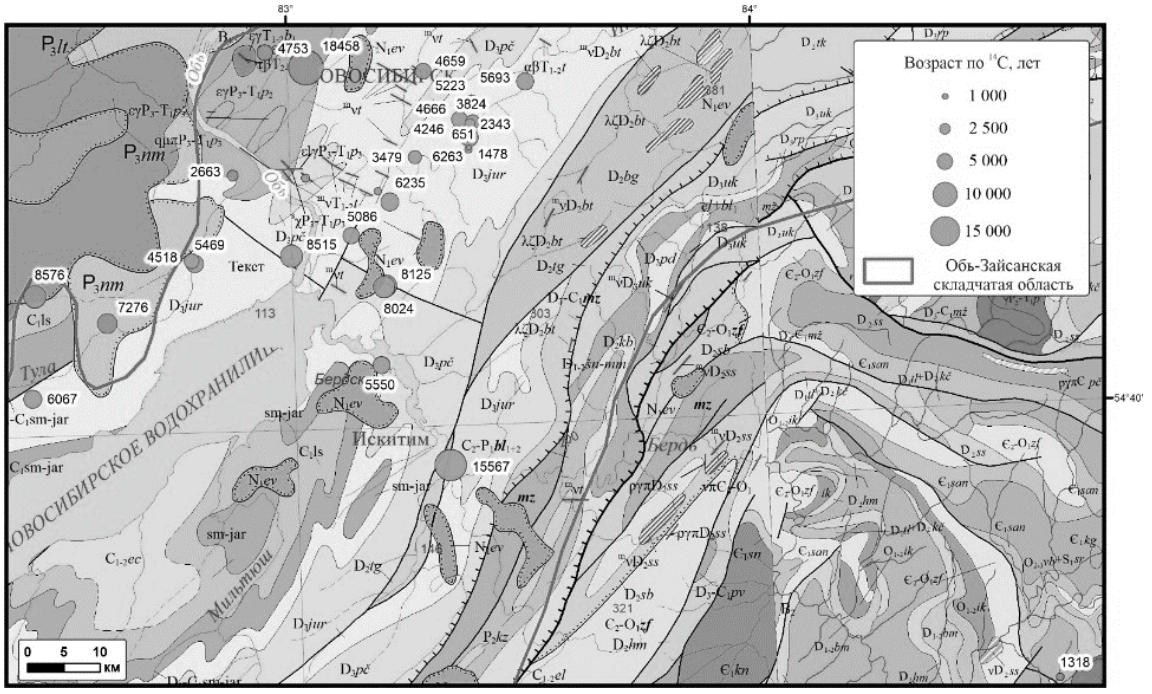


Рис.1. Карта точек отбора проб с указание возрастов РВУ, оцененных расчетным способом с использованием традиционного значения периода полураспада.

Радиоуглеродное датирование проводили методом ускорительной масс-спектрометрии на приборе, сконструированном в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, РФ. Для этого анализа пробы отбирали в отдельную тару, следуя следующей методике. В образец подземной воды, не подвергшийся контакту с атмосферой, объемом 1,5 л добавляли 1 г $CoCl_2$ (ЧДА), и перемешивали до полного растворения соли. Полученный раствор выдерживали не менее суток в герметично закрытой таре до появления осадка (карбонат кобальта). Сформированный осадок декантировали и сушили на воздухе. С помощью абсорбционно-каталитической установки, изготовленной сотрудниками Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН и функционирующей в НГУ [15] производили разложение $CoCO_3$ и последующее восстановление выделяющегося углекислого газа до графита. После завершения процесса графитизации порошок, содержащий 2-3 мг углерода, прессовали в таблетки для проведения УМС-анализа. Процедуре зауглероживания, помимо исследовательских образцов, подвергали также стандартные образцы щавелевой кислоты OxI, сахарозы ANU (National Institute of Standards and Technology, США), а также фонового образца, не содержащего 14C, например, мелкозернистого плотного графита (МПГ), коллагена древнего мамонта, фталевой кислоты, полиэтилена и др. Относительное содержание радиоуглерода $^{14}C/^{13}C$ в изученных образцах нормировали на содержание $^{14}C/^{13}C$ в указанных стандартах.

Оценка возраста РВУ производилась с использованием классического уравнения [2]. Для расчетов использовались результаты количественных определений содержания радиоизотопа ^{14}C в процентах современного стандарта углерода (pmc – per cent modern carbon) как с традиционным значением периода полураспада ^{14}C (5568 лет), применяемым для органических субстанций, так с рекомендованным для водных систем, физическим значением периода полураспада ^{14}C (5730 лет) [2]. На рис. 1 представлены результаты оценки возрастов с применением традиционного периода полураспада. Наибольшая поправка, полученная при использовании величины физического периода полураспада углерода ^{14}C составляла не более 540 лет, что является не очень значимым отклонением при датировании углерода в водоносных горизонтах [2].

Изотопный состав кислорода и водорода изученных вод представлены на рисунке 2а. Видно, что воды обладают широким спектром вариации проанализированных параметров. Изотопный состав водорода и кислорода варьирует в диапазонах от -140 до -114 ‰ для δD и от -18,7 до -15,3 ‰ для $\delta^{18}O$. Большинство точек изотопного состава ложатся близко к глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) [16], что указывает на их инфильтрационное происхождение из атмосферных осадков (рис. 2а) [1]. Отметим, что для вод с различным содержанием ^{14}C относительно современного стандарта (то есть, различным возрастом РВУ при простейшей интерпретации данных) характерно разделение по изотопному составу кислорода и водорода. Наглядно это продемонстрировано на рисунке (рис. 2б). Видно, что по мере уменьшения доли ^{14}C в составе РВУ изотопный состав водорода становится все беднее дейтерием (зависимость описывается уравнением $\delta D = 0.2003 \cdot [^{14}C] - 142.15$). Аналогичная зависимость наблюдается и для значений $\delta^{18}O$. Предполагая корректность оценки возрастов РВУ, можно прийти к заключению, что климатические условия формирования вод до их инфильтрации постепенно изменялись: от более холодных в древности к более теплым современным.

Этот результат отчасти объясняет существенное различие в изотопном составе кислорода и водорода подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области. Отсутствие выраженных перепадов рельефа в ближайшем окружении, а также удаленность от всех крупных водоемов сводит к минимуму влияние высотного и широтного эффекта вариации изотопного состава [1]. Как известно, подземные воды, ввиду тщательного перемешивания, усредняют изотопный состав кислорода и водорода и отражают некоторую усредненную величину за длительный период времени. Небольшие смещения в изотопном составе одновозрастных водоносных горизонтов также могут наблюдаться, в частности, благодаря смещению акцентов питания индивидуальных источников от более теплых к более холодным периодам года. В нашем случае, имея в распоряжении оценки радиоуглеродных возрастов ВРУ можно предполагать смещение акцентов питания не только по сезонным осадкопроявлениям, но уже и по длительным временным периодам, когда выразительно мог проявиться эффект климатических изменений.

Безусловно, корректная оценка возраста ВРУ сопряжена с множеством факторов вторичного влияния, о чем было сказано ранее. Применение простых расчетных методов для оценки возраста ВРУ не всегда выглядит достоверным. Поэтому, кроме простого уравнения для расчета возраста образца [2] мы использовали подход Пирсона-Шварценки [1, 17], который позволяет нивелировать эффект разубоживания РВУ вод карбонатами коллектора и построить линии одновозрастных вод даже при различной удельной активности в них радиоуглерода (рис. 2в). Из проведенных построений видно, что большинство точек расчетных значений возрастов РВУ корректно располагаются на диаграмме Пирсона-Шварценки, то есть, попадают в соответствующие диапазоны возрастов. Исключение составляют лишь точки вод с расчетными возрастами ВРУ до 2500 лет. Вероятно, это отклонение обусловлено рядом факторов, среди которых, в первую очередь, следует выделить невысокие значения расчетных возрастов, а отсюда и высокую погрешность определений.

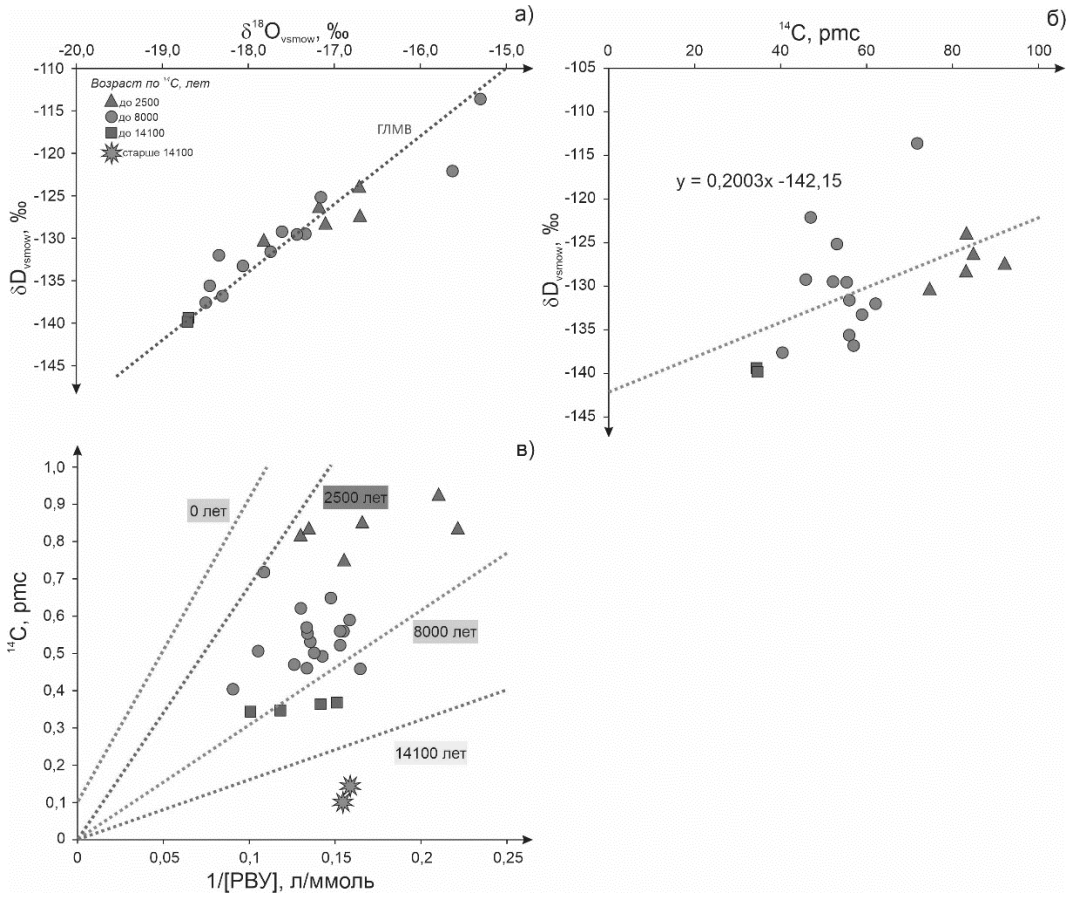


Рис. 2. Изотопный состав кислорода и водорода подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области. ГЛМВ [16] (а); изменение изотопного состава водорода в водах от измеренного содержания ^{14}C, pmc (б); диаграмма линий одновозрастных вод по [1, 17] (в).

Следует принять во внимание влияние «эффекта жесткой воды» [4], позже получившего название «эффект резервуара» [18], который приводит к искусственному завышению реального возраста водоносного горизонта. В зависимости от комплекса принятых начальных условий при оценке радиоуглеродного возраста, ошибка датировок может достигать 5000 лет [2]. Полагаем, что суперпозиция этого эффекта с другими вторичными геохимическими процессами, может приводить также и к занижению радиоуглеродного возраста в водных системах. Например, при использовании модели смешения разновозрастных вод [19], привнос даже небольшой порции современной воды (0,1%) в коллектор с древними водами может занизить ^{14}C-возраст почти вдвое [1]. В целом, для изученных подземных вод результаты оценки радиоуглеродного возраста с применением двух подходов получились соизмеримыми и вполне могут быть использованы для дальнейшей интерпретации данных. Полученные результаты позволяют объяснить существенное различие в изотопном составе кислорода и водорода подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области, обусловленные, очевидно, не только различием акцентов питания в разные периоды года, но также и изменением климатических условий в регионе в течение длительного периода.

Полевые и аналитические работы по изучению особенностей изотопного состава подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области выполнены при финансовой поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Список литературы

1. Ферронский В.И. Изотопия гидросферы земли / Ферронский В.И., Поляков В.А. – Москва: Изд-во Научный мир, 2009. – 632 с.

2. Aggarwal P.K. Isotopes in the Water Cycle. Past, Present and Future of a Developing Science / Aggarwal P.K., Gat J.R., Froehlich K.F.O. – Netherlands: Springer Dordrecht, 2005. – 382 p.

3. Anderson, E.C. Natural Radiocarbon from Cosmic Radiation / Anderson, E.C., Libby, W.F., Weinhouse, S., Reid, A.F., Kirshenbaum, A.D., Grosse, A.V. – *Physical Review, 1947. V. 72. – P. 931-936.*

4. Münnich K.O. Messung des 14C-Gehaltes von hartem Grundwasser / Münnich K.O. – Naturwissenschaften, 1957. V. 34. – P. 32-33.

5. Geyh M.A. An overview of 14C analysis in study of groundwater / Geyh M.A. – Radiocarbon, 2000. V.42. No. 1. – P. 99-114.

6. Novikov D.A. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashchevskaya A.A., Kalinkin P.N., Petrozhitsky A.V. – Groundwater for Sustainable Development, 2023. V. 20. 100886.

7. Novikov D.A., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Derkachyov A.S., Chernykh A.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia // Geochemistry. – 2023. V.83 № 4– 126016.

8. Пыряев А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А., Дульцев Ф.Ф., Деркачев А.С., Черных А.В., Хващевская А.А. Изотопно-концентрационная характеристика природных вод Новосибирской области как инструмент контроля их взаимодействия с окружением // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. Т. 334. № 2. – С. 22-33.

9. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Сухорукова А.Ф., Вакуленко Л.Г., Пыряев А.Н., Максимова А.А, Деркачев А.С., Фаге А.Н., Хващевская А.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В., Мельгунов М.С., Калинкин П.Н., Растигеев С.А. Об открытии слаборадоновых вод – Инские источники // Геология и геофизика. – 2022. Т. 63. № 12. – С. 1714-1733.

10. Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Сухорукова А.Ф., Дульцев Ф.Ф., Деркачев А.С., Черных А.В., Хващевская А.А. Об открытии слаборадоновых вод – Седова Заимка // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. Т. 333. № 12. – С. 61-73.

11. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Максимова А.А., Пыряев А.Н., Фаге А.Н., Хващевская А.А., Деркачев А.С., Черных А.В. Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Новобибеевского проявления радоновых вод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. Т. 233. № 1. – С. 57-72.

12. Novikov D.A., Dultsev F.F., Kamenova-Totzeva R., Korneeva T.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky–Mochishche zone of Novosibirsk, Russia // Environmental Earth Sciences. – 2021. V. 80. No. 216.

13. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia // Groundwater for Sustainable Development. – 2021. V. 15. – 8 p.

14. Пыряев А.Н. Стабильные изотопы как инструмент контроля границ закрытых экосистем на примере бассейна р. Витим / Пыряев А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А. – Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2022. Т. 333. № 5. – С. 148-157.

15. Lysikov A.I. Novel Simplified Absorption-Catalytic Method of Sample Preparation for AMS analysis designed at the Laboratory of Radiocarbon Methods of Analysis (LRMA) in Novosibirsk Akademgorodok / Lysikov A.I., Kalinkin P.N., Sashkina K.A., Okunev A.G., Parkhomchuk E.V., Rastigeev S.A., Parkhomchuk V.V., Kuleshov D.V., Vorobyeva E.E., Dralyuk R.I. – International Journal of Mass-spectrometry, 2018. V. 433. – P. 11-18.

16. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. Ninth edition. / Hoefs J. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021. – 528 p.

17. Pearson F.J.Jr. 14C Evidence for the origin of arid region groundwater, northern province, Kenya / Pearson F.J.Jr., Swarzenki W.V. – Vienna: IAEA: Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, 1974. V. II. – P. 95-108.

18. Olsson I.U. The radiocarbon contents of various reservoirs / Olsson I.U. // Radiocarbon dating, 9th Internat. Radiocarbon Conf.: Proc. – Los Angeles, 1979. – P. 613-618.

19. Evans G.V. Some Problems in the Interpretation of Isotope Measurements in United Kingdom Aquifers / Evans G.V., Otlet R.L. Downing A., Monkhouse R.A. Rae G. – Vienna: IAEA: Isotope Hydrology, 1979. V. II. – P. 679-708.

ПРОЦЕССЫ И ПАРАМЕТРЫ, КОНТРОЛИРУЮЩИЕ МИГРАЦИЮ РАДИОНУКЛИДОВ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАССИВАХ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУНКТОВ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАО (НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ» В НИЖНЕКАНСКОМ МАССИВЕ, КРАСНОЯРСКИЙ КРАЙ)

Румынин В.Г.[1,2], Никуленков А.М.[1,2], Вилькина М.В.[1,2], Каплан Е.М.[1,2]
[1]СПб Отделение института геоэкологии РАН им. Е.М. Сергеева, Санкт-Петербург, rumynin@hgepro.ru, annik@hgepro.ru, wilkina.mari@hgepro.ru, emkaplan@hgepro.ru
[2]Санкт-Петербургский государственный университет

Аннотация. В настоящей статье проанализированы структурные особенности гнейсовой толщи с позиций движения в ней радиоактивных растворов, а также подходы к выбору математических моделей для описания этого движения. Представлены эффективные параметры для асимптотической EPM модели гетерогенной бимодальной среды. Для тестового примера оценена роль переноса Am-243 и Cs-135 коллоидными частицами.

***Ключевые слова**: фильтрация подземных вод, миграция радионуклидов, бимодальная трещиноватая среда, эффективные параметры.*

Abstract. The article analyzes the structural features of the gneiss strata from the perspective of the movement of radioactive solutions in it, as well as approaches to the selection of mathematical models to describe this movement. Effective parameters for the asymptotic EPM model of a heterogeneous bimodal medium are presented, and the role of the transport of Am-243 and Cs-135 by colloidal particles is assessed for a test example.

***Key words**: groundwater flow, subsurface transport of radionuclides,bimodal medium, effective parameters.*

В последние десятилетия, благодаря актуальной во многих странах потребности в геологическом захоронении высокоактивных отходов (ВАО), был достигнут значительный прогресс в области изучения транспорта радионуклидов в кристаллических трещиноватых массивах. Уникальным является и опыт инженерных изысканий и проектных решений, поддержанных модельными проработками, на участке Енисейский, выбранном для строительства ПИЛ, а впоследствии (с высоким уровнем вероятности) пункта глубинного захоронения ВАО 1 и 2 класса (ПГЗРО) в Нижнеканском гранитогнейсовом массиве (Красноярский край). В настоящем докладе рассматриваются некоторые проблемы, связанные с обоснованием математических моделей и их параметрической обеспеченностью с целью использования при оценке долговременной безопасности (ОДБ) данного объекта.

Фильтрационные свойства кристаллического массива. В верхней части разреза (мощностью до 150–200 м) выделяется зона экзогенной трещиноватости (трещины выветривания и разгрузки напряженного состояния массива), представленная взаимосвязанной системой трещин, образующих трещинно-пластовую структуру с суммарной проводимостью до первых $м^2$/сут. Проницаемость глубоких частей разреза определяется наличием слабосвязных локальных зон тектонической дезинтеграции 4-го порядка [1] двух типов, но одного генетического типа: (1) зоны повышенной трещиноватости на контакте долеритовых даек с породами контракционной трещиноватости, (2) зоны дезинтеграции повышенной трещиноватости и дробления, свободные от кристаллизованного магматического расплава. По данным бурения, оба типа этих структур имеют преимущественно субмеридиональное простирание и крутые углы падения [2]. Задокументированы и менее выраженные зоны трещиноватости субширотного простирания.

Гидродинамика фильтрационного потока. Зона потенциального влияния объекта контролируется водосборным бассейном малых рек в правобережье р. Енисей,

являющейся областью разгрузки речного стока и инфильтрационных вод в пределах глубин (m) примерно 600 м. Соотношение проводимостей верхней зоны выветривания и нижней зоны тектонической дезинтеграции определяет долю инфильтрации, поступающей на горизонт размещения РАО. Если коэффициент фильтрации падает с глубиной, подчиняясь экспоненциальной зависимости, то для любого z может быть определена вертикальная компонента, в частности, для «целевого» интервала размещения РАО, ε_{z0}:

$$\varepsilon_{z0} = \frac{\exp(-\alpha\bar{z}_0) - \exp(-\alpha)}{1 - \exp(-\alpha)}\varepsilon, \quad (1)$$

где ε – величина площадной инфильтрации, $\bar{z}_0 = z_0 / m$, $\alpha = Am$, A – коэффициент затухания проницаемости массива с глубиной, находящийся в диапазоне 0.01–0.02 м$^{-1}$ (среднее 0.015 м$^{-1}$) [3]. Откуда при z_0 = 400 м, A = 0.015 м$^{-1}$, для ε = 0.1–0.2 м/год (воднобалансовые расчеты) получаем ε_{z0} = (2.4–4.8)·10^{-4} м/год. Средняя горизонтальная скорость Дарси в интервале 400–600 м будет: $v_{x0} \approx L\varepsilon_{z0} / ((m - z_0)/2)$, т.е составит 0.01–0.02 м/год.

Довольно слабо развитая сеть мониторинговых скважин для наблюдений за распределением давления (напора) в трехмерном пространстве массива не позволяет описать структуру фильтрационного течения с нужной степенью детальности и выполнить верификацию 3D численных моделей геофильтрации, использование которых поэтому оказывается в ряде случаев не вполне оправданным. Альтернативой здесь могут служить многовариантные расчеты с использованием 1D и 2D концептуальных моделей для анализа чувствительности.

Модели фильтрации и массопереноса в зоне тектонической трещиноватости. Для моделирования течения жидкости (фильтрации) и переноса растворенных компонентов в трещиноватых средах существуют несколько подходов, основными из которых являются: (1) EPM (Equivalent Porous Medium) модель эквивалентной пористой среды, предполагающая выполнение предпосылки сплошности среды; (2) DFN (Discrete Fracture Network) подход – описание сети трещин [4], где явно учитывается течение жидкости в отдельных трещинах; (3) SC (Stochastic Continuum) подход – допускает осреднение локального масштаба опробования систем трещин (зон трещиноватости) в пределах отдельных, локальных областей, представляющих собой пространственно-коррелируемую структуру [5]; (4) гибридный DFN/SC подход [6] – характеристики множественной реализации процессов фильтрации и массопереноса, полученные в рамках DFN моделей в локальных блоках, переносятся в региональную SC модель, что позволяет моделировать эффекты фокусировки (быстрого транспорта) в региональном масштабе.

В настоящем докладе основное внимание уделяется использованию EPM моделей, базирующихся на решении уравнений конвективной дисперсии в среде с гетерогенной проницаемостью и пористостью, что позволяет проанализировать сочетание нескольких факторов, влияющих на результаты ОДБ. При этом, при обосновании параметров модели мы использовали элементы стохастического анализа, изложенные в другой статье из этого сборника [7].

Радиологически значимые радионуклиды. Наиболее опасные ВАО, подлежащие изоляции в ПГЗРО, представлены остатками делящихся материалов и ядерного топлива и содержат множество продуктов деления, образованными при переработке отработанного ядерного топлива (ОЯТ) реакторов ВВЭР, БН и АФ [8]. Для прогнозных оценок ОДБ важны два промежутка времени – краткосрочный до, примерно, 1000 лет, и долгосрочный – после 1000 лет (вплоть до времени истечения проектного времени защитного действия СИБ, оцениваемое в 100 000 лет). В первый период

экологическая опасность определяется всем перечнем радионуклидов, включая короткоживущие продукты деления (основные из них – Cs-137 и Sr-90). В период, превышающий 1000 лет, потенциальная опасность будет связана с долгоживущими изотопами урана и актинидами плутониевого ряда (Pu, Am, Np и некоторыми другими), но прежде всего с продуктами деления (I-129, Cl-36, Tc-99, Se-79, Sn-126, Cs-135, а также C-14).

Сценарии высвобождения активности (радионуклидов). Данная проблема относится к одной из наименее разработанных проблем, возникающих при выборе моделей для ОДБ объекта ПГЗРО на участке «Енисейский». Наиболее обоснованным представляется сценарий, связанный с реализацией локального сейсмического события, приводящего к разрушению канистр с остеклованными отходами в скважинах захоронения ОВАО. Потеря изоляционных свойств контейнера приводит к выщелачиванию матрицы и выносу активности потоком подземной воды, поступающей из массива.

Решение уравнения баланса активности в зоне сдвиговой деформации с учетом ее гидравлической проводимости, позволило получить решение для функции $C_b(t)$, а также определить период функционирования такого источника, *t**, что определяет характер граничного условия для решения задачи миграции радионуклидов в массиве. Полученные значения *t** для разных радионуклидов изменяются от нескольких тысяч до сотен тысяч лет. Процесс характеризуется высвобождение активности, для разных радионуклидов от 10^7 до 10^{13} Бк на одну аварийную технологическую скважину с контейнером ОВАО.

EPM модель. Предполагается, что в региональном масштабе процесс фильтрации и массопереноса может рассматриваться в рамках предпосылки сплошности среды, пренебрегающей ролью механизмов фокусирования фильтрационного потока, т.е. формированием быстрых путей миграции. Эффективные параметры EPM модели могут быть найдены из анализа модели фильтрации и массопереноса в гетерогенной бимодальной среде. Бимодальное распределение предполагает, что гнейсовый массив представляет собой формацию слабопроницаемых кристаллических пород с первичными (контракционного генезиса) трещинами (Hydraulic Rock Mass Domain, HRD), дезинтегрированную линейными зонами тектонической деформации массива с повышенной проницаемостью (Hydraulically Conductive Zones, HCZs).

Распределение областей HCZ и HRD описывается моделью пространственной случайной функции (SRF) [0]:

$$Y(\mathbf{x}) = I(\mathbf{x})Y_1(\mathbf{x}) + [(1 - I(\mathbf{x})]Y_2(\mathbf{x}), \qquad (2)$$

где $I(\mathbf{x})$ – индикатор SRF, принимающий значение 1 (например, для HCZ) или 0 (для HRD) с вероятностью *P* или (1-*P*); $Y_1(\mathbf{x})$ и $Y_2(\mathbf{x})$ определяют распределение коэффициента фильтрации, k, в двух структурных единицах. Соответственно, для $Y_i(\mathbf{x})$ определяющими являются: $m_i = \langle Y_i \rangle$ – среднее, σ_i^2 – дисперсия $Y_i = \ln k$, λ_i – интегральный корреляционный масштаб. Глобальными параметрами самой изотропной функции $Y(\mathbf{x})$ являются m_Y, σ_Y^2 и λ_I. Индикаторная функция $I(\mathbf{x})$, определяющая геометрию Y_1 и $Y_2(\mathbf{x})$, также является пространственно коррелируемой функцией.

Анализ показывает, что увеличение или уменьшение дисперсии фильтрационных свойств внутри водопроводящих зон (HCZ) величины σ_1^2 и σ_2^2 оказывает слабое влияние на общую дисперсию σ_Y^2, т.е. контраст между зонами с высокой и низкой проводимостью является основным источником неоднородности, а влияние неоднородности внутри этих зон вторично [8]:

$$\sigma_Y^2 \approx P(1-P)(m_1 - m_2)^2 \qquad (3)$$

Дальнейший анализ массопереноса в бимодальной среде позволяет получить аналитические выражения для асимптотических (большие времена) значений коэффициентов продольной, δ_L, и поперечной, δ_T, макродисперсивности [9, 11]. Для продольной макродисперсии

$\delta_L = \sigma_Y^2 \lambda_I$ (4)

Для логнормального закона распределения коэффициента фильтрации с учетом (3) получаем:

$$\delta_L = \lambda_I P(1-P)\left(\ln\frac{k_1}{k_2}\right)^2. \quad (5)$$

Поперечная компонента, δ_T, при этом стремится к 0. Асимптотика (5) справедлива при $\tau_I = u_I t/\lambda_I >> 1$.

Скорость миграции несорбируемого радионуклида в 3D изотропной бимодальной среде, $u_l = k_{eff} J_l / n$, в направлении l среднего градиента фильтрационного потока, J_l, определяется эффективным значением коэффициента фильтрации [0]:

$$k_{eff} = k_G\left(1+\frac{\sigma_Y^2}{6}\right),\ k_G = \exp(m_Y),\ m_Y = m_1 P + m_2(1-P); \quad (6)$$

здесь k_G – среднее геометрическое, $k_G = k_m\left(\frac{k_f}{k_m}\right)^P$; n – трещиноватость. Как видно, соотношение $\nu = k_f/k_m$, параметр P и корреляционный масштаб λ_I контролируют как эффективную проницаемость массива, так и дисперсионные характеристики транспортного процесса. Эти величины определяют перколяционные свойства массива и возникновение превалирующих путей фильтрации жидкости [12].

Сорбция радионуклидов. Рассматриваемый комплекс пород характеризуется присутствием нескольких сорбционных фаз: поверхность трещин, дисперсный материал в трещинном пространстве, матрица породных блоков. Анализ сорбционных характеристик, полученных в опытах с образцами гнейса, позволяет разделить радионуклиды на четыре характерные группы: инертные/несорбируемые (I-129, Cl-36, C-14), слабо сорбируемые (Se-79, Tc-99), умеренно сорбируемые (Sn-126, Cs-135, U-238, Cs-137, Sr-90) и сильно сорбируемые (Pu-239, Am-243, Np-237). Хотя актиниды формально попадают в последнюю группу, они способны к активной миграции на коллоидных частицах – дисперсном материале бентонитового буфера и продуктах деградации стеклянной матрицы, а также коррозии металлических контейнеров.

Для гетерогенной трещиноватой среды с бимодальным распределением проницаемости эффективный фактор сорбционной задержки определяется как

$R = PR_f + (1-P)R_m$, (7)

где R_f и R_m – парциальные значения R для структурных единиц HCZ и HRD.

Одномерная EPM модель для экспертных расчетов по линиям тока в направлении l среднего градиента потока, J, можно представить в виде конвективной дисперсии с эффективными параметрами

$$R\frac{\partial C}{\partial t} + \lambda RC + u_l\frac{\partial C}{\partial l} - D_L\frac{\partial^2 C}{\partial l^2} = 0, \quad (8)$$

где $D_L = u_l \delta_L$, λ – константа радиоактивного распада (=0.693/$T_{1/2}$).

Коллоидный транспорт радионуклидов. Техногенные коллоиды в подземных водах на участке захоронения появляются, главным образом, при разрушении бентонитовых глин, широко используемых для создания инженерных барьеров

безопасности. Особую значимость бентонитовые коллоиды имею для транспорта хорошо сорбируемых актинидов (Am, Np, Pu) и U, коэффициенты сорбции которых измеряются многими тысячами и десятками тысяч см^3/г.

Влияние коллоидов на потенциал радиоактивного загрязнения может быть учтено простой корректировкой факторов сорбционной задержки, R_f и R_m. В случае бентонитовых коллоидов, не сорбируемых стенками трещин:

$$R_f = \frac{R_{fi} + K_{ic}C_c}{1 + K_{ic}C_c}, \quad R_m = \frac{R_{mi} + K_{ic}C_c}{1 + K_{ic}C_c}, \quad R_{fi} = 1 + P_{32}^f K_a / n, \quad R_{mi} = 1 + P_{32}^m K_a / n,$$

(9)

где K_a – коэффициент сорбционного распределения радионуклида на поверхности трещин (м); P_{32}^f – удельная поверхность трещин для HCZ (1/м); P_{32}^m – то же для HRD (1/м); K_{ic} – коэффициент сорбционного распределения радионуклида на мобильных коллоидах (см^3/г), C_c – концентрация коллоидов в источнике (мг/л).

Иллюстративный пример. Основываясь на аналитическом решении уравнения (8), рассмотрим распределение активностей, $C(t)$, двух сорбируемых радионуклидов, Am-243 и Cs-137, поступающих в зону разгрузки потока подземных вод на расстоянии L = 4500 м от источника (ПГЗРО). Параметры, приведенные в нижеследующей таблице, отражают экспертные представления о структурных, фильтрационных и миграционных свойствах гнейсового массива, установленные в процессе геолого-гидрогеологического его изучения и лабораторных сорбционных экспериментов. Источник загрязнения, описываемый импульсной функцией (мгновенное высвобождение суммарной активности M_0, Бк), – результат гипотетического разрушения контейнера с ВАО под воздействием гипотетического сейсмического события (не опубликованные расчетные данные).

Таблица. Параметры, используемые при обосновании EPM модели и миграционных расчетов

Структурные и фильтрационные характеристики массива									
i	Элемент массива	P_i	k_i, м/сут	$\ln k_i$	J, м/м	σ_Y^2	λ_l, м	k_{eff}, м/сут	v_l, м/год
1	HCZ	0.1	$3.5\cdot10^{-3}$	-5.7	0.06	0.48	85	$4.8\cdot10^{-4}$	0.01
2	HRD	0.9	$3.5\cdot10^{-4}$	-8.0					
Радионуклиды, источник и миграционные параметры									
РН	$T_{1/2}$, год$^{-1}$	M_0, Бк/м^2	n, –	u_l, м/год	δ_L, м	K_a, см	K_{ic}, см^3/г	P_{32}^f, м$^{-1}$	P_{32}^m, м$^{-1}$
Am-243	7.38E+03	2.9E+9	0.003	3.3	41	50	$1\cdot10^4$	0.5	0.1
Cs-135	2.30E+06	1.6E+8				10	$5\cdot10^3$		

Как видно из рисунка (решение задачи на модельном комплексе ANSDIMAT), при заданных параметрах, скорость переноса радионкулидов в присутствии коллоидов возрастает в два-три раза по сравнению со скоростью миграции ионных форм.

Выводы. Выполненный анализ показывает, что ОДБ объекта, связанная с использованием миграционных моделей, требует выполнения большого объема геолого-структурных и гидрогеологических изысканий. Использование простейшей из этих моделей, EPM, несмотря на ряд сделанных при ее обосновании допущений, позволяет выполнить анализ чувствительности миграционного процесса к тем или иным параметрам, определяющим потенциал переноса радионуклидов. В частности, показано, что появление глинистых коллоидов, как одного из продуктов разрушения инженерных барьеров, увеличивает опасность радиоактивного загрязнения подземных вод.

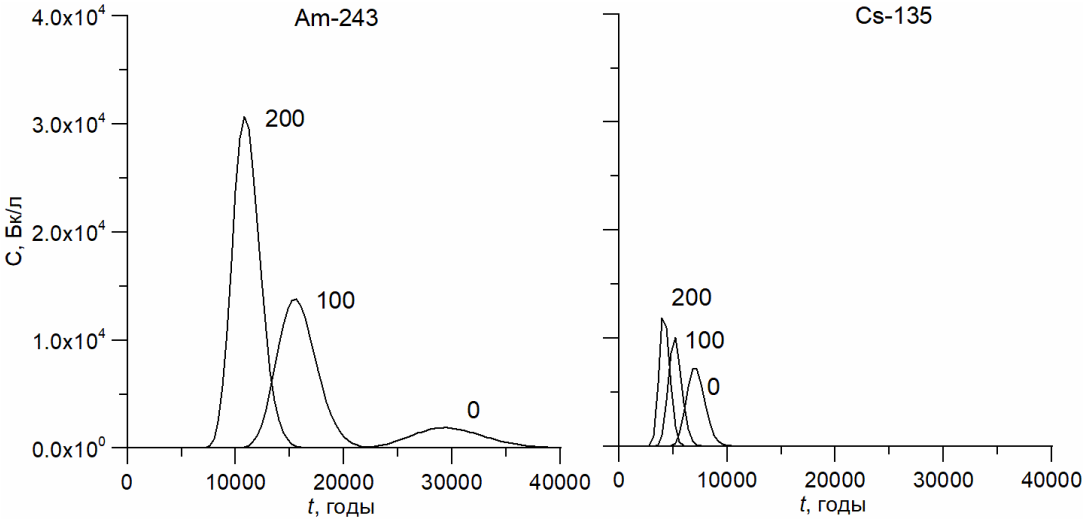


Рис. Активности Am-243 и Cs-135 на выходной границе потока как решение уравнения (8) при заданных параметрах (см. таблицу). Числа у кривых – концентрация бентонитовых коллоидов, мг/л.

Список литературы

1. Никуленков А.М., Румынин В.Г., Синдаловский Л.Н., Шварц А.А. Модель СПбО ИГЭ РАН// Захоронение РАО на участке Енисейский в Красноярском крае: история выбора площадки и современное состояние исследований. Ред.: Б.Т. Кочкин и И.И. Линге. М.: ИБРАЭ РАН. 2023 г., 357 с.

2. Морозов О.А., Расторгуев А.В., Неуважаев Г.Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край). Радиоактивные отходы № 4 (9), 2019.

3. Rumynin V.G., Sindalovskiy L.N., Nikulenkov A.M., Leskova P.G. Effect of anisotropy and depth-dependent hydraulic conductivity on concentration curve response to nonpoint-source pollution. Journal of Hydrology. 2020, v. 591, 125319. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125319.

4. Long, J.C.S., J.S.Remer, C.R. Wilson, Witherspoon P.A. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resour. Res., 1982, v. 18(3), p. 645–658.

5. Neuman Sh.P. Continuum representation of fractured rock permeability as an alternative to the REV and fracture network concepts // The 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS). Tucson, Arizona, 1987. p. 533–561.

6. Ohman J., Niemi A., Tsang C.-F. A regional-scale particle-tracking method for nonstationary fractured media. Water Resour. Res., 2005, v. 41, W03016, doi:10.1029/2004WR003498.

7. Вилькина М.В., Никуленков А.М., Румынин В.Г. Оценка связанности потока в трещиноватом масииве на участке «Енисейский» в Красноярском крае с использованием метода многоточечной геостатистики. В этом сборнике тезисов докладов Совещания. 2024.

8. Богатов С.А., Блохин П.А., Уткин С.С. и др. Усреднённые оценки удельной активности и тепловыделения остеклованных высокоактивных отходов, накопленных на ФГУП "ПО "Маяк". Вопросы радиационной безопасности. 2021, № 3.

9. Rubin Y. (1995). Flow and transport in bimodal heterogeneous formations. Water Resources Research, vol. 31, no. 10, p. 2461–2468.

10. Lu Z., Zhang D. On stochastic modeling of flow in multimodal heterogeneous formations Water Res. Res., 2002, v. 38 (10), 1190, doi:10.1029/2001WR001026.

11. Dagan G., Lessoff S.C. Solute transport in heterogeneous formations of bimodal conductivity distribution. 1. Theory. Water Resour. Res., 2001, v. 37, No. 3, p. 465-472.

12. Dagan G. Statistical Theory of Groundwater Flow and Transport' Pore to Laboratory, Laboratory to Formation, and Formation to Regional Scale. Water Resour. Res., 1986, v. 22 (9), p. 120S-134S.

ОТРАЖЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ДЕГРАДАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ СЕВЕРА ЕВРАЗИИ В ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (^{2}H, ^{18}O) И РАСТВОРЕННОГО УРАНА (^{234}U/^{238}U)

Токарев И.В.[1], Яковлев Е.Ю.[2]
1 – Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, i.tokarev@spbu.ru
2 – Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики УрО РАН, Архангельск, evgeny.yakovlev@fciarctic.ru

Аннотация. Евразийское пятно многолетнемерзлых пород (ММП) существенно сократилось с начала голоцена. В связи с этим на месте мерзлых толщ возникли горизонты, содержащие «возрожденные» (талые мерзлотные) воды. Метками таких вод являются специфическое поведение изотопов водорода и кислорода, а также значительные (по сравнению с радиоактивным равновесием) избытки урана-234. Наличие вод с указанными изотопными характеристиками достоверно установлено для ряда районов России. Скорость отступания южных границ ММП может быть оценена с помощью датирования. Деградацию мерзлоты следует учитывать при фундаментальных научных исследованиях, а также при долговременном планировании хозяйственной деятельности.
***Ключевые слова**: деградация мерзлоты, изотопные метки.*

Abstract. Area of the Eurasian permafrost has significantly decreased since the beginning of the Holocene. As result a “revived” water replaced a ground ice in the aquifers. Fingerprints of such water are the specific ratios of hydrogen and oxygen isotopes, as well as significant (in comparison with radioactive equilibrium) excesses of uranium-234. Water with such isotopic characteristics has been reliably established for the number of regions of Russia. The rate of the permafrost degradation and retreat of its southern boundary could be estimated by radiocarbon and uranium/helium-4 dating. The permafrost degradation should be taken into account in fundamental scientific research, as well as in long-term planning of economic activities.
***Key words**: permafrost degradation, isotope tracers.*

Долговременные глобальные вариации климата существенно изменяют условия континентальной ветви водообмена, что отражается преимущественно в изотопно-гидрохимическом облике подземных вод, а затем и в некоторых характеристиках океанического резервуара [6, 14, 23]. Переход от теплого интерстадиала к максимуму похолодания происходит в течение нескольких десятков тысяч лет с периодическими пульсациями в сторону потепления. Напротив, потепление в геологическом масштабе времени протекает довольно быстро, занимая от нескольких сотен до первых тысяч лет. Поэтому в ходе похолодания успевает развиться ряд процессов, приводящих к заметным изотопно-гидрохимическим эффектам, а при потеплении ситуация условно фиксируется. В результате в евразийское пятно многолетнемерзлых пород (ММП) периодически увеличивает и уменьшает свою площадь. В его периферийной зоне континентального пятна ММП возникает нескольких типичных гидрогеологических и геокриологических обстановок, сменяющих друг друга, которые в настоящее время могут быть расшифрованы. Рассмотрим эти обстановки, исключив на данном этапе гидрогеологические массивы, сложенные кристаллическими породами.

I. В первую группу следует отнести районы, где распространены водоносные горизонты, время водообмена в которых заметно меньше времени, необходимого для перехода от потепления к похолоданию, могущему способствовать формированию устойчивой и достаточно мощной (десятки метров) толщи мерзлых пород (как правило, это неглубоко залегающие горизонты Южной геокриологической зоны). В этом случае в горизонтах, которые впоследствии превратятся в мерзлоту, успевает произойти смена унаследованной от теплого климатического периода воды с «тяжелым» изотопным составом (повышенными концентрациями дейтерия – ^{2}H и кислорода-18 – ^{18}O) на изотопически легкую воду от атмосферных осадков периода похолодания. Охлаждение геологического разреза при этом обусловлено преимущественно конвекционным

механизмом – поступлением холодных инфильтрационных вод (напомним, что теплоемкость воды примерно в два раза выше теплоемкости скелета любой породы). Поскольку указанные водоносные горизонты представляют собой преимущественно высоко водонасыщенные породы (за исключением кавернозно-трещиноватых карбонатных толщ с низкой активной пористостью), то промерзание разреза сдерживается выделением скрытой теплоты при кристаллизации льда. После наступления теплого климатического периода и при отсутствии выдержанных региональных литологических водоупоров, а также за счет формирования таликов, в геологическом разрезе и в латеральном направлении формируется пестрая картина распределения изотопного состава воды. Пестрота распределения изотопных составов в отдельных частях таких гидрогеологических структур постепенно «смазывается» за счет дисперсионных механизмов и трехмерности сетки движения подземных вод.

Для рассматриваемой ситуации, с учетом временных потеплений в период оледенения, можно принять, что время пребывания пород в мерзлом состоянии оказывается заметно меньшим, чем продолжительность ледникового периода. Это снижает действие эффектов, способствующих возникновению значительных избытков урана-234 в периоды потеплений, когда лед мерзлоты тает. Поэтому для «возрожденных» вод в таких ситуациях изотопное отношение $^{234}U/^{238}U$, как правило, варьирует в пределах 1–3.

II. Вторую группу формируют гидрогеологические структуры (артезианские бассейны), в строении которых принимают участие выдержанные региональные водоупоры. В этом случае поступление холодных вод от области питания занимает значительное время и в ходе фильтрации их температура может быть повышена за счет теплового потока Земли. Промерзание разреза в этом случае идет, в основном, за счет кондуктивного оттока тепла в атмосферу. В результате изотопный состав воды в горизонтах, подвергающихся замораживанию, к моменту образования льда зачастую остается изотопически довольно тяжелым, примерно соответствующим предыдущему межледниковью или даже комбинации от всех предыдущих климатических периодов в пределах «возраста» подземных вод.

На эту относительно стабильную изотопно-гидрохимическую картину накладывает отпечаток криогенный метаморфизм, генерально сводящийся к тому, что изотопный состав вновь образующегося льда оказывается утяжеленным относительно начального, а состав остаточной воды – облегченным. Одновременно лед опресняется, а остаточная вода увеличивает свою минерализацию относительно начального содержания солей в воде. Кроме того, остаточная вода отжимается вниз по разрезу фронтом наступающих подземных льдов, если этому не препятствуют изолирующие свойства региональных водоупоров, что несколько ускоряет охлаждение пород до околонулевых температур по сравнению с чисто кондуктивным механизмом отдачи тепла в атмосферу. В случае формирования криопегов разрез, естественно, может охлаждаться и до отрицательных температур. Этому, в том числе, будет способствовать возросшая плотность воды, приводящая к появлению вертикального (нисходящего) гидравлического градиента. При формировании криопегов может также происходить некоторое увеличение проницаемости аргиллито-глинистых толщ в результате появления микротрещиноватости при осмотическом оттоке поровой воды.

По-видимому, время нахождения разреза в мерзлом состоянии для описываемой ситуации артезианского бассейна мало отличается от общей длительности криогенного периода, что способствует протеканию процессов, ответственных за возникновение значительных, иногда «ураганных» избытков урана-234, когда в «возрожденных» подземных водах формируются отношения $^{234}U/^{238}U > 10$.

II. Третью группу формируют гидрогеологические структуры, сложенные целиком или включающие мощные относительно слабопроницаемые толщи. Как правило, такие разрезы формируются при длительном чередовании трансгрессивно-

регрессивных обстановок. Обычно эти разрезы включают, кроме терригенных пород, представленных неупорядоченным переслаиванием более или менее глинистых осадков, еще и загипсованные слои начальной стадии эвапоритовой седиментации. В такой обстановке мощность зоны активного водообмена в теплые климатические эпохи оказывается незначительной (иногда не более 50–100 м), а подземные воды, подвергающиеся промораживанию и оттаиванию, почти не меняют своего пространственного положения. Указанные выше изотопно-гидрохимические эффекты в этих условиях также возникают, а вследствие кумулятивного «архивирования» результатов криогенного метаморфизма в некоторых случаях проявляются наиболее отчетливо. Побочным эффектом повторяющегося криометаморфизма в рассматриваемых толщах является возникновение гидрохимической инверсии. В этом случае воды в горизонтах, залегающих глубже нижней границы зоны распространения отрицательных температур и никогда не замерзавших, оказываются более пресными, чем воды, занимавшие нижнюю часть зоны мерзлоты.

Рассмотренные выше гидрогеологические и геокриологические схемы являются упрощением и в натурных условиях редко фиксируются в чистом виде. Одним из основных «мешающих» факторов является изменение глобального базиса дренажа из-за падения уровня Мирового океана в периоды накопления воды в щитовых ледниках. Вследствие этого на континентах формируется сеть переуглубленных речных долин, значительно понижаются региональные базисы эрозии и существенно увеличивается мощность зоны аэрации. Одновременно во внутриконтинентальных районах уменьшается количество осадков, из-за чего при локальных во времени похолоданиях наступают периоды холодного сухого климата, а при временных потеплениях – периоды холодного влажного климата. В периоды оледенений результатом комбинации указанных факторов является (а) уменьшение теплоемкости пород при их полном осушении, что способствует ускорению процесса промораживания разреза и замерзают водораздельные пространства; (б) увеличивается мощность зоны, охваченной окислительными процессами.

Для обоснования предлагаемой схемы эволюции изотопно-гидрохимического облика подземных вод под влиянием климатических факторов в конкретных геологических условиях авторами выполнен большой объем натурных наблюдений и обобщение литературных данных [1-5, 7-13, 15-22, 24-26]. Этими же работами показано, что для точной диагностики генезиса наблюдаемых изотопно-гидрохимических эффектов весьма полезным оказывается датирование подземных вод радиоуглеродным, уран-торий/гелий-4 или другими методами.

Схематически характер распределения изотопных меток в обобщенном гидрогеологическом разрезе платформенного типа представлен на рисунке и в таблице.

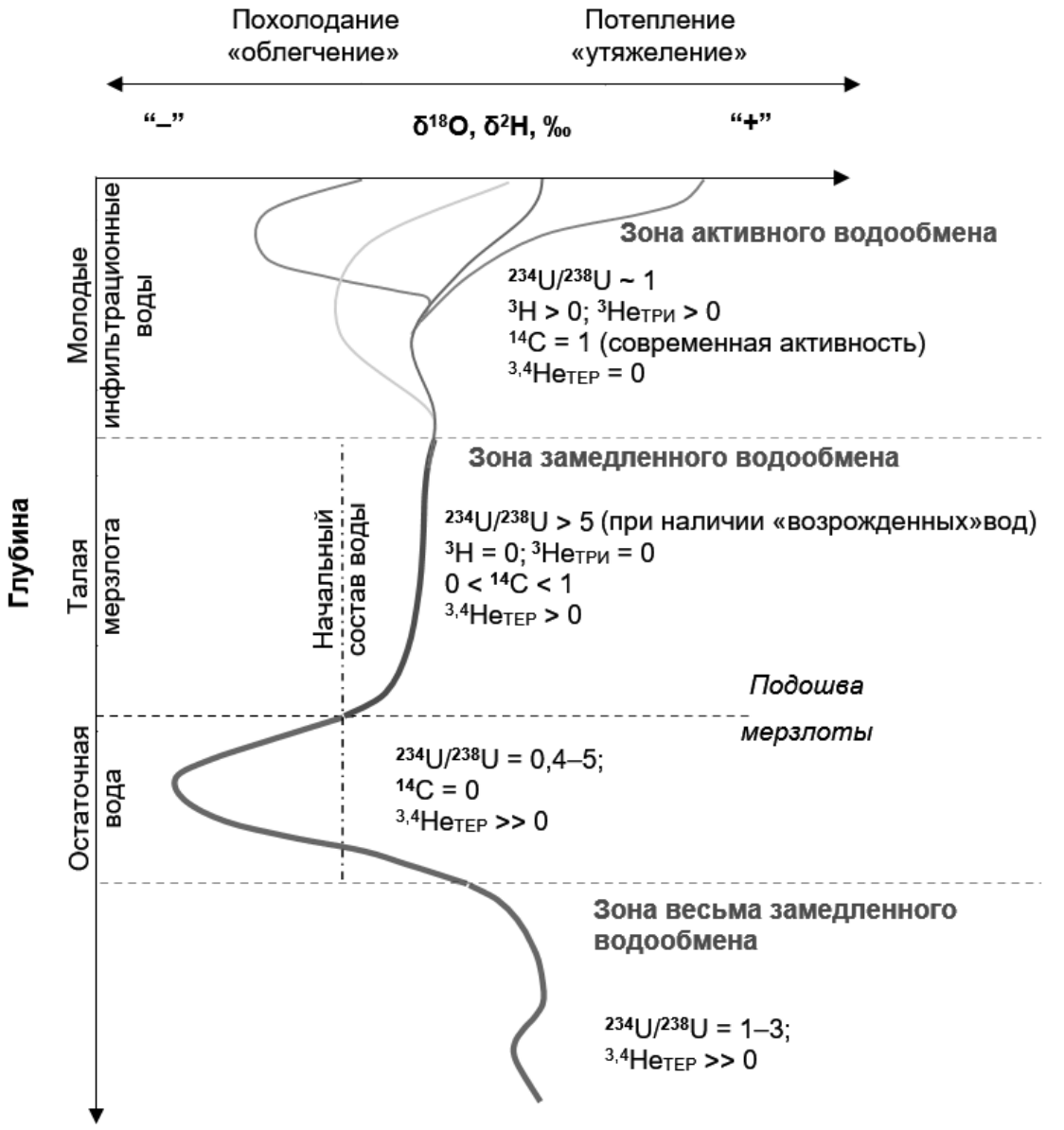


Рис. Упрощенная схема распределения изотопных меток в обобщенном гидрогеологическом разрезе платформенного типа под действием климатических факторов.

Таблица. Обобщенная схема вертикальной изотопно-гидрохимической зональности подземных вод севера Евразийского материка, сформированной под воздействием географо-климатических вариаций в конце кайнозоя

Гидродинамический этаж	Зона водообмена	Пространственное положение и свойства	Состояние при климати-ческих вариациях	Обобщенные изотопно-гидрохимические характеристики
Верхний (молодые воды)	Активного	Грунтовые и неглубоко залегающие напорные водоно-ные горизонты. Сезонноталый слой и талики в пределах сплошного развития современной и палеомерзлоты	Мощность значительно уменьшается при похолодании и увели-чивается при потеплении	Пресные воды. Присутствует ^{3}H; нулевой или незначительный возраст по ^{14}C; изотопный состав воды соот-ветствует современным атмосфер-ным осадкам; $^{234}U/^{238}U = 1–3$ (до 5); отношения $^{3}He/^{4}He$ и $^{20}Ne/^{4}He$ могут быть понижены относительно ин-фильтрационных вод за счет смеше-ния с древними водами или влияния восходящего потока гелия.
Средний (старые воды)	Замедлен-ного	Напорные водоносные горизонты, содержащие «возрожденные» воды в пределах развития мерзлоты в позднем кайнозое. Напорные воды глубокой циркуляции.	Мощность меняется значительно, варьируя за счет замерзания и таяния мерзлоты	В зависимости от проницаемости и литологии разреза, а также типа мерзлоты в прошлом воды от пресных до солоноватых. Опреснение, в неко-торых случаях является результатом вымораживания. В этом случае зачастую имеет место инверсионная гидрохимическая зональность. ^{3}H отсутствует или обнаруживается в следовых количествах за счет сме-шения с молодыми водами; значи-мый или «бесконечный» возраст по ^{14}C; изотопный состав воды легче современных осадков, зачастую несет следы криогенной метамор-физации; $^{234}U/^{238}U > 5$ (до 50); от-ношения $^{3}He/^{4}He$ и $^{20}Ne/^{4}He$ заметно понижены относительно инфильтра-ционных вод.
Нижний (древние воды)	Весьма замедлен-ного	Напорные водоносные горизонты ниже подошвы современной и палеомерзлоты	Мощность не меняется	Воды от солоноватых до рассолов. Повышение минерализации в неко-торых случаях связано с оттеснением остаточной воды при промерзании разреза. ^{3}H отсутствует; предельно высокий или «бесконечный» возраст по ^{14}C; изотопный состав воды раз-нообразен, иногда несет следы кри-огенной метаморфизации или «ки-слородного» сдвига; $^{234}U/^{238}U \approx 0,8–3$; отношения $^{3}He/^{4}He$ и $^{20}Ne/^{4}He$ существенно понижены относитель-но инфильтрационных вод.

Благодарности. *Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта АААА-А19-119091190094-6.*

Список литературы

1. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Токарев И.В., Гинзбург А.П., Васильчук А.К., Васильчук Дж.Ю. Радиоуглеродный возраст и стабильные изотопы кислорода в голоценовых повторно-жильных льдах на побережье Байдарацкой губы: Реконструкция январской палеотемпературы // Доклады Российской академии наук / Науки о Земле. – 2023. – Т. 513. – № 2. – С. 278–283.

2. Виноград Н.А., Токарев И.В., Строганова Т.А. Особенности формирования подземных вод основных эксплуатируемых водоносных горизонтов Санкт-Петербурга и окрестностей по данным о химическом и изотопном составе // Вестник СПбГУ / Науки о Земле. – 2019. – Т. 64. – Вып. 4. – С. 575–597.

3. Конищев В.Н., Голубев В.Н., Рогов В.В., Сократов С.А., Токарев И.В. Экспериментальное исследование изотопного фракционирования воды в процессе сегрегационного льдообразования // Криосфера Земли. – 2014. – Т. XVIII. – № 3. – С. 3–10.

4. Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Токарев И.В. Реконструкция палеоклимата Российской Арктики в позднем неоплейстоцене–голоцене на основании данных по изотопному составу полигонально-жильных льдов // Криосфера Земли. – 2015. – Т. XIX. – № 2. – С. 98–106.

5. Токарев И.В. Использование изотопных данных (δ2H, δ18O, 234U/238U) при изучении процессов деградации мерзлоты в результате долговременных вариаций климата // Записки горного института / Тематический выпуск «Тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии в современных экономических условиях России». – 2008. – Т. 176. – С. 191–195.

6. Токарев И.В. Неравновесный уран (238U–234U–230Th) как индикатор глобальных климатических вариаций. Крупные водоемы // Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского / Серия «География. Геология». – 2020. – Т. 6(72). – № 3. – С. 402–424.

7. Токарев И.В. Реконструкция условий формирования северодвинского месторождения йодных вод по изотопным данным // Вестник СПбГУ / Серия 7 «Геология и география». – 2012. – Вып. 4. – С. 34–45.

8. Токарев И.В., Бородулина Г.С., Авраменко И.А. Условия формирования железистых минеральных вод по изотопным и гидрохимическим данным (курорт «Марциальные воды», Карелия) // Геохимия. – 2015. – № 1. – С. 88–91.

9. Токарев И.В., Зубков А.А., Румынин В.Г., Поздняков С.П., Поляков В.А., Кузнецов В.Ю. Оценка долгосрочной безопасности захоронения радиоактивных отходов. 1) Палеореконструкция условий формирования подземных вод // Водные ресурсы. – 2009. – Т. 36. – № 2. – С. 219–227.

10. Токарев И.В., Зубков А.А., Румынин В.Г., Поздняков С.П. Оценка долгосрочной безопасности захоронения радиоактивных отходов. 2) Исследование водообмена в многослойной системе изотопными методами // Водные ресурсы. – 2009. – Т. 36. – № 3. – С. 363–374.

11. Токарев И.В., Исаков В.А., Исакова Т.Н. Задачи изотопных методов в структуре геологоразведочных работ на подземные воды // Разведка и охрана недр. – 2022. – № 5. – С. 33–38.

12. Токарев И.В., Исаков В.А., Исакова Т.Н. Использование изотопных методов для оценки условий формирования ресурсов и запасов подземных вод // Разведка и охрана недр. – 2024. – № 1. – С. 74–82.

13. Токарев И.В., Исаков В.А., Исакова Т.Н., Яковлев Е.Ю. Результаты применения изотопных методов при картировании листа Q-39 (Нарьян-Мар) // Разведка и охрана недр. – 2022. – № 9. – С. 25–30.

14. Токарев И.В., Яковлев Е.Ю., Зыков С.Б., Зимина И.А. Неравновесный уран (234U/238U) водных объектов и климатические вариации: Океанический резервуар // Геохимия. – 2021. – Т. 66. – № 9. – С. 857–864.

15. Токарев С.В., Токарев И.В., Амеличев Г.Н. Изучение условий питания водоносных комплексов в неогеновых отложениях Равнинного Крыма с использованием метода стабильных изотопов // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2017. – Т. 3(13). – Вып. 2. – С. 71–77.

16. Шамов В.В., Токарев И.В., Михайлик Т.А., Козачек А.В. Динамика изотопного состава (2H, 18O) вод малых речных бассейнов южного Сихотэ-Алиня в летне-осенний период. Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2022. – Т. 4. – № 2. – С. 202–215.

17. Bantcev D., Ganyushkin D., Terekhov A., Ekaykin A., Tokarev I., Chistyakov K. Isotopic Composition of Glacier Ice and Meltwater in the Arid Parts of the Altai Mountains (Central Asia). Water. 2022, 14, 252. https://doi.org/10.3390/w14020252.

18. Malov A.I., Tokarev I.V. Using stable isotopes to characterize the conditions of groundwater formation on the eastern slope of the Baltic Shield (NW Russia). J. of Hydrology. 2019, 578, 124130 (10 p.).

19. Streletskiy D., Tananaev N., Opel T., Shiklomanov N., Nyland K., Streletskaya I., Tokarev I., Shiklomanov A. Permafrost Hydrology in Changing Climatic Conditions: Seasonal Variability of Stable Isotope Composition in Rivers in Discontinuous Permafrost. Environmental Research Letters. 2015, 10, 095003.

20. Tokarev I.V. Zubkov A.A., Rumynin V.G., Polyakov V.A., Kuznetsov V.Yu., Maksimov F.E. Origin of high 234U/238U ratio in post-permafrost aquifers. Uranium in the Environment (Mining Impact and Consequences). Merkel B.J. and Hasche-Berger A. edit, Springer. 2005. 847–856.

21. Tokarev I.V., Borodulina G.S., Subetto D.A., Voronyuk G.Y., Zobkov M.B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic–White Sea region in the Late Pleistocene-Holocene in groundwater stable isotopes (2H, 18O). Quaternary International. 2019, 524, 76–85. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.022

22. Tokarev I., Poturay V., Yakovlev E. Estimation of the thermal water formation at the Kuldur site (Amur region, Russia) according to water isotope composition (2H, 18O). Environmental Earth Sciences. 2024, 83(126). https://doi.org/10.1007/s12665-024-11422-7.

23. Tokarev I., Yakovlev E. Non-Equilibrium Uranium as an Indicator of Global Climate Variations – The World Ocean and Large Lakes. Water. 2021, 13, 3514. https://doi.org/10.3390/w13243514.

24. Vasil'chuk Y., Chizhova J., Frolova N., Budantseva N., Kireeva M., Oleynikov A., Tokarev I., Rets E., Vasil'chuk A. A variation of stable isotope composition of snow with altitude on the Elbrus Mountain, Central Caucasus. Geography, Environment, Sustainability. 2020, 13(1), 172–182.

25. Yakovlev E., Tokarev I., Orlov A., Zykov S. Assessment of the radiation quality of groundwater with an increased uranium isotope ratio 234U/238U (Pre-Volga region, European Russia). J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2023. https://doi.org/10.1007/s10967-023-09174-y.

26. Yakovlev E., Tokarev I., Zykov S., Iglovsky S., Ivanchenko N. Isotope Signs (234U/238U, 2H, 18O) of Groundwater: An Investigation of the Existence of Paleo-Permafrost in European Russia (Pre-Volga Region). Water. 2021, 13, 1838. https://doi.org/10.3390/w13131838.

VI. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОЛОГИИ

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ЮГО-ЗАПАДНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ОЗ. БАЙКАЛ. ИТОГИ МОНИТОРИНГА

Алексеев С.В., Алексеева Л.П.
Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: salex@crust.irk.ru

Аннотация. В настоящей статье представлены результаты шестилетнего мониторинга качества подземных и поверхностных вод пос. Листвянка с целью определения уровня загрязнения вод, используемых для питьевого водоснабжения. В ходе полевых исследований портативными приборами были измерены температура, pH, Eh и электропроводность воды, уровень воды в колодцах и отобраны пробы воды для полного химического анализа. Анализ макрокомпонентного состава вод выполнен различными методами в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН, микрокомпонентный состав определен методом ICP MS на приборе Element-2 в ИГХ СО РАН; микробиологический анализ проб воды - в ФГБУ «Иркутская межобластная ветеринарная лаборатория»; изотопные характеристики ($\delta^{18}O$ и δD) проб воды получены в ИЗК СО РАН на газовом анализаторе Picarro L2140-i. Результаты свидетельствуют об изменении макрокомпонентного состава вод и неравномерном по площади поступлении поллютантов. Содержание 42-х микрокомпонентов в подземных и речных водах в основном не превышает нормативных требований к питьевой воде; исключение составляют Fe и Mn. По эпидемиологическим показателям 10 водопунктов не соответствуют СанПиН 2.1.4.1074-01. Основными источниками загрязнения подземных вод являются утечки бытовых стоков из септиков многочисленных гостиничных комплексов, расположенных в долинах и по бортам распадков. Интенсивность процессов загрязнения и восстановления природного состояния вод различна.

Ключевые слова: *подземные и речные воды; макро- и микрокомпонентный состав вод; нитраты; микробиологические показатели*

Abstract. The article presents the results of a six-year monitoring of the groundwater and surface waters quality in the Listvyanka settlement. The goal is to determine the level of contamination of water used for drinking water supply. In the field studies, portable devices measured the temperature, pH, Eh, electrical water conductivity and the water level in wells and took water samples for a complete chemical analysis. Analysis of the waters macrocomponent composition was carried out by various methods at the Centre for Geodynamics and Geochronology of the IEC SB RAS; the trace element composition was determined by the ICP MS method on the Element-2 device (Finnigan MAT, Germany) at the IGC SB RAS; microbiological analysis of water samples was performed at the Irkutsk Interregional Veterinary Laboratory; the analysis of isotope characteristics ($\delta^{18}O$ and δD) of water samples was performed in the IEC SB RAS a Picarro L2140-i gas analyzer. The results obtained indicate a change in the waters macrocomponent composition and an uneven supply of pollutants over the area. The content of 42 trace element in groundwater and river waters generally does not exceed the regulatory requirements for drinking water; the exceptions are Fe and Mn. According to epidemiological indicators, 10 water points do not comply with SanPiN 2.1.4.1074-01. The main sources of groundwater pollution are sewage leaks from the septic tanks of numerous hotel complexes located in the valleys and along the sides of the gorges. The intensity of the processes of pollution and restoration of the natural waters state is different.

Key words: *groundwater and river waters, macrocomponents and trace elements of waters, nitrates, microbiological parameters*

В последние годы пос. Листвянка стал самым посещаемым местом на оз. Байкал. Развитие туристской сферы сопровождается масштабным строительством новых и эксплуатацией действующих гостиничных комплексов. При этом существенно изменяются естественные ландшафты, резко ухудшается состояние наземной и подземной гидросферы. В связи с этим оценка техногенного воздействия на экосистему оз. Байкал приобретает особую важность.

Региональные геохимические исследования различных природных сред Байкальского геоэкологического региона с целью выявления влияния экологически значимых химических элементов на окружающую природную среду и здоровье населения проводились, начиная с 1990-х гг. в рамках опытно-производственных,

опытно-методических и научно-исследовательских проектов [1-15]. Однако систематический мониторинг химического состава подземных вод, испытывающих существенную антропогенную нагрузку, отсутствовал.

Оценка санитарно-экологического состояния колодезной воды пос. Листвянка в 2007 г. показала, что бактериологические показатели воды большинства колодцев не отвечали санитарным нормам, однако химический состав воды соответствовал ГОСТу 2874-82 [11]. В связи с этим в 2016-2022 гг. проводилось детальное гидрогеологическое опробование общественных и частных колодцев, скважин, источников подземных вод, р. Крестовки и ручьев Сеннушка, Банный, Большая и Малая Черемшанка и выполнялась оценка качества подземных и поверхностных вод режимной сети водопунктов пос. Листвянка.

Поселок Листвянка расположен в предгорье Приморского хребта, в истоке р. Ангары. Основные формы рельефа – пади, распадки и небольшие водораздельные пространства.

В долинах рек, дренирующих пади и распадки, распространены четыре типа подземных вод – порово-пластовые аллювиальных отложений, поровые элювиально-делювиальных отложений, трещинно-пластовые юрских отложений и трещинные метаморфических и кристаллических пород протерозоя.

Сведения об общем химическом составе подземных и поверхностных вод ранее приведены в работах [16, 17]. Установлено, что подземные воды грунтового водоносного горизонта, вскрытые колодцами в аллювиальных отложениях на глубине 2.40-4.30 м, по химическому составу преимущественно гидрокарбонатные магниево-кальциевые с минерализацией 120-450 мг/дм^3 и величиной pH 6.0–7.7. Качественное состояние подземных вод частных скважин и колодцев в пос. Листвянка, которые используются для питьевого водоснабжения, в целом удовлетворительное, содержание всех компонентов подземных вод в этих водопунктах не превышает ПДК для питьевых вод. Однако в нескольких колодцах и скважинах были выявлены следы хозяйственно-бытового загрязнения подземных вод.

Установлено, что загрязнение водоносного горизонта произошло в результате утечек бытовых стоков из неправильно оборудованных септиков близ расположенных гостиничных комплексов. Состав загрязненных подземных вод изменчив, от гидрокарбонатных магниево-кальциевых до хлоридно-гидрокарбонатных и гидрокарбонатно-хлоридных магниево-кальциевых, сульфатно-гидрокарбонатных натриево-магниево-кальциевых. Величина минерализации, как правило, выше и достигает 733 мг/дм^3.

Шестилетний мониторинг химического состава и концентрации основного загрязнителя подземных вод – нитратов – в выявленных водопунктах свидетельствует о незначительном изменении макрокомпонентного состава вод, об устойчивом нитратном загрязнении грунтовых вод большинства обследованных колодцев, а также о неравномерном по площади поступлении поллютантов, при этом интенсивность процессов загрязнения и восстановления природного состояния вод различна.

Минерализация подземных вод в период наблюдения изменялась в небольшом диапазоне - 100-200 мг/дм^3, не превышая ПДК для питьевых вод (1000 мг/дм^3). Рост минерализации воды происходил в основном в результате увеличения концентрации нитратов, а при восстановлении содержания азотных компонентов соленость воды понижалась.

Характерный процесс восстановления качества подземных вод зафиксирован в пади Березовой. Концентрация нитратов в подземных водах колодцев на ул. Партизанской (точка 65) постепенно снижалась на протяжении всего периода наблюдений с превышающих в 2.5-3 раза ПДК значений (111-128 мг/дм^3) до значений ниже ПДК (31-44 мг/дм^3). При снижении концентраций нитратов фиксировалось уменьшение минерализации воды с 361-370 до 252-291 мг/дм^3 (рис. 1). В целом эту

ситуацию можно охарактеризовать как постепенный процесс самоочищения подземных вод. Подобная ситуация наблюдалась и в колодцах пади Крестовая на ул. Горной, Куликова, Кузнецова (точки 22, 23, 36), где также происходило снижение концентрации нитратов с 90-122 мг/дм^3 до значений, практически не превышающих нормативные требования (29-48 мг/дм^3). В колодцах пади Малая Черемшанка на ул. Чапаева (точки 5, 9) неудовлетворительное качество воды сохраняется в течение нескольких лет, отмечается даже рост содержания нитратов до 144-160 мг/дм^3, что более чем в 3 раза выше ПДК.

Снижение концентрации нитратов в воде и восстановление качества подземных вод может быть связано как с климатическими условиями, так и с устранением техногенных источников загрязнения. В первом случае основную роль среди климатических факторов играет количество осадков в сезонном цикле, поскольку питание грунтовых вод, залегающих в четвертичных отложениях, осуществляется преимущественно за счет атмосферных осадков.

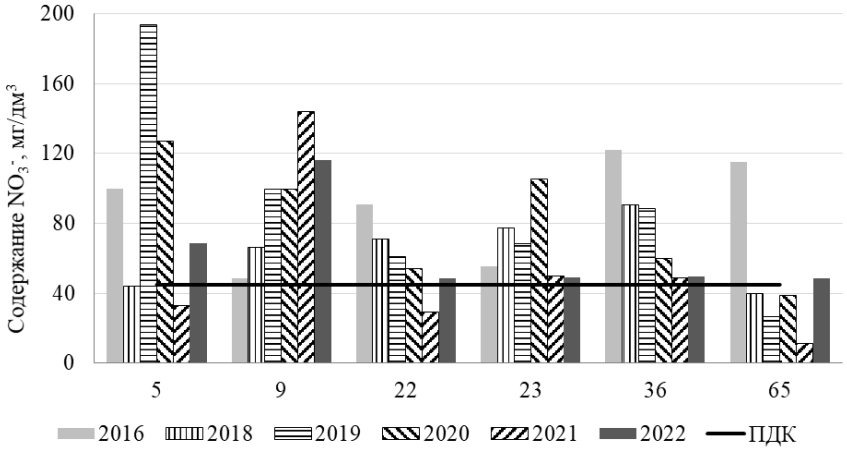


Рис. 1. Динамика содержания нитратов в подземных водах (некотрые колодцы пос. Листвянка). ПДК нитратов в питьевой воде – 45 мг/дм^3.

Климат в пос. Листвянка умеренно холодный, средняя годовая температура составляет +1.7 °С. В зимний период выпадает гораздо меньше осадков, чем летом. Среднегодовая норма осадков - 613 мм. Большая часть осадков выпадает в июле, в среднем 120 мм. Однако в последние годы наблюдался рост количества атмосферных осадков в регионе, что приводило к повышенному питанию грунтового водоносного горизонта и поднятию зеркала грунтовых вод. Одновременно в нескольких колодцах зафиксировано уменьшение концентрации нитратов в воде до уровня ПДК или даже ниже. В колодце на ул. Чапаева при низком уровне воды содержание NO_3^- возросло в 2021 г., что свидетельствует о наличии источника загрязнения, вероятно, техногенного происхождения.

Результаты анализов подземных вод 2022 г. показали наличие солей аммония в водах пяти водопунктов, причем в двухчастных колодцах содержание NH_4^+ составляет 5.50 (ул. Горького) и 12.50 (ул. Судзиловского) мг/дм^3, т.е. превышает ПДК (2 мг/дм^3) в 2.75 и 6.25 раз соответственно. Такое высокое содержание аммония в воде связано с применением химических реагентов (на основе азотных соединений) в подворьях частного сектора для обеззараживания выгребных ям и септиков. Вода из этих колодцев используется населением в качестве технической.

Важной составляющей комплексных исследований процессов формирования химического состава природных вод является исследование содержания и распределения микрокомпонентов, что в целом позволяет получить общее представление о поведении элементов и особенностях их накопления в водах. На приведенной диаграмме (рис. 2)

можно проследить синхронное изменение концентрации микрокомпонентов в подземных и поверхностных водах поселка, что свидетельствует о единстве водоносной системы и хорошей гидравлической связи грунтового водоносного горизонта с речными водами р. Крестовки.

Однако для подземных вод в двух водопунктах выявлено повышенное относительно среднего содержание Zn (на диаграмме – в овалах) в 5 раз в общественном колодце на ул. Чапаева (точка 9), в 10 раз и Cu в 11 раз в домашнем колодце на ул. Партизанской (точка 66). Более того, в общественном колодце на ул. Гудина (точка 57) зафиксировано содержание Mn и Fe, превышающее ПДК для питьевых вод более чем в 3 и 2 раза соответственно. Локализация загрязнения вод этими микрокомпонентами в нескольких водопунктах поселка может свидетельствовать о точечном попадании в подземные воды хозяйственно-бытовых стоков или остатков комплексных хелатных удобрений, включающих несколько микроэлементов (Mn, Zn, Cu и т.п.) и активно применяющихся на приусадебных участках.

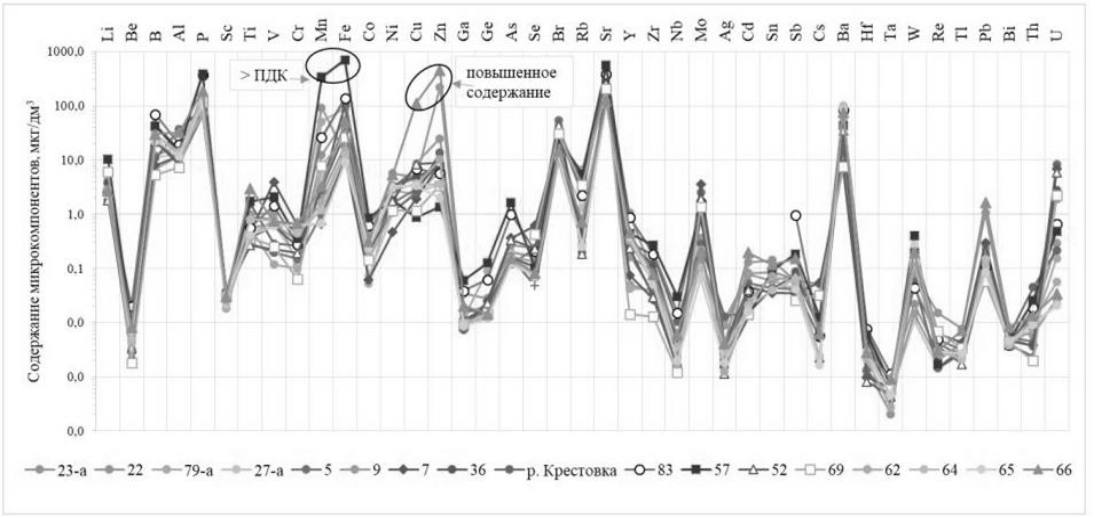


Рис. 2. Log-распределение микрокомпонентов в подземных водах пос. Листвянка и водах р. Крестовка. В условных обозначениях – номера опробованных водопунктов.

Субаквальная разгрузка загрязненных грунтовых вод в озеро Байкал могла быть одной из причин крупномасштабной скрытой эвтрофикации мелководной и заплесковой зон и заражения акватории озера спирогирой (разновидностью нитчатых водорослей). Кроме того, безопасность подземных вод при использовании для питьевого водоснабжения в эпидемиологическом отношении определяется соответствием их состава нормативам по микробиологическим показателям.

Общее микробное число (ОМЧ) отражает общее количество микроорганизмов с анаэробными и аэробными свойствами в 1 мл воды, которые образуются за сутки при температуре 37 °С, в питательной среде. Высокая ОМЧ является индикатором загрязнения органическими соединениями (например, содержащимися в фекалиях) и различными формами азота. Этот показатель в питьевой воде пос. Листвянка коррелирует с высоким содержанием нитратов в воде опробованных водопунктах. Значения ОМЧ во всех пробах воды из домашних колодцев и скважины водопроводной сети гостиницы «Крестовая падь» не превышают ПДК (не более 100 КОЕ/1 мл). В общественных колодцах общая микробная численность бактерий в ходе анализа демонстрирует уверенный рост.

Общее микробное число (ОМЧ) отражает общее количество микроорганизмов с анаэробными и аэробными свойствами в 1 мл воды, которые образуются за сутки при температуре 37 °С, в питательной среде. Высокая ОМЧ является индикатором

загрязнения органическими соединениями (например, содержащихся в фекалиях) и различными формами азота. Этот показатель в питьевой воде пос. Листвянка коррелирует с высоким содержанием нитратов в воде опробованных водопунктах. Значения ОМЧ во всех пробах воды из домашних колодцев и скважины водопроводной сети гостиницы «Крестовая падь» не превышают ПДК (не более 100 КОЕ/1 мл). В общественных колодцах общая микробная численность бактерий в ходе анализа демонстрирует уверенный рост.

ТКБ (термотолерантные колиформные бактерии) – группа колиформных организмов, индикатор загрязнения продуктами жизнедеятельности. Они быстро обнаруживаются, поэтому служат для оценки эффективности очистки воды от фекальных бактерий. Группа ОКБ (общие колиформные бактерии) включает большое число свободноживущих сапрофитов, поэтому присутствие в питьевой воде ОКБ сигнализирует о вероятности загрязнения воды сточными водами.

Результаты определения показателей ОКБ и ТКБ в воде опробованных колодцев свидетельствуют об обнаружении этих патогенов в водопунктах на улицах Горной, Чапаева, Партизанская и Куликова. Во всех этих колодцах выявлено содержание нитратов, превышающее ПДК.

Таким образом, в пределах пос. Листвянка наблюдается устойчивое загрязнение грунтовых вод главным образом нитратами и редко аммонийными солями. Степень загрязнения зависит как от человеческого фактора (техногенное и сельскохозяйственное загрязнение), так и от климатических условий (количества атмосферных осадков). Микробиологические исследования питьевых вод источников нецентрализованного водоснабжения показали несоответствие качества исследованных вод в пяти водопунктах (общественных колодцах) поселка санитарным нормам и требованиям по эпидемиологическим показателям.

Список литературы

1. Шенькман Б.М. Фоновые загрязнения подземных вод в Приангарье и Прибайкалье / Б.М. Шенькман // Геохимия техногенных процессов. – М.: Наука, 1990. – С. 155–175.

2. Коваль П.В. Изотопный состав углерода почв и донных осадков речных долин Прибайкалья / П.В. Коваль, Н.А. Китаев, Д.Ф. Вильямс и др. // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34, № 10–11. – С. 217–225.

3. Коваль П.В. Многоцелевое геохимическое картирование масштаба 1:1000 000 (МГХК-1000) – основа фундаментальных и прикладных региональных геохимических работ (Байкальский геоэкологический полигон) / П.В. Коваль, М.И. Кузьмин // Тезисы докладов IV Объединенного международного симпозиума по проблемам прикладной геохимии. Иркутск: ЛИСНА, 1994. – Т. 2. – С. 117–118.

4. Пампура В.Д. Геохимия и формирование изотопного состава урана и тория в поверхностных водах бассейна оз. Байкал / В.Д. Пампура, И.В. Сандимиров, И.С. Ломоносов и др. // Геохимия. – 1995. – № 12. – С. 1800–1812.4.

5. Китаев Н.А. Распределение и соотношение концентраций золота в породах, почвах, донных осадках Прибайкалья / Н.А. Китаев, В.И. Гребенщикова, В.А. Романов и др. // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39, № 4. – С. 457–468.5.

6. Галазий Г.И. Сульфаты – индикатор сточных вод БЦБК в водах Байкала // ЭКВАТЭК-2000: IV Международный конгресс «Вода и технология» / Г.И. Галазий, Е.Н. Тарасова, И.С. Ломоносов. – М.: Изд-во: ЗАО «Фирма СИБИКО Интернэшнл», 2000. – С. 617–618.6.

7. Коваль П.В. Геохимия окружающей среды Прибайкалья / П.В. Коваль, В.И. Гребенщикова, Н.А. Китаев и др. // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 4. – С. 571–577.7.

8. Шпейзер Г.М. Водно-экологический мониторинг и качество вод р. Ангары // Состояние р. Ангары и пути управления использованием водных ресурсов и их качеством: Мат-лы I научно-методич. семинара (8–9 октября 1998 г., Иркутск) / Г.М. Шпейзер, Л.И. Дедова, В.М. Дюберг и др. – М.: Московский общественный научный фонд, 2000. – С. 49–64.

9. Ломоносов И.С. Региональное эколого-геохимическое картирование поверхностных вод Прибайкалья (на примере фтора, урана) / И.С. Ломоносов, Л.М. Яновский, А.А. Мясников и др. // Прикладная геохимия. – М.: Изд-во Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, 2001. – Вып. 2. – С. 253–268.

10. Коваль П.В. Химический состав поверхностного стока озера Байкал и возможные причины его вариаций / П.В. Коваль, Ю.Н. Удодов, Л.Д. Андрулайтис и др. // Современное состояние поверхностной и подземной гидросферы горных стран. Экосистемы и природные недра горных стран: Мат-лы Первого международного симпозиума. – Новосибирск: Наука, 2004. – С. 198–211.

11. Напрасникова Е.В. Санитарно-экологическая оценка воды колодцев на побережье Байкала (п. Листвянка) / Е.В. Напрасникова, И.Б. Воробьёва, Н.В. Власова и др. // Сибирский медицинский журнал. – 2007. – № 8. – С. 63–65.

12. Гребенщикова В.И. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В.И. Гребенщикова, Э.Е. Лустенберг, Н.А. Китаев и др. – Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2008. – 234 с.

13. Нецветаева О.Г. Особенности химии атмосферных осадков станций Листвянка (Иркутская область) и Приморская (Приморский край) в 2005–2011 гг. / О.Г. Нецветаева, Е.В. Чипанина, В.А. Оболкин и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 6. – С. 466–471.

14. Оболкин В.А. Результаты многолетних исследований кислотных выпадений в районе Южного Байкала / В.А. Оболкин, О.Г. Нецветаева, Л.П. Голобокова и др. // География и природные ресурсы. – 2013. – № 2. – С. 66–73.

15. Чебунина Н.С. Динамика содержания минеральных форм азота в водотоках и атмосферных осадках поселка Листвянка (Южный Байкал) / Н.С. Чебунина, Н.А. Онищук, О.Г. Нецветаева и др. // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2018. – Т. 24. – С. 124–139.

16. Алексеев С.В. Гидрогеологические условия пос. Листвянка / С.В. Алексеев, Л.П. Алексеева, В.Р. Алексеев и др. // География и природные ресурсы. – 2016. – № 6. – С. 32–36.

17. Алексеева Л.П. Качество подземных и поверхностных вод пади Крестовая (пос. Листвянка) / Л.П. Алексеева, С.В. Алексеев, П.А. Шолохов и др. // География и природные ресурсы. – 2016. –№ 6. – С. 37–42.

ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМЕ ВОДА-ПОРОДА (НА ПРИМЕРЕ ДОЛИНЫ РЕКИ ИНЯ, ЮГ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Вакуленко Л.Г.[1], Максимова А.А.[1,2], Николенко О.Д.[1]
[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск,
[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск,
rock.nastaya64@gmail.com

Аннотация. В работе рассматриваются особенности водовмещающих отложений в долине р. Иня, которые представлены верхнедевонской юргинской свитой, где преобладают глинистые сланцы. Был проведен анализ спектров РЗЭ, нормированных на хондрит, чтобы определить источники сноса. Установлено преобладание в областях питания кислых магматических пород, с некоторой долей основных. Значения цериевой аномалии указывает на окраинно-континентальные обстановки. Распределение химических элементов в воде показало, что таковые наследуют состав вмещающих пород. Это выражается в схожих экстремумах практически всех химических элементов как в воде, так и в породе, а также в их редкоземельном составе.

Ключевые слова: *юргинская свита, верхний девон, глинистые сланцы, РЗЭ, Западная Сибирь.*

Abstract. The paper examines the features of water-bearing sediments in the Inya River valley, which are represented by the Upper Devonian yurginskaya formation, where clayey shales predominate. An analysis of chondrite-normalized REE spectra was performed to determine the sources of the drift. The predominance of acidic igneous rocks in the feeding areas has been established, with a certain proportion of basic rocks. The values of the cerium anomaly indicate a continental-margin setting. The distribution of chemical elements in water showed that they inherit the composition of the host rocks. This is expressed in similar extremes of almost all chemical elements both in water and in rock, as well as in their rare earth composition.

Key words: *yurginskaya formation, Upper Devonian, clayey shales, REE, West Siberia.*

В науках о Земле существует огромная проблема, связанная с процессами взаимодействия в системе вода – порода. Долгое время вода изучалась гидрогеологами и гидрогеохимиками, а вмещающие породы – литологами и минералогами. Поэтому сформировался разрыв в понимании многих аспектов взаимодействия в этой системе и главное – в геологических результатах такого взаимодействия, что не позволяло полноценно решать многие вопросы гидрогеохимии, геохимии, минералогии, литологии, рудообразования и т.д. При изучении этой системы воды исследуются, как наиболее динамичный компонент, участвующий во всех геохимических процессах и несущий информацию о всех изменениях, происходящих в ней. Представленное исследование продолжает цикл работ [1-5], посвященных изучению особенностей геохимии и механизмов формирования состава природных вод Новосибирской области (НСО). Территорией изучения является долина реки Иня, воды отобраны из водозаборных скважин (7 проб) Новосибирского района НСО и источников (10 проб), породы – из обнажений, находящихся в непосредственной близости от мест отбора проб (рис. 1 а).

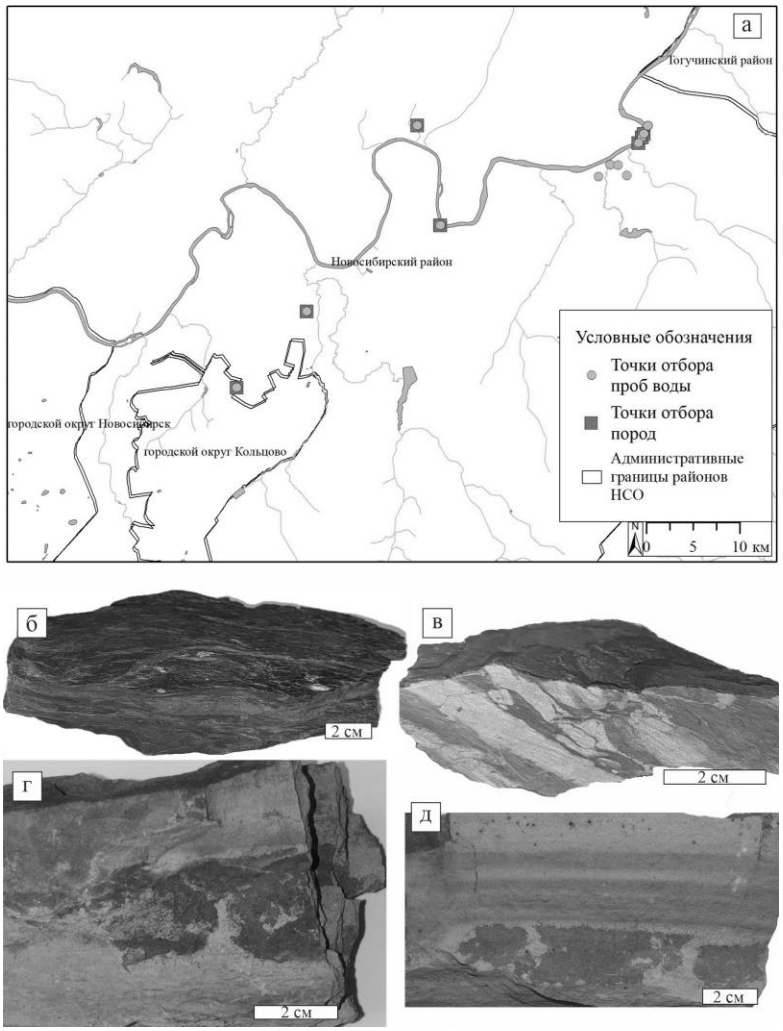


Рис. 1. Местоположение отбора проб (а), верхнедевонские глинистые сланцы долины р. Иня (б-д)

На месте отбора проб проводилось определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2 и HCO_3^- на приборной базе мультипараметрового измерителя pH/ОВП/проводимости Hanna HI98195, который оснащен платиновым датчиком для измерения окислительно-восстановительного потенциала и эталоном с двойным

соединением серебро/хлорид серебра с гелеобразным электролитом, и оксиметра Hanna HI98198. Последующее определение химического состава вод проводилось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Точность используемых в анализе методов находится в диапазоне от 8 до 26 % и зависит от минерализации вод и содержания в них компонентов. Название химического типа воды дано в соответствии с формулой М.Г. Курлова (более 10 %-экв) по оттеночному принципу от меньшего к большему. Выполнены комплексные исследования водовмещающих пород с применением методов поляризационной и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным спектрометром, рентгеноструктурного, ИСП-МС.

В работе рассматриваются особенности водовмещающих отложений в долине р. Иня, представленные верхнедевонской (фаменской) юргинской свитой. В составе свиты преобладают глинистые сланцы. Они изучены в береговых выходах вдоль реки и в шламе нескольких скважин. Преобладающие сланцы темно-серые, до черных, глинистые, в разной степени обогащенные примесью алевритового, песчано-алевритового (от первых % до 15 %) и углеродистого материала, тонкоплитчатые, иногда листоватые (рис. 1б). Отмечены также участки переслаивания темного глинистого и тонких пологоволнистых слойков, и линз (от 0,5-1 мм до 5-7 мм) более светлого алевритового материала (рис. 1 в). Хорошо выражена сланцеватость, которая совпадает со слоистостью и плитчатостью. Участками слоистость расположена под углом к сланцеватости и плитчатости (рис. 1 в). Породы в основном слабо известковистые, иногда известковые, с содержанием тонко-микрокристаллического кальцита до 35-40 %. Присутствует рассеянный тонкокристаллический пирит. Вдоль плоскостей скола отмечаются зеркала скольжения, пятнистая обохренность. Характерно проявление нескольких систем трещин, субвертикальных и крутонаклонных, часто взаимно перпендикулярных. Стенки трещин ровные, с корочками белого и кремового кальцита, сгустками бурых оксидов-гидрооксидов железа. В разрезе отмечаются маломощные прожилки жильного кварца (до 2,5 см), располагающиеся под разными углами к слоистости. По результатам рентгеноструктурного анализа в составе глинистого вещества сланцев установлены: хорошо окристаллизованная диоктаэдрическая слюда 2М1 мусковитового типа, вероятно, иногда с парагонитом (15-45 % валовой пробы), и Mg, реже Fe-Mg хлорит (5-25 %). Значительную долю составляет кварц (20-35 %) и полевые шпаты (10-25 %). В качестве незначительных примесей отмечаются сидерит, пирит, пирротин, псиломелан, гранат, амфибол, цеолит (филлипсит), псевдорутил. Среди терригенной примеси постоянно встречается циркон, обогащенный различными микроэлементами. Вторая разновидность водовмещающих глинистых сланцев имеет довольно однородный облик, серовато-желтый цвет, в основном мелкоплитчатые. Слабо проявлена редкая слоистость, сланцеватость перпендикулярна ей (рис. 1 г). Вдоль поверхностей плиток отмечаются темные налеты, мелкие пятна/сгустки черных гидроксидов Mn, которые развиваются также и вдоль секущих трещинок. Основная часть пород тонкодисперсная, глинистая, с различной примесью алевритового материала, вплоть до перехода в сланцеватые глинистые крупно-мелкозернистые алевролиты. Встречается рассеянные кубики пирита (доли мм до 0,5 мм), замещенные оксидами-гидроксидами Fe, окруженные «железистыми рубашками». Послойно наблюдается незначительная концентрация таких включений (рис. 1 д).

Для изученных сланцев были получены результаты ИСП-МС анализа микроэлементного состава 11 проб. Большая часть значений содержания РЗЭ и некоторых малых элементов (Rb, Sr, Zr, Nb, Cs, Ba, Hf, Ta, Th, U) в исследованных пробах по сравнению со средним содержанием в верхней части земной коры [6] показало их сопоставимость. Такие элементы, как Sr, Zr, Ba показывают флуктуации как в сторону положительного, так и в сторону отрицательного отклонения, а значение Ce почти во всех пробах меньше значений в верхней части земной коры. Для образца выветрелого сланца

(81 б) характерно существенное снижение (в 3-5 раз) содержания многих элементов, свидетельствующее об активном проявлении процессов выщелачивания на отдельных участках разреза. Сумма РЗЭ в изученных пробах варьирует от 117,67 до 180,80 г/т, снижаясь до 44,65 г/т в обр. 81 б. Анализ спектров РЗЭ, нормированных на хондрит, используют при реконструкции состава пород источников сноса Величина дифференциации легких и тяжелых РЗЭ служит мерой соотношения в петрофонде кислых и основных пород. Значения отношения (La/Yb)N <4 и пологий характер кривых РЗЭ ((Gd/Yb)N до 1,5) позволяют предполагать существенную роль в источниках сноса магматических пород основного состава. При значении (La/Yb)N>8 предполагается преобладание в источниках сноса пород кислого состава. Для изученных сланцев значения отношения (La/Yb)N варьируют от 6 до 10, при этом для пород Инских источников они несколько понижены (6-7). Характерен крутой наклон кривых РЗЭ, со значениями (Gd/Yb)N - 1,7-2,0, и более пологий (1,1-1,6) для образцов Инских источников. Все это указывает на преобладание в областях питания кислых магматических пород, вероятно, с некоторой долей основных. Отметим, что значение (Gd/Yb)N свидетельствует о степени деплетированности тяжелых РЗЭ. Более заметное деплетирование характерно для пород обн. 601 (1,8-2,0). Наличие отрицательной Eu-аномалии типично для кислых магматических пород — Eu/Eu* < 0,85, в то время как в базальтоидах Eu/Eu* > 0,85—0,90 [7]. Европиевая аномалия во всех образцах, изученных сланцев, варьирует в пределах 0,56-0,68. Для определения примеси эксгаляционного материала в породах использовано отношение Ce/La [8]. Его значения, превышающие 2, указывают на преимущественно гидрогенную природу изученных пород, где этот показатель варьирует от 2,05-2,25. Лишь в обр. 81 б оно снижается до 1,81. Об отсутствии гидротермального материала свидетельствует также показатель Zr/Hf<50. В изученных породах его значение варьирует от 34 до 44, лишь в одном образце достигая 50. Значение цериевой аномалии 0,9-1,04, в соответствие с представлениями Р.В. Мюррея с соавторами, отвечает окраинно-континентальным обстановкам, характеризующимся отсутствием заметного влияния металлоносных эманаций из срединно-океанических хребтов.

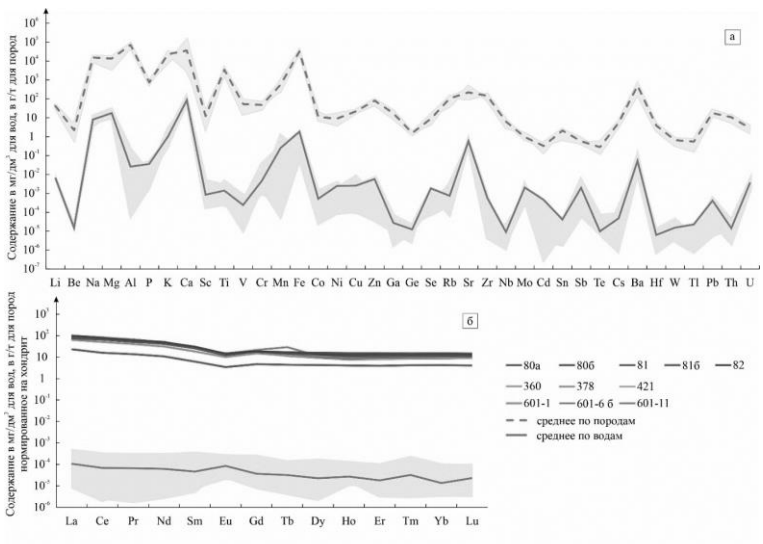


Рис. 2. Микрокомпонентный (а) и редкоземельный (б) состав природных вод и пород долины реки Иня.

Изученные воды характеризуются в основном HCO3 Mg-Ca составом с величиной общей минерализации 339 – 649 мг/дм3. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с Eh + 22 – +214 мВ, pH 7,1 – 8,3 и содержанием растворенного кислорода 3,65 – 10,72 мг/дм^3. Сопоставляя данные по

микрокомпонентному составу воды и породы стоит отметить максимумы у Al, Mn, Zr, Sn и Th в породах, и минимумы этих же элементов в водах (рис. 2 а), что свидетельствует о их не мобильности в растворе. В изученных породах выявлены минимумы у селена и урана, но в воде – максимумы, что указывает на мобильность данных элементов. Для того, чтобы понять распределение элементов в системе вода-порода были выбраны мобильные в растворе химические элементы, такие как Rb, Sr, Ba и U. Их мобильность определяется ионным потенциалом Картледжа, по которому можно судить о подвижности элементов, а также способности образовывать ионы и мигрировать в водных растворах. Так были построены зависимости выбранных элементов в породе и в воде. В результате установлена слабая и средняя связи между Rb (r = -0,4), Sr (r = 0,6), Ba (r = -0,4) и U (r = -0,5) в воде и в породе.

На присутствие в водах редкоземельных элементов указывает наличие в них иттрия, так как последний является химическим аналогом лантана. Одной из главных причин изучения РЗЭ в водах является использование их в качестве чувствительных маркеров процессов взаимодействия в системе вода–порода. Так, спектры редкоземельных элементов изученных вод долины реки Иня пологие с легким наклоном в сторону тяжелых РЗЭ (рис. 2 а). Сумма легких РЗЭ изменяется от 0,003 до 0,7 мкг/дм^3, а тяжелых от 0,0004 до 0,18 мкг/дм^3. Установлена положительная корреляция Ce и Lu с водородным показателем pH, которая составляет 0,6 и 0,5 соответственно и указывает на их среднюю взаимосвязь. С остальными РЗЭ отмечается слабая связь коэффициент корреляции варьирует от 0,1 до 0,4. Такая зависимость может указывать на поступление РЗЭ в воды из вмещающих пород. Стоит отметить отрицательную слабую корреляцию иттрия в породах и водах (r = -0,4).

Таким образом, воды наследуют состав вмещающих пород. Это выражается в схожих экстремумах практически всех химических элементов как в воде, так и в породе, а также в их редкоземельном составе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Список литературы

1. Novikov D.A. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.A. Maximova, A.S. Derkachyov, A.V. Chernykh // Geochemistry. – 2023. – V. 83. – Iss. 4. – Article 126016.

2. Novikov D.A. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, F.F. Dultsev, A.F. Sukhorukova, A.A. Maksimova, A.V. Chernykh, A.S. Derkachyov // Groundwater for Sustainable Development. – 2021. – V. 15. – Pp.1-8.

3. Novikov D.A. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, Yu.G. Kopylova, A.N. Pyryaev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachev, A.F. Sukhorukova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh, A.A. Khvashchevskaya, P.N. Kalinkin, A.V. Petrozhitsky // Groundwater for Sustainable Development. – 2023. – V. 20. – Pp.1-11.

4. Новиков Д.А. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод "Инские источники" (юг Западной Сибири) / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, Л.Г. Вакуленко, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С.135-145.

5. Новиков Д.А. Об открытии слаборадоновых вод - Инские источники / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, А.Ф. Сухорукова, Л.Г. Вакуленко, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, А.Н. Фаге, А.А. Хващевская, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, М.С. Мельгунов, П.Н. Калинкин, С.А. Растигеев // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 12. – С.1714-1732.

6. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. - Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 382 с.

7. Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust: Its composition and evolution. – Blackwell, Oxford, 1985. – 312 p.

8. Стрекопытов С.В., Дубинин А.В., Волков И.И. Общие закономерности поведения редкоземельных элементов в пелагических осадках Тихого океана // Литология и полезные ископаемые. – 1999. – No 2. – С. 133–145.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕНЕЗА НА ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕРРИТОРИИ САМОТЛОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НЕФТИ

Вашурина М.В. [1], Храмцова А.Л.[1], Русакова. Ю.О.[1], Васильев Ю.В.[1]
MVashurina@tmnig.ru, rusakova@tmnig.ru.
[1]*Западно-Сибирский филиал института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Тюмень. MVashurina@tmnig.ru*

Аннотация. На основании анализа результатов шестнадцатилетнего цикла мониторинга на территории Самотлорского нефтяного месторождения, отмечено изменение химического состава подземных вод олигоценовых отложений. Области увеличения сухого остатка подземных вод в центральной части территории и уменьшения – в юго-восточной территориально близки к зонам максимальных амплитуд колебания земной поверхности, зафиксированных в пунктах геодинамического полигона геодезических и гравиметрических наблюдений, что позволяет предположить взаимосвязь геодинамических и гидрохимических параметров. Сделан вывод, что влияние геодинамических смещений земной поверхности может приводить к деформации обсадных колонн глубоких эксплуатационных скважин и перетоку высокоминерализованных вод глубоких горизонтов в горизонты пресных вод. Результаты работы имеют экологическую направленность и свидетельствуют и высокой степени антропогенного воздействия, связанной с интенсивным недропользованием.

Ключевые слова: *Самотлорское нефтяное месторождение, мониторинг, пресные подземные воды сухой остаток, показатель, геодинамические колебания, мульда, техногенез.*

Abstract. Based on the analysis of the results of a sixteen-year monitoring cycle on the territory of the Samotlor oil field, the change in the chemical composition of groundwater in Oligocene deposits was noted. The areas of increase in the dry residue of groundwater in the central part of the territory and decrease in the southeastern part are territorially close to the zones of maximum amplitudes of the earth's surface oscillations, recorded at the points of the geodynamic polygon of geodetic and gravimetric observations, which suggests the relationship between geodynamic and hydrochemical parameters. It is concluded that the influence of geodynamic displacements of the earth's surface can lead to deformation of the casing strings of deep production wells and the flow of highly mineralized waters of deep horizons into fresh water horizons. The results of the work have an environmental focus and also indicate a high degree of anthropogenic impact associated with intensive subsoil use.

Key words: *Samotlor oil field, monitoring, fresh groundwater, dry residue, indicator, geodynamic fluctuations, trough, technogenesis.*

Самотлорское месторождение нефти является одним из крупнейших в Западной Сибири, введено в эксплуатацию более пятидесяти лет назад. Его территория характеризуется высокой степенью антропогенного воздействия, связанной с интенсивным недропользованием (нефтедобыча, отбор подземной воды, закачка подтоварных и сточных вод). Всего за годы эксплуатации месторождения на нём пробурено более 20 тысяч скважин. К настоящему времени суммарное количество добытой из недр жидкости составило здесь порядка 12 млрд тонн, в том числе суммарное количество добытой нефти порядка 2,8 млрд тонн. При этом в систему поддержания пластового давления (ППД) закачано около 13 млрд м^3 рабочего агента (подземных, поверхностных и сточных вод).

Весь период освоения нефтяного месторождения сопряжен со значительной техногенной нагрузкой на почвенный покров, водотоки, водоемы и недра земли, включая пресные подземные воды (ППВ), добыча которых в основном ведется для целей питьевого водоснабжения. С точки зрения охраны ППВ от загрязнения важнейшей эколого-гидрогеологической задачей является изучение гидрохимического режима ППВ в процессе их эксплуатации.

Разработанные в результате многолетних исследований общие принципы и методика проведения наблюдений за гидрохимическим режимом подземных вод как в естественных, так и в нарушенных эксплуатацией условиях были успешно применены при изучении ППВ в пределах территории Западной Сибири, включая Самотлорское

месторождение нефти [1, 2, 3]. Обобщение накопленной информации, полученной по результатам региональных гидрогеологических исследований, позволило выполнить полный анализ условий залегания, распространения, формирования химического состава ППВ.

Изменение химического состава пресных подземных вод в результате влияния существующего техногенеза непосредственно на территории Самотлорского месторождения нефти изучается с 2006 года по данным ежегодных систематических наблюдений, проводимых на локальных водозаборных участках [4, 5]. Раннее (с 2002 года) здесь же создан геодинамический полигон для наблюдения за современными геодинамическими процессами природно-техногенного генезиса (мульдообразование), имеющих место в пределах месторождения [6] и оказывающих при этом воздействие на почвенный покров, водотоки, водоемы и недра земли. Комплекс накопленной информации по результатам проведения многолетних (2006-2021 гг) мониторинговых наблюдений в водозаборных скважинах Самотлорского месторождения нефти послужил исходным материалом по изучению изменения химического состава пресных подземных в многолетнем разрезе.

Основные ресурсы и запасы ППВ сосредоточены в олигоценовом атлым-новомихайловском водоносном горизонте (далее целевой ВГ), являющемся объектом исследований данной работы. Продуктивные интервалы находятся на глубине 70-180 м и приурочены к спокойно-залегающим песчаным коллекторам относительно выдержанной мощности. Горизонтально-слоистое строение разреза, наличие в кровле водоносного горизонта глинистых слоев, обеспечивает напорный характер его режима в естественных условиях и достаточную защищенность от загрязнения подземных вод с поверхности. Нижним водоупором служат глины тавдинского горизонта эоцена, которые, наряду с глинисто-кремнистыми осадками нижнего палеогена и мела, отделяют продуктивные водоносные пласты от залегающих ниже водоносных горизонтов и комплексов с минерализованными хлоридными натриевыми водами.

Формирование естественных ресурсов целевого ВГ происходит за счет нисходящего движения подземных вод в многопластовой рыхлообломочной системе верхней зоны артезианского бассейна на водораздельных пространствах и восходящего – в крупных эрозионных врезах [2]. Благодаря такой гидродинамике, существующей на исследуемой площади уже длительный период геологической истории, химический облик подземных вод формируется, в основном, под влиянием литогенных факторов. Плоский равнинный рельеф, высокая плотность гидрографической сети, широкое развитие болот, слабая дренированность территории, превышение осадков над испарением, избыточная обводненность (подтапливаемость) территории формируют определенный химический облик подземных вод. Здесь выделены в основном пресные (до 1000 мг/дм^3) гидрокарбонатные подземные воды смешанного катионного состава, чаще магниево-кальциевые от очень мягких до жестких с нейтральной реакцией среды [4].

Методика проведенных исследований включала сбор, систематизацию, обработку исходных данных, анализ изменения значений показателей во времени и пространстве, поиск тенденций и закономерностей отмеченных изменений.

Исходными данными для обработки являются результаты химических анализов проб воды целевого ВГ, выполненных в пределах центральной части Самотлорского месторождения нефти за 16-летний период мониторинговых исследований (2006-2021 гг.).

Систематизация данных заключалась в упорядочивании их по периоду (году) отбора, определение (нахождение) в многолетнем разрезе сопоставимых точек отбора проб, отбраковке анализов, в которых определен сокращенный перечень компонентов, не включающий основные сведения о химическом составе подземных вод целевого ВГ.

Основным показателем для анализа изменения химического состава подземных вод на изучаемой территории, выбрана величина сухого остатка, т.к. ее значение является суммой содержания химических элементов в подземных водах. Для каждой точки в рассматриваемый год определялось среднее значение сухого остатка. На участках его максимальных изменений также проанализирован основной состав воды, определенный по преобладающим (более 20% мг-экв) анионам и катионам, согласно формуле солевого состава М.Г. Курлова [7].

Обработка исходных данных показателя сухого остатка проведена с использованием метода математической статистики, который включал расчет минимальных, максимальных, средних значений, выбор интервалов группирования значений, стандартного отклонения, коэффициента вариации. Наряду с этим использовались специальные гидрогеологические методы обработки исходных данных, заключающиеся в определении типа вод, построении диаграмм и карт временного и площадного распределения показателей.

Кроме того, для сопоставления пространственного распределения величины изменения сухого остатка с вертикальными движениями земной поверхности, в качестве исходных данных привлечены результаты мониторинга в пунктах Самотлорского геодинамического полигона, включающего в себя геодезические и гравиметрические исследования [8]. Данные представлены картой-схемой итоговых изменений вертикальных движений земной поверхности за период 2006-2021 гг.

В результате систематизации и обработки данных получена представительная выборка из 1795 анализов проб воды, отобранных в 17 сопоставимых для каждого периода точках наблюдений. Анализ распределения сухого остатка в подземных водах целевого водоносного горизонта по всем наблюдаемым точкам в течении шестнадцати лет наблюдений позволил отметить значительную неоднородность показателя (коэффициент вариации изменяется от 16 до 89%). Более широкий диапазон отмечен для его максимальных значений (454,5-2735,0 мг/дм^3). Периоды с наибольшими максимальными значениями (1843,0–2735,0 мг/дм^3) соответствуют наибольшим коэффициентам вариации (60-89%). Более узким диапазоном представлены минимальные (97,2-211,5 мг/дм^3) и средние (305,5-494,1 мг/дм^3) значения данного показателя.

Анализа изменения величины сухого остатка в современном периоде (2021 г) по отношению к первоначальному (2006 г), выполненный для каждой точки наблюдения, показал изменения как в сторону увеличения данного показателя, так и в сторону его уменьшения. Динамика преобладающих в химическом составе воды анионов и катионов в многолетнем разрезе в точке наблюдения с максимальным увеличением сухого остатка (ДНС-26) характеризуется увеличением содержания в воде хлора до 90% (2020 г), уменьшением при этом гидрокарбоната до 10%, увеличением натрия до 35% (2019 г) и уменьшением при этом магния до 10% (рис.1). В результате, в данной точке тип воды по химическому составу изменился по отношению к первоначальному гидрокарбонатному магниево-кальциевому (2006 г) на хлоридно-гидрокарбонатный натриево-кальциевый (2019-2021 гг). В то же время, анионно-катионный состав воды в точке наблюдения ДНС-39 постоянен в многолетнем разрезе и характеризует тип воды на протяжение всего периода как гидрокарбонатный магниево-кальциевый.

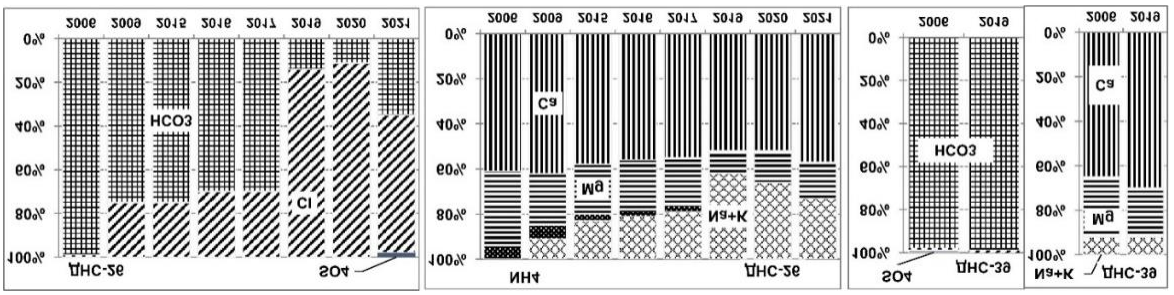


Рис. 1. Динамика основного анионно-катионного состава воды по точкам наблюдений ДНС-26 и ДНС-39 за период 2006-2021гг.

По площади исследования изменение в сторону увеличения сухого остатка характерно для ее центральной части, где отмечено максимальное увеличение на 580 мг/дм^3. Изменение в сторону уменьшения данного показателя проявляется в юго-восточной части территории, при максимальной величине на 113,6 мг/дм^3 (рис. 2).

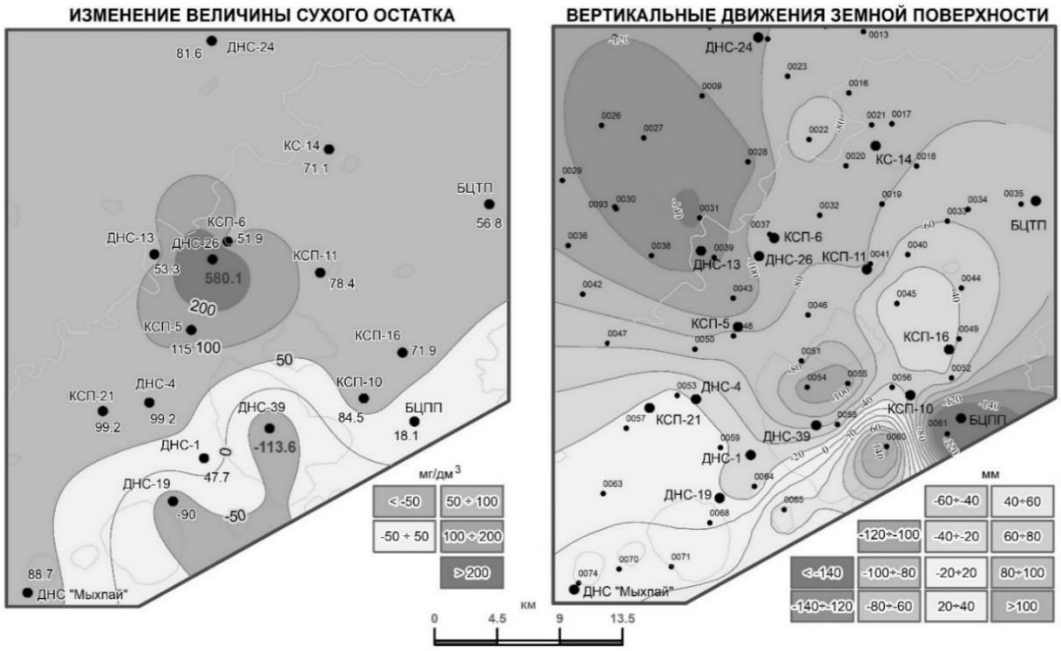


Рис. 2. Пространственное распределение изменения сухого остатка и вертикальных движений земной поверхности за период 2006-2021 гг.

В результате сопоставления пространственного распределения величины изменения сухого остатка и вертикальных движений земной поверхности, установленных по данным мониторинга на геодинамическом полигоне [6, 8], отмечено сходство распространения их областей, которое прослеживается в направлении с северо-запада на юго-восток (рис. 2).

Область изменения величины сухого остатка в сторону уменьшения (на <- 50 мг/дм^3) сопоставима с областью вертикальных движений земной поверхности в положительную сторону (более 100 мм). В орогидрографическом отношении территория выделенной области приурочена к пойменной части долины р. Оби и ее крупного притока р. Вах. Гидрогеологические условия характеризуются здесь наиболее интенсивным водообменном, так как пойменные отложения в основном представлены песками различной зернистости с хорошими коэффициентами фильтрации. Данные условия, с учетом даже незначительного поднятия дневной поверхности, а также установленного факта повышения за последнее десятилетие среднегодовых величин

атмосферных осадков для района исследований [9], способствуют изменению величины сухого остатка в сторону его уменьшения (опреснение воды).

Область изменения сухого остатка в сторону увеличения (на 100 мг/дм^3 и больше) сопоставима с областью наибольших понижений земной поверхности (мульда оседания от 120 мм) и характеризуется влиянием на химический состав ППВ существующего техногенеза (рис. 2). В орогидрографическом отношении территория выделенной области приурочена к террасовому комплексу р. Оби, ее крупных притоков р. Ватинский Еган и р. Вах. Гидрогеологические условия характеризуются здесь не столь интенсивным водообменном, так как литологический состав отложений надпойменных террас представлен как песчаными разностями (60 % состава), так и глинистыми (40 % состава). Наличие слабопроницаемых глинистых отложений обеспечивает защищенность ППВ целевого ВГ от загрязнения с поверхности. В свою очередь оседания земной поверхности способствует деформации обсадных колонн глубоких эксплуатационных скважин различного назначения (нефтяных, водозаборных, нагнетательных и т.д.), в результате нарушается их герметичность, что создает возможность локального попадания в интервал залегания пресных подземных вод таких техногенных загрязнителей как высокоминерализованные воды, нефтепродукты [10, 11]. В данном случае важно отметить, что инструментом снижения техногенного влияния разработки Самотлорского месторождения нефти должен являться регулярный контроль технического состояния скважин различного назначения, выполняемый службами эксплуатации месторождения и включающий в себя анализ состояния устьев скважин, фильтров и обсадных труб.

Таким образом, результаты проведенных в течение шестнадцати лет наблюдений за гидрохимическим состоянием пресных подземных вод атлым-новомихайловского водоносного горизонта в пределах Самотлорского месторождения нефти позволяют отметить пространственно-временное изменение химического состава вод.

Величина сухого остатка являясь основным показателем химического состава ППВ характеризуется здесь значительной неоднородностью при коэффициенте вариации значений от 16 до 89%, изменение отмечено как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения показателя.

Пространственно область изменения сухого остатка в сторону его уменьшения выделена в юго-восточной части территории и отличается постоянством анионно-катионного состава, на протяжении всего периода воды гидрокарбонатные магниево-кальциевые. Она сопоставима с областью наибольших поднятий земной поверхности и характеризуется возможным влиянием на химический состав ППВ природных факторов (величины атмосферных осадков и интенсивности водообмена в четвертичных отложениях поймы р. Оби и ее притоков).

Пространственно область изменения сухого остатка в сторону увеличения выделена в центральной части территории и отличается изменением типа вод по анионно-катионному составу: от первоначального гидрокарбонатного магниево-кальциевого (2006 г) до хлоридно-гидрокарбонатного натриево-кальциевого (2019-2021 гг). Она сопоставима с областью наибольших понижений земной поверхности и характеризуется возможным влиянием на химический состав ППВ существующего техногенеза (загрязнением высокоминерализованными водами при деформации обсадных колонн глубоких эксплуатационных скважин).

Список литературы

1. Методы охраны подземных вод от истощения и загрязнения / Под ред. И.К. Гавич. М.: Недра. 1985. 231 с.

2. Смоленцев Ю.К., Кусковский В.С. Особенности формирования подземных вод зоны гипергенеза Западно-Сибирской плиты // Труды института геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР: выпуск 683. Подземные воды юга Западной Сибири (формирование и проблемы рационального использования). — Новосибирск: Наука, 1987. С. 3-65.

3. Матусевич В.М., Смоленцев Ю.К. Гидрогеологические структуры Западно-Сибирской плиты //

Пресные и маломинерализованные подземные воды Западной Сибири. Межвузовский сборник научных трудов. – Тюмень, 1989. С. 4-17.

4. Храмцова А.Л., Русакова Ю.О., Вашурина М.В. Условия формирования особенностей гидрохимического облика пресных подземных вод на автономном участке Самотлорского месторождения ХМАО-Югры. // Нефтепромысловое дело. 2016. № 2.С.50-56.

5. Вашурина М.В., Русакова Ю.О., Храмцова А.Л., Тимшанов Р.И. Изучение закономерностей формирования химического состава подземных вод атлым-новомихайловского водоносного горизонта в условиях разработки центральной части Самотлорского месторождения нефти методом главных компонент. // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2022. №3. С.66-72.

6. Васильев Ю.В., Радченко А.В., Юрьев М.Л. Техногенное влияние добычи углеводородов на формирование мульды оседания земной поверхности Самотлорского месторождения. // Маркшейдерия и недропользование. 2013. № 5. С.63-66.

7. ОСТ 41-05-263-86. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. — М., 1986.

8. Васильев Ю.В., Яковлев С.И., Филатов А.В., Погодин П.В. Результаты мониторинга деформационных процессов методами высокоточной геодезии, гравиметрии, радарной интерферометрии на Самотлорском геодинамическом полигоне. // Маркшейдерский вестник. 2015. №4. С. 38-44.

9. Вашурина М.В., Русакова Ю.О., Храмцова А.Л. Макрокомпонентный состав пресных подземных вод в естественном и нарушенном состоянии в пределах территории Широтного Приобья. // Нефтепромысловое дело. 2021. №6. С.29-36.

10. Федоров Л.В. Анализ нарушений герметичности эксплуатационных колонн в скважинах // Интенсификация геологоразведочных работ и добычи нефти в Западной Сибири. Труды ЗапСибНИГНИ. – Тюмень, 1984. С. 28-30.

11. Вашурина М.В., Русакова Ю.О., Храмцова А.Л. Прогноз состояния пресных подземных вод в условиях интенсивного нефтяного освоения Западной Сибири. // Известия вузов. Нефть и газ. 2018. № 3. С. 7-13.

ТОКСИЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В КОНДЕНСАЦИОННОЙ ВЛАГЕ НА ТЕРРИТОРИИ ДЖИДИНСКОГО ГОКА И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ РЕКИ МЫРГЕНШЕНО

Гарипова Е.Р., Плюснин А.М, Украинцев А.В., Чернявский М.К.
Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН (Россия).
670047, Улан-Удэ, ул.Сахьяновой, д. 6а, garipova1987@mail.ru, plyusnin@ginst.ru, ukraintsev87@bk.ru, mitchel1977@mail.ru

Аннотация. В настоящей статье приведены экспериментальные исследования содержания токсичных элементов в конденсационной влаге, образующейся от отходов добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд с использованием разработанной установки для сбора аэрозолей над поверхностью песков. Установлено, что из толщи песков к поверхности вместе с парами воды перемещаются токсичные компоненты. В составе сконденсированной над песками влаги установлены высокие содержания бериллия, алюминия, железа, меди, цинка, ртути, свинца. Эти элементы формируют ореол загрязнения атмосферы над техногенными песками и далее воздушными потоками рассеиваются на окружающей территории. В приводораздельной части водосбора реки Мыргеншено установлены высокие концентрации бериллия, алюминия, марганца, железа, меди, цинка, ртути, свинца, это показывает, что поверхностные воды подвержены воздействию техногенных процессов, протекающих на территории Джидинского месторождения.

Ключевые слова: *поверхностные воды, конденсат, отходы добычи, токсичные элементы, лантаноиды.*

Abstract. In this paper presents experimental studies of the content of toxic elements in condensation moisture generated from waste from the mining and processing of tungsten-molybdenum ores using a developed installation for collecting aerosols above the surface of sands. It has been established that toxic components move

from the thickness of the sand to the surface along with water vapor. The moisture condensed over the sand contains high levels of beryllium, aluminum, iron, copper, zinc, mercury, and lead. These elements form a halo of air pollution over technogenic sands and are then dispersed by air currents into the surrounding area. In the watershed part of the Myrgensheno River catchment area, high concentrations of beryllium, aluminum, manganese, iron, copper, zinc, mercury, and lead have been established, this shows that surface waters are exposed to the influence of technogenic processes occurring in the territory of the Dzhida deposit.

Key words: *surface water, condensate, mining waste, toxic elements, lanthanides.*

Горнодобывающие предприятия оставляют за собой не только огромные площади, занятые твердыми отходами, но и рудничные воды, изливающиеся из заброшенных разведочных штолен, сточные воды от обогатительных фабрик, загрязненные грунтовые воды. Десятки миллионов тонн техногенных песков в течение длительного времени накапливают в себе продукты разрушения рудной минерализации. При длительном хранении в толще песков накапливаются тонкодисперсные частицы, образующиеся в результате разрушения породообразующих минералов, на поверхности которых сорбируются различные токсичные химические элементы [1].

Попадая в окружающую среду, токсичные химические элементы при длительных воздействиях на живые организмы вызывают в них патологические изменения, часто приводящие к нарушению естественного течения природных процессов, или целый ряд заболеваний у населения, изменяют структуру биоценозов и становятся причиной их деградации. [2].

Данная статья направлена на определение токсичных элементов в конденсационной влаге, отобранной на территории Джидинского ГОКа и в поверхностных водах реки Мыргеншено, площадь водосбора которой приходится на район Джижинских месторождений.

Разработка вольфрамомолибденового месторождения, велась вначале с использованием штолен, а затем с помощью двух карьеров. Руда перемещалась к обогатительной фабрике по канатной дороге. На фабрике руда измельчалась, из нее извлекался флотационно-гравитационным методом молибденовый и вольфрамовый концентрат. Все другие рудные компоненты, представленные пиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, флюоритом, вместе с вмещающими породами перемещались в хранилище. Отходы переработки залегают в виде песчаных залежей мощностью 5-10 м, которые открыты для проникновения газов и влаги из атмосферы. Под воздействием кислорода, воды и других агентов выветривания они интенсивно разрушаются. За длительный период хранения поровые воды техногенных песков стали кислыми. Отходы добычи складированы в приводораздельной части водосбора рек Мыргеншено, Модонкуль.[3]

Исследования проводились на территории Джидинского ГОКа в период с 10.08.2023 по 16.08.2023. Для определения токсичных элементов, содержащихся в конденсационной влаге, отобраны 22 пробы, кроме этого, были отобраны три пробы воды из реки Мэргеншино. Схема опробования приведена на (рис. 1).

Опробование конденсата проводилось: около штольни «Западная» и в непосредственной близости к отвалам отходов добычи. Для сбора конденсационной влаги использовалась установка, которая представляет собой корпус, состоящий из четырёх гибких пластиковых пластин, герметично соединенных между собой в замкнутый контур посредством резьбовых соединений из неметаллических материалов. На корпус сверху натягивается пленочный прозрачный водонепроницаемый материал и фиксируется резиновым жгутом. В центр на пленочный материал помещается груз массой 200-300 грамм, не имеющий острых граней. В центре под пленкой устанавливался сборник конденсата. Площадь поверхности, с которой производится сбор конденсата, составляет 1 м^2. Сборник конденсата устанавливался вечером и снимается утром. Накопившаяся конденсационная влага сливалась в пластиковую посуду, затем

фильтровалась через мембранный фильтр с размером пор 0,45 мкм и готовилась для проведения химического анализа.

Отбор проб воды из реки Мыргеншено проводился по трем точкам: до впадения в реку Гуджирка (Z31), после впадения в реку Гуджирку (Z21) и на расстояние 1,5 км до впадения в реку Джида (Z 32). Отбор проб воды для определения микроэлементов отбирали одноразовыми медицинскими шприцами объемом 10 мл в количестве 2 мл, фильтровали через одноразовый полистирольный стерильный шприц-насадки. Фильтрат помещали в предварительно взвешенную полипропиленовую пробирку, содержащую 40 мкл 70% HNO_3.

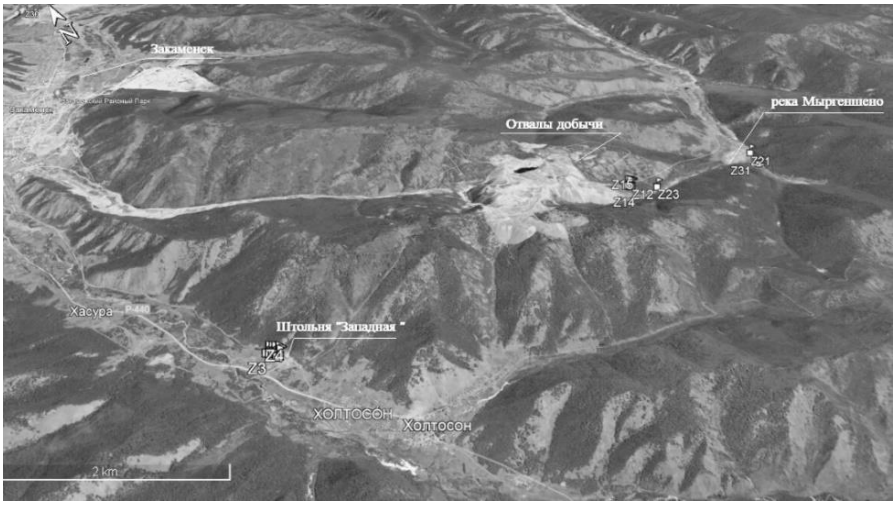


Рис. 1. Спутниковый снимок со схемой отбора проб конденсата и проб воды из р. Мыргеншено.

Анализ микроэлементного состава выполнен методом индуктивно-связанной плазмы на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 ce в Лимнологическом институте СО РАН согласно методике, описанной в [4].

В табл. 1 приведены содержания токсичных элементов в конденсационной влаге и реки Мыргеншено. Представленные значения по конденсационной влаге являются средними арифметическими из девятнадцати проанализированных проб.

По результатам проведенного анализа установлено, что более минерализованная конденсационная влага отобрана в районе штольня «Западная» среднее значение составляет 30 мг/л. На территории, прилегающей к отвалам отходов добычи, среднее значение обшей минерализации, составляет 10,9 мг/л.

В наиболее высоких концентрациях в конденсационной влаге обнаружены такие токсичные элементы как бериллий, алюминий, марганец, железо, медь, цинк, ртуть, свинец. При длительном хранении в толще песков сформировалась кислая среда, в растворе накопились разнообразные продукты разложения сульфидной минерализации и горных пород. Содержание алюминия в конденсате увеличивается вследствие химического выветривания пород в кислой среде [3].

Вода, отобранная в реке Мыргеншено, характеризуется значительной минерализацией, среднее значение которой составляет 1046,67 мг/л, вода имеет кислую реакцию pH после впадения в реку Гуджирка, достигает значения 4,84. В реке Джида после впадения реки Модонкуль вода имеет нейтральную реакцию pH=7,0.

По результатам отобранных проб воды из реки Мыргеншено видно, что поверхностные воды подвержены воздействию техногенных процессов, что проявляется в изменение pH в сторону кислой реакции среды и высоких концентраций токсичных элементов. Наиболее загрязнены поверхностные воды дренирующие отвалы добычи, в пробе Z 21(после впадения в реку Гуджирку) среди элементов, относящихся к первой и

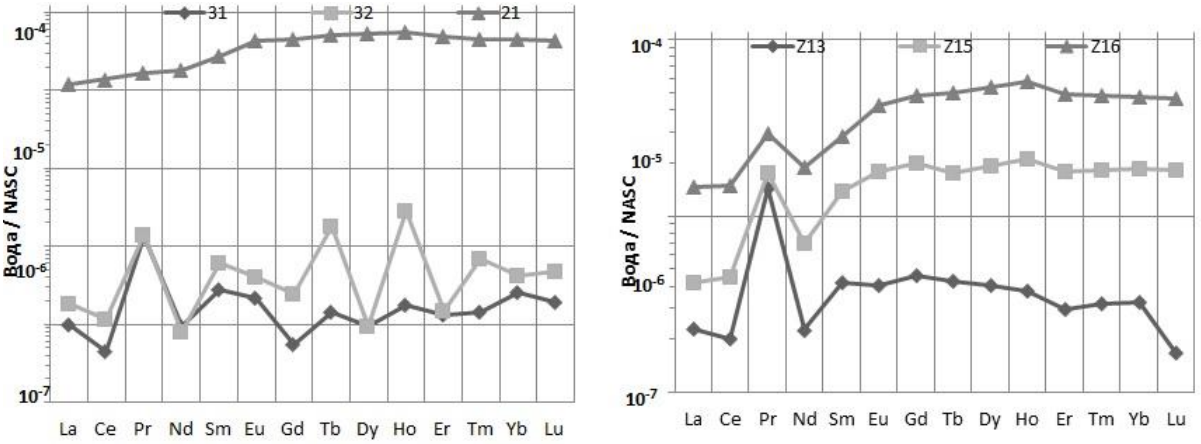
второй группе токсичности в повышенных концентрациях, обнаруживаются бериллий, кадмий, ртуть и свинец содержания, которых превышает ПДК, установленные для водоемов рыбохозяйственного назначения.

Таблица 1. Содержание токсичных элементов в конденсате и поверхностных вод реки Мыргеншено, мкг/л

Э-т	П.О.	Байкал	Конденсат в районе штольня «Западная»*	Конденсат в районе хранения отходов добычи*	Проба Z 31 до впадения в реку Гуджирка	Проба Z 32, 1,5 км до впадения в реку Джида	Проба Z 21 после впадения в реку Гуджирку	ПДК [5]
Be	0,001	0,0014	0,032 – 0,97 0,209	0,015 – 3,1 0,509	0,007	24	129	0,3
Al	0,4	4,6	33 – 360 111,14	15,8 – 4300 802,38	13,2	18600	230000	40
Cr	0,03	1,26	1,1-2 1,58	0,54-1,35 0,99	1,13	0,9	3,4	20
Mn	0,02	0,118	32 – 184 82,714	7,6 – 230 47,04	10,3	2000	13000	10
Fe	1	4,7	6,4 – 99 54,34	3,7 – 172 73,47	50	34	1240	100
Co	0,001	0,05	0,4 – 1,01 0,694	0,123 – 12,8 2,41	0,2	98	680	10
Ni	0,3	0,9	1,65 – 7 3,44	0,72 – 4,5 1,96	1,8	74	370	10
Cu	0,03	1,32	6,4 – 44 16,83	2,6 –360 61	3	680	11100	1
Zn	0,1	16,7	39 – 107 67,43	8,6 – 150 42,23	4,3	1620	10300	10
Cd	0,0007	0,003	0,41 – 1,56 0,77	0,08 – 3,6 0,792	0,042	38	230	5
Sn	0,005	0,015	0,119 – 0,38 0,239	0,028 – 0,26 0,101	0,18	0,048	0,09	0,112
Sb	0,004	0,032	0,17 – 0,36 0,248	0,016 – 0,103 0,038	0,14	0,18	0,13	
Hg	0,02	0,06	0,11 – 0,2 0,16	0,1 – 0,42 0,211	0,11	0,14	0,29	0,01
Pb	0,002	0,078	3,7 – 22 8,77	1,1 – 10,7 5,81	1,14	1,41	6,5	6

Примечание: *В числителе приведены минимальные и максимальные содержания, средние содержания металлов, установленные в конденсационных водах, приведены в знаменателе. *ПО* – предел обнаружения методики анализа. *Байкал* – содержание элементов в стандарте Байкальской воды.

Было определено содержание лантаноидов в пробах конденсата и в пробах воды. На рис. 2 представлены графики распределения лантаноидов, нормированные относительно стандарта NASC. Отдельно приведены графики для проб, поверхностных вод реки Мыргеншено (а) и в непосредственной близости к отвалам отходов добычи (б).



а) б)

Рис. 2. Распределение лантаноидов а) в поверхностных водах реки Мыргеншено, б) в конденсационной влаге, нормированных относительно NASC.

В конденсате обнаружены значительные концентрации редкоземельных элементов. Минимальное содержание суммарной концентрации составляет 0,0749 мкг/л, максимальное содержание – 3,614 мкг/л, среднее содержание лантаноидов в конденсате составляет 0,6667 мкг/л. Наблюдается преобладание легких редкоземельных элементов над тяжелыми, имеется лютециевый минимум и празеодимовый максимум. Высокое содержание празеодима в конденсате, вероятно, связано с тем, что этот элемент слабо сорбируется взвесью. Его сульфатные комплексные соединения хорошо мигрируют в водной и воздушной среде [1].

Суммарное содержание лантаноидов в пробе воды, отобранной до впадения в реку Гуджирка (Z31) составляет 0,246 мкг/л, в пробе, отобранной после впадения реки Гуджирка (Z21) содержание составляет 332,3 мкг/л. Наблюдается преобладание легких редкоземельных элементов над тяжелыми. Высокие концентрации лантаноидов в пробах, возможно в связи с тем, что воды дренирующие отвалы добычи поступают в поверхностные воды. Лантаноиды поступают в поверхностные воды, при окислительном разложении сульфидной минерализации, а также и при взаимодействии кислых вод с породообразующими минералами.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод:

Установленные в конденсате низкие значения pH и высокие содержания токсичных элементов показывают, что токсичные химические элементы попадают в приземную атмосферу вместе с поровыми водами, которые заключены в хранилищах. За счет капиллярных сил поровые воды поднимаются к поверхности, испаряются, и вместе с аэрозолями воды растворенные вещества попадают в атмосферу и далее переносятся воздушными потоками [1]. Содержания РЗЭ в конденсате на территории Джидинского ГОКа связано с процессами окисления остаточной рудной минерализации.

Состояние поверхностных вод реки Мыргеншено изменяется в результате смешивания с рудничными водами в связи, с чем наблюдаются высокие концентрации токсичных элементов и редкоземельных элементов. Очевидно, что природно-техногенная система, сформировавшаяся при разработке месторождения, а также при хранении отходов добычи оказывает негативное влияние на окружающую территорию, в том числе и на поверхностные воды.

Работа выполнена в рамках проекта АААА-А21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока, частично с использованием средств проекта РНФ-313.

Список литературы

1. Воронина Ю. С., Плюснин А. М. Содержание редкоземельных элементов в снежном покрове на территории Джидинского ГОКа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2023, № 2, с. 122-132.

2. Чеснокова С.М. Основы токсикологии и экотоксикологии : учеб. пособие / С. М. Чеснокова, О. В. Савельев ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2019. – 132 с.

3. Плюснин А. М., Воронина Ю.С., Украинцев А. В., Чернявский М.К., Перязева Е.Г., Чебыкин Е.П. Загрязнение атмосферы от хранилищ отходов добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд // Геохимия. – 2023. Т. 68. – № 12. – С. 1295–1311.

4. Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачёв М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20. – № 5. – С. 613-631.

5. Приказ Минсельхоза РФ №552 от 13.12.2016 г. «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохо-зяйственного значения».

КАЧЕСТВО ПИТЬЕВЫХ ВОД В КРЫМСКОМ ПРЕДГОРЬЕ

Каюкова Е.П.
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
e-mail: epkayu@gmail.com

Аннотация. В настоящей статье представлен материал о химическом составе питьевых подземных вод в предгорьях Крыма. В анионном составе вод повсеместно доминируют гидрокарбонаты, в катионном – чаще всего кальций. Вода централизованного водоснабжения соответствует нормам качества по обобщенным показателям и др. (согласно СанПиН 1074-01), исключая барий и железо. Выявлены территории с повышенными ПДК ряда микрокомпонентов (Al, B, Mn, Fe), связанные с притоками подземных вод из области замедленного водообмена. Повышенные концентрации ряда металлов (Cd, Mn, Pb) в хозяйственно-питьевых водах представлены высокотоксичными гидратированными ионами и карбонатными комплексами.

Ключевые слова: *качество питьевых вод, Горный Крым, загрязнение нитратами*

Abstract. This paper presents material on the chemical composition of drinking groundwater in the foothills of Crimea. Hydrocarbonates dominate everywhere in the anionic composition of waters, and calcium most often dominates in the cationic composition. Centralized water supply water meets quality standards for general indicators, etc. (according to SanPiN 1074-01), excluding barium and iron. Areas with increased maximum permissible concentrations for a number of microcomponents (Al, B, Mn, Fe) associated with groundwater inflows from the area of slow water exchange were identified. Increased concentrations of a number of metals (Cd, Mn, Pb) in drinking water are represented by highly toxic hydrated ions and carbonate complexes.

Key words*: quality of drinking water, Mountain Crimea, nitrate pollution*

В Крыму с периодичностью примерно в 4–6 лет чередуются засушливые и водообильные периоды, что отражается на формировании подземного стока. В засушливые периоды население Крыма страдает от нехватки пресной воды, более благоприятны в этом отношении горные районы, но и здесь могут возникать серьезные проблемы с питьевыми водами. Это может быть связано как с естественными условиями, так и с бесхозяйственностью человека. Местное население приспосабливается к природным колебаниям водообеспеченности. Территория Крымского предгорья

характеризуется невысокой антропогенной нагрузкой, которая выражается, главным образом, в сельскохозяйственной деятельности, строительстве гидротехнических сооружений для накопления воды (ставков), которые отчасти нарушают гидрологический и гидрогеологический режимы территории.

Исследования проводились в пределах Второй гряды Крымских гор в бассейне реки Бодрак. Среднегодовая температура здесь около 11,6°С В настоящее время наблюдается тенденция повышения температуры (0,37°/10 лет). Отрицательные аномалии среднемесячных температур воздуха связаны с периодами господства северо-восточных ветров.

Согласно гидрогеологической стратификации выделяются следующие зоны и водоносные горизонты (рис. 1): Четвертичный водоносный горизонт (Q); Лютецкий водоносный горизонт (Pg_{2lt}); Датский водоносный горизонт (Pg_{1d}); Готеривский водоносный горизонт ($K_{1(v-h)}$); водоносная зона карадагской серии (J_{2b}). Невыветрелые отложения карадагской и таврической серий образуют региональный водоупор.

Подземные воды, развитые на исследуемой территории, в основном относятся к зоне активного водообмена. Трещинно-жильные воды карадагской вулкано-осадочной толщи (из области замедленного водообмена) выявлены на севере села Трудолюбовка. Грунтовые воды бассейна реки Бодрак формируются за счет атмосферных осадков (685 мм – среднее количество осадков на водосборе реки), а также транзитных вод и конденсации. Преобладающими ионами всех природных вод являются преимущественно HCO_3^-, Ca^{2+}.

Установлена естественная ассоциация химических элементов в подземных водах: Ba (2,0-58,2) - B (1,1-10,3) - Ag (3,2-8,6) - Sr (1,6 -8,4) - Sn (3,4-4,9).

На рис. 1 представлен химический состав подземных вод из различных гидрогеологических подразделений.



Элемент мг/л мг-экв/л (кол-во проб)	Область активного водообмена					Замедленн. водообмен
	T_3–J_1 tv	T_3–J_1 es	J_2b	K_1	P_2	
Na^+ (>1000)	48,6 / 2,1	117,5 / 5,1	50,3 / 2,2	12,7 / 0,55	32,0 / 1,4	700,0 / 30,4
K^+ (300)	19,8 / 0,5	10,7 / 0,27	3,2 / 0,08	2,4 / 0,06	5,6 / 0,14	8,0 / 0,2
Ca^{2+} (>1000)	115,9 / 5,8	49,0 / 2,45	99,9 / 5,0	87,4 / 4,37	106,8 / 5,34	47,2 / 2,36
Mg^{2+} (300)	31,5 / 2,6	115,0 / 9,46	45,6 / 3,75	6,9 / 0,57	23,0 / 1,89	9,7 / 0,8
Cl^- (>1000)	39,1 / 1,1	67,1 / 1,89	47,9 / 1,35	19,7 / 0,55	46,2 / 1,3	887,5 / 25,0
SO_4^{2-} (>1000)	138,4 / 2,9	60,0 / 1,25	53,7 / 1,12	26,8 / 0,56	80,0 / 1,67	250,0 / 5,21
HCO_3^- (>1000)	416,8 / 6,8	756,4 / 12,4	449,8 / 7,37	319,7 / 5,24	353,8 / 5,8	219,6 / 3,6
Мин-я, г/л	0,91	1,20	0,92	0,50	0,75	2,15
$CO_{2св.}$ (агр.)	2,5	63,8	20,6	34,3	16,3	1,2

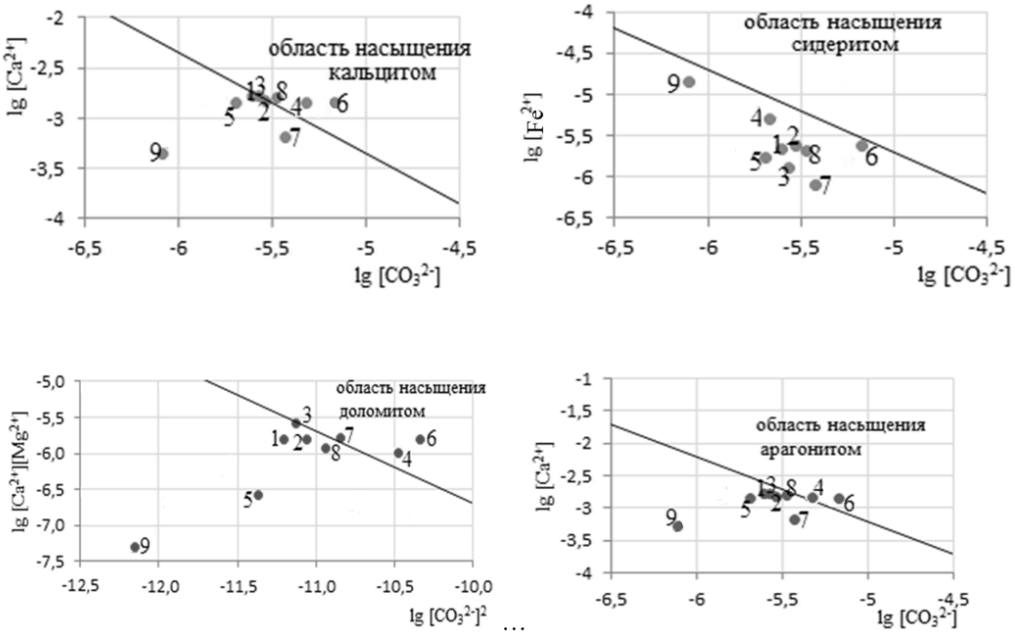
Рис. 1. Химический состав подземных вод различных гидрогеологических подразделений

Летом местное население испытывает серьезные проблемы как с количеством, так и с качеством пресных вод. Вода из частных скважин по ряду параметров (жесткость, минерализация) зачастую не соответствует стандартам качества питьевой воды по СанПиН 1.2.3685-21.

С помощью комплекса PHREEQC Interactive 2.15.0 изучены формы миграции химических элементов и рассчитан баланс карбонатных и сульфатных минералов подземных вод. Большинство изученных вод находятся в равновесии с кальцитом и доломитом (рис. 2).

Централизованные водозаборы обычно строятся у реки, чтобы использовать подрусловые воды. Так устроены водокачки д. Трудолюбовки и п. Скалистое. Жители п. Прохладное получают воду за счет источника Вербочки, расположенного в

Московском овраге. Химическому составу воды централизованных водозаборов присущи сезонные колебания. Летние ливни, несущие большое количество взвешенных частиц, приводят к тому, что вода не соответствует санитарным нормативам по цветности, мутности и пр. В бездождевые жаркие периоды возможны несоответствия в эпидемическом отношении (а также по минерализации и жесткости).



1 – Q(в нижнем течении р. Бодрак); **2** – Q(в среднем течении р. Бодрак); **3** – Q (верховья р. Бодрак); **4** – P_2; **5** – K_1; **6** – J_2b; **7** – T_3-J_1es; **8** – T_3-J_1 tv; **9** – область замедленного водообмена

Рис. 2. Равновесие подземных вод с карбонатными минералами при температуре 25ºС

Природной особенностью питьевых вод центрального водоснабжения на территории являются периодические превышения нормативов по барию, ПДК которого 0,7 мг/л (согласно нормативам качества и безопасности воды СанПиН 1.2.3685-21). В отдельные периоды отмечены превышения предельно допустимых концентраций по железу (согласно СанПиН 1.2.3 685-21) с максимальным значением 1,7 мг/л (19.06.2005) что объясняется антропогенным загрязнением. В таблице приведены данные ряда химических элементов в питьевой воде центрального водоснабжения д. Трудолюбовки и отдельно вод, при смешении которых формируются питьевые воды для водоснабжения жителей деревни. В отдельных случаях (при засухе) речную воду также используют в хозяйственно-питьевых целях. В среднем течении р. Бодрак сток обеспечивается главным образом водами Московского оврага (за счет источника Вербочки).

Водозабор д. Трудолюбовки располагается на правом берегу р. Бодрак и представляет собой резервуар (глубиной 4,5 м и площадью 45,5 м^2) в аллювиальных отложениях, куда поступает вода из подруслового потока и родников. Непосредственно рядом с водокачкой в левом борту реки Бодрак располагается Эмиров источник, его минимальный дебит варьирует в пределах от 130 до 150 м^3/сут. Другой источник воды — Ленинградский овраг (в советские времена здесь была обустроена система сбора родникового стока). Количество воды, поступающей в водозабор из этого оврага, не постоянно, что связано не только с климатическими условиями отдельного года, но и с вечными проблемами системы. В июне 2005 г. дебит равнялся 112 м^3/сут., в июле 2010 г. — 79 м^3/сут. Реально воды гораздо больше, очень много ее теряется в самом овраге, устье которого всегда подтоплено. Обычно летом воду качают два раза в сутки в течение 1 часа, именно столько воды вмещает накопительный резервуар водозабора. Расход воды из водозабора Вербочки, обеспечивающего питьевыми водами жителей д. Прохладное и

базу МГУ, составляет в зависимости от количества осадков 250–300 $м^3$/сут. Вода пресная жесткая гидрокарбонатная кальциевая.

Существующее централизованное водоснабжение зачастую неспособно удовлетворить потребности населения, вынуждая людей пользоваться собственными колодцами и скважинами, качество воды в которых даже по основным показателям (жесткость и минерализация) не всегда отвечают санитарным нормам СанПиН 1.2.3685-21. В отдельных пробах есть превышения (до 2–3 ПДК) содержаний Fe, B, Li, Mn, Al, Ag, Ba.

На природные особенности вод в пределах населенных пунктов накладывается антропогенное загрязнение (главным образом, нитратное) в связи незащищенностью подземных вод, отсутствием канализации и пр. Устойчивое нитратное загрязнение характерно преимущественно для вод колодцев населенных пунктов (пос. Скалистое, пос. Прохладное и д. Трудолюбовка). Так, в результате длительного мониторинга подземных вод зоны экзогенной трещиноватости вулканогенно-осадочной толщи выделены области нитратного загрязнения (до 2-4 ПДК) в центре д. Трудолюбовки. Гипсометрически выше этой части деревни располагается свиноферма.

Изучение соотношения форм миграции тяжелых металлов имеет важное значение при оценке качества природных вод, так, по мнению [4], токсичность определяется не общей концентрацией металла в воде, а состоянием, в котором металл обычно мигрирует. Более токсичной является та форма, которая отвечает большей биологической и химической активности металла. Гидратированные (свободные) ионы металлов обладают большей реакционной способностью и, следовательно, более токсичны.

Среди щелочно-земельных металлов только Mg^{2+} и Ca^{2+} широко используются живыми организмами, остальные относятся к токсичным (Sr, Be, Ba). Эти элементы стремятся замещать кальций и магний в организме. Токсичность растворимых в воде веществ пропорциональна их растворимости. Например, растворимые соли бария (особенно $BaCl_2$) очень токсичны, нерастворимый $BaSO_4$ нетоксичен совершенно.

Тяжелые металлы (образованные более массивными атомами), такие как Hg, Pb, Sn, Cd и др. являются токсичными для человека. Установлено, что наибольшей токсичностью обладают их металлорганические соединения (продукты метилирования), образующиеся как биологическим путем с участием определенной группы микроорганизмов, так и вследствие некоторых химических превращений, например, с участием гумусовых веществ, прежде всего фульвокислот. Металлорганические соединения Hg, Pb, Sn обладают даже большей токсичностью, чем их свободные (гидратированные) ионы [4]. Ионы данных металлов токсичны даже в небольших количествах (поскольку связывают белки живых организмов, нарушая их функции).

В результате термодинамического моделирования изучены формы существования химических элементов в подземных водах различных вмещающих отложений. Элементы в химическом составе инфильтрационных вод, циркулирующих в породах разного вещественного состава, различаются как количественно, так и по соотношению миграционных форм (главных анионогенных и катионогенных элементов). Гидрогеохимические условия зоны гипергенеза (pH 7÷7,5; Eh>100, наличие свободного кислорода) определили следующие основные формы существования элементов: свободные анионы (HCO_3^-, NO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}) и свободные катионы (K^+, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Ba^{2+}, Cd^{2+}, Fe^{2+}, Li^+, Mn^{2+}, Sr^{2+}, Zn^{2+}), катионные гидрокарбонатные комплексы ($CaHCO_3^+$, $MgHCO_3^+$, $CdHCO_3^+$, $FeHCO_3^+$, $MnHCO_3^+$, $PbHCO_3^+$, $SrHCO_3^+$, $ZnHCO_3^+$), катионные гидроксидные комплексы ($Al(OH)^{2+}$, $Ba(OH)^+$, $Fe(OH)^{2+}$), фосфатные анионные комплексы ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{-2}**),** нейтральные карбонатные комплексы ($MnCO_3$, $PbCO_3$, $ZnCO_3$), нейтральные сульфатные комплексы ($CaSO_4$, $BaSO_4$, $MgSO_4$), нейтральные фосфатные ($MgHPO_4$, $CaHPO_4$), нейтральные гидроксидные комплексы ($Al(OH)_3$, $Cu(OH)_2$, $Fe(OH)_3$).

Таблица. Качество питьевых вод, используемых в централизованном водоснабжении (ПДК согласно СанПиН 1.2.3685-21 в *мг/л*)

Хим. элемент	Водозабор д.Трудолюбовки	Родник Эмиров	Система Ленинградского оврага	Источник Вербочки	Водозабор д.Скалистое	ПДК	ЛПВ	Класс опасн.
Na	15,2	16,1	9,7	13,5	23,0	200	с.-т.	2
K	1,2	1,0	0,7	1,7	6,2			
Ca	27,5	36,5	27,8	100,0	79,0			
Mg	16,8	14,6	11,7	6,5	17,0	50	орг.	3
HCO_3	362,3	390,4	341,6	345,3	317,2			
SO_4	72,0	10,2	2,9	33,6	115,2	500	орг. прив к.	4
Cl	22,1	20,2	17,8	21,3	35,4	350	орг. прив к.	4
Al	0,007	0,0029	0,00473	0,09	0,15	0,2	с.-т.	3
As	0,0003	-	-	0,0002	0,0003	0,01	с.-т.	1
B	0,079	-	-	0,06	0,09	0,5	с.-т.	2
Ba	0,25	0,258	0,496	0,6	0,58	0,7	с.-т.	2
Co	0,000084	0,000088	0,000081	0,0001	0,0002	0,1	с.-т.	2
Cr	0,012	0,0148	0,0116	0,002	0,0028	0,05	с.-т.	2
Cu	0,00075	0,00068	0,00124	0,005	0,005	1	с.-т.	3
Fe	0,169	0,197	0,163	0,087	0,22	0,3	орг.	3
Hg	0,000031	0,000015	0,00025	н.о.	н.о.	0,0005	с.-т.	1
Mn	0,00011	0,00023	0,00018	0,0033	0,005	0,1	орг.	3
Mo	0,00036	0,00039	0,00043	0,00029	0,00096	0,07	с.-т.	3
Nb	0,000016	0,00004	0,000017	н.о.	н.о.	0,01	с.-т.	2
Ni	0,00183	0,00242	0,00177	0,0017	0,0021	0,02	с.-т.	2
Pb	0,00001	<	<	0,0023	0,001	0,01	с.-т.	2
Sb	0,00014	0,00011	0,00016	0,000255	0,00039	0,005	с.-т.	2
Si	2,13	2,14	2,59	5,3	5,6	20	с.-т.	2
Sr	0,897	0,854	1,24	0,988	0,81	7	с.-т.	2
Te	0,000047	0,000023	0,000049	н.о.	н.о.	0,01	с.-т.	2
Ti	0,0342	0,0438	0,0287	0,0023	0,0026	0,1	орг.	3
Tl	<	0,000002	0,000001	<	<	0,0001	с.-т.	1
U	0,00042	0,00038	0,0003	0,0012	0,0012	0,015	с.-т.	1
V	0,00068	0,00066	0,00106	0,0008	0,1	0,1	с.-т.	3
W	0,00086	0,00208	0,00124	н.о.	н.о.	0,05	с.-т.	2
Zn	0,00049	0,00062	0,00129	0,0145	0,02	5	с.-т.	3
***Ж**	6,7	6,0	5,6	6,0	5,5	7		
М-я	573,2	551,4	481,9	529,9	522,9	1000		

< – меньше предела обнаружения; *Ж – жесткость воды в *мг-экв./л*

Повышенные концентрации ряда металлов (Cd, Mn, Pb) в химическом составе подземных вод района, используемых в хозяйственно-питьевых целях, представлены высокотоксичными гидратированными (свободными) ионами и карбонатными комплексами. Барий примерно на 90% мигрирует в виде катионов Ba^{2+}, которые являются

токсичным веществом; миграционные формы Al и Fe не токсичны; нитрат-анион высокотоксичен; бор представлен токсичной кислотой H_3BO_3.

В подземных водах северо-западной части д. Трудолюбовки на участке с притоками солоноватых хлоридно-натриевых вод из области замедленного водообмена выявлены повышенные ПДК (относительно СанПиН 1074-01) ряда микрокомпонентов: Al, B, Mn, Fe.

Список литературы

1. Каюкова Е. П., Филимонова Е. А. Качество пресных подземных вод Горного Крыма (долина р. Бодрак) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2022. – № 1. – С. 79-88.

2. Каюкова Е.П., Харитонова Н. А., Филимонова Е. А., Чарыкова М. В. Формирование химического и изотопного состава поверхностных вод открытых водоемов бассейна реки Бодрак (северо-западный склон Крымских гор) // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49, № 4. – С. 492-505.

3. Каюкова Е.П., Юровский Ю.Г., Устюгов Д.Л., Гребнева А.В. Пресные воды Крыма / Геология и недропользование. – 2021. – № 1. – С. 92-103.

4. Линник П.Н., Васильчук Т.А. и др. Сосуществующие формы тяжелых металлов в поверхностных водах Украины и роль органических веществ в их миграции. Методы и объекты химического анализа. – 2007. – Т. 2, – № 2. – С. 130–145.

5. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115. Дата обращения: 15.11.2023.

МИГРАЦИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В КАРСТОВЫХ РАЙОНАХ ПРИКАМЬЯ

Копанцева Е. Н., Килин Ю. А.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, elena.korotaeva.88@mail.ru, yuakilin@mail.ru

Аннотация Проблема миграции нефтяного загрязнения является актуальной для карстовых районов Прикамья. В настоящее время на рассматриваемой территории открыто более 230 месторождений нефти и газа, в эксплуатации находится около 155, половина из которых разрабатывается более 30 лет. На длительно разрабатываемых нефтяных месторождениях, вблизи земной поверхности, в карстовых массивах наблюдается формирование техногенных скоплений жидких и газообразных углеводородов.

Кафедра динамической геологии и гидрогеологии наблюдает за миграцией нефтяного загрязнения в карстовых районах на протяжении длительного периода. В 2018 и 2023 гг. на исследуемой территории было отобрано более 80 проб природных вод, в 30 % которых обнаружено нефтяное загрязнение.

В данной статье приводятся данные по миграции нефтепродуктов с образованием линзы нефтепродуктов в карстовой ловушке в районе Полазненского месторождения нефти, транзите нефтепродуктов подземными водами на территории Иренского карстового района.

***Ключевые слова**: нефтяное загрязнение, карст, нефтеловушка.*

Abstract. The problem of migration of oil pollution is relevant for the karst areas of the Kama region. Currently, more than 230 oil and gas fields have been discovered in the territory under consideration, about 155 are in operation, half of which have been developed for more than 30 years. The formation of man-made accumulations of liquid and gaseous hydrocarbons is observed in long-term oil fields, near the Earth's surface, in karst massifs. The Department of Dynamic Geology and Hydrogeology has been monitoring the migration of oil pollution in karst areas for a long period. In 2018 and 2023, more than 80 samples of natural waters were taken in the study area, in 30% of which oil pollution was detected. This article provides data on the migration of petroleum products with the formation of a lens of petroleum products in a karst trap in the area of the Porozensky oil field, the transit of petroleum products by groundwater in the territory of the Irensky karst region.

***Key words**: oil pollution, karst, oil trap.*

Изучению миграции нефтяного загрязнения посвящены работы В.М. Шестакова (2001), Б.В. Боревского (1997), наиболее полно зональность загрязнения в грунтах зоны аэрации отмечается в работах В.М. Гольдберга, который выделил восемь зон. В карстовых районах Прикамья, приуроченных к восточной части Восточно-Европейской платформы и Предуральского краевого прогиба, открыто более 200 месторождений нефти. Миграция нефтяного загрязнения в карстовых массивах имеет свои особенности и отличается от других некарстовых районах.

В основу работы положены материалы ежегодных научных экспедиций сотрудников и студентов кафедры динамической геологии и гидрогеологии геологического факультета ПГНИУ. Исследования природных вод проводились в аккредитованной Лаборатории гидрохимического анализа геологического факультета ПГНИУ.

Цель работы – выявление нефтяного загрязнения и особенности его миграции в карстовом районе бассейна р. Ирень.

Площадь Пермского края составляет 160600 км². Месторождения нефти в отложениях перми, карбона, девона являются составной частью Волго-Уральской нефтяной области. Первое месторождение нефти открыто в 1929 г. в Верхне-Чусовских городках. Начиная с 1934 г. разведка и добыча нефти получила большие масштабы. Пробурены десятки тысяч скважин. С 1934 по 1938 гг. открыты Краснокамское, Северокамское и Полазненское месторождения и целый ряд месторождений на юге, в центральной части и севере края.

На значительной части территории выходят на поверхность или залегают неглубоко карстующиеся породы: карбонатные породы (известняки, мергели, доломиты), сульфатные породы (гипсы, ангидриты), соли (каменная и калийные соли). Площадь карстующихся пород составляет более 45 тыс. км^2 или 28,6% ее территории. Площадь нефтяных месторождений в пределах горных отводов в карстовых районах - около 3000 км² [2]. В настоящей статье рассмотрены отдельные районы Прикамья.

Карстующиеся породы, слагающие карстовые массивы в пределах Пермского края имеют значительную мощность и закарстованы на большую глубину. В пределах карстовых массивов развиты поверхностные и подземные карстовые формы: воронки различного генезиса, котловины, карстовые депрессии, карстовые рвы, пещеры, полости. Карстовые формы являются каналами для движения подземных и поверхностных вод, которые подвержены интенсивному загрязнению.

При разработке нефтяных месторождений наблюдается загрязнение пресных поверхностных и подземных вод нефтепродуктами. Причинами поступления загрязняющих веществ в подземные водоносные горизонты и поверхностные водоемы является: инфильтрация из буровых отстойников через стенки и дно, с действующих промышленных площадок, подъем минерализованных и загрязненных вод снизу по некачественному зацементированному заколонному пространству скважин, аварии на нефтепроводах, водоводах.

Ореолы нефтяного загрязнения могут прослеживаться на расстоянии нескольких километров по потоку трещинно-карстовых вод характерного для зоны горизонтального стока. Подземный поток в карстовом массиве имеет свою специфику, так как приурочен к закарстованным линейным зонам стока. При этом карстовые массивы являются своеобразными ловушками для нефтяного загрязнения, так как нефтепродукты аккумулируются в карстовых кавернах, трещинах, полостях.

Если очаг загрязнения находится на поверхности, то под очагом загрязнения в зоне вертикальной нисходящей инфильтрации формируются линзы из нефтепродуктов значительной мощности и объемов. Нефтяное загрязнение накапливается в карстовых пустотах, кавернах над горизонтом трещинно-карстовых вод или над слабозакарстованными (плохо проницаемыми) породами. Вынос и транзит нефтяного загрязнения из карстовых ловушек в основном происходит при интенсивных дождевых

осадках и таянии снега. Направление транзита совпадает с потоком подземных вод и зависит от геолого-литологических, гидродинамических и иных факторов.

Примером ловушки нефтяного загрязнения является линза нефтепродуктов, сформированная на участке разработки Полазненского месторождения нефти. На рассматриваемом участке закарстованный карбонатно-гипсовый массив (до 30% пустотности) является хорошим коллектором для нефти и имеет тесную гидравлическую связь с Камским водохранилищем. Здесь сформировалась линза из нефтепродуктов на поверхности трещинно-карстовых вод мощностью 2-3 м объемом 370 тыс. м^3, разгрузка загрязненных вод происходит в Камское водохранилище. В результате битумизации рыхлых береговых отложений и подпора подземных вод водохранилищем создалась своеобразная гидродинамическая ловушка [2].

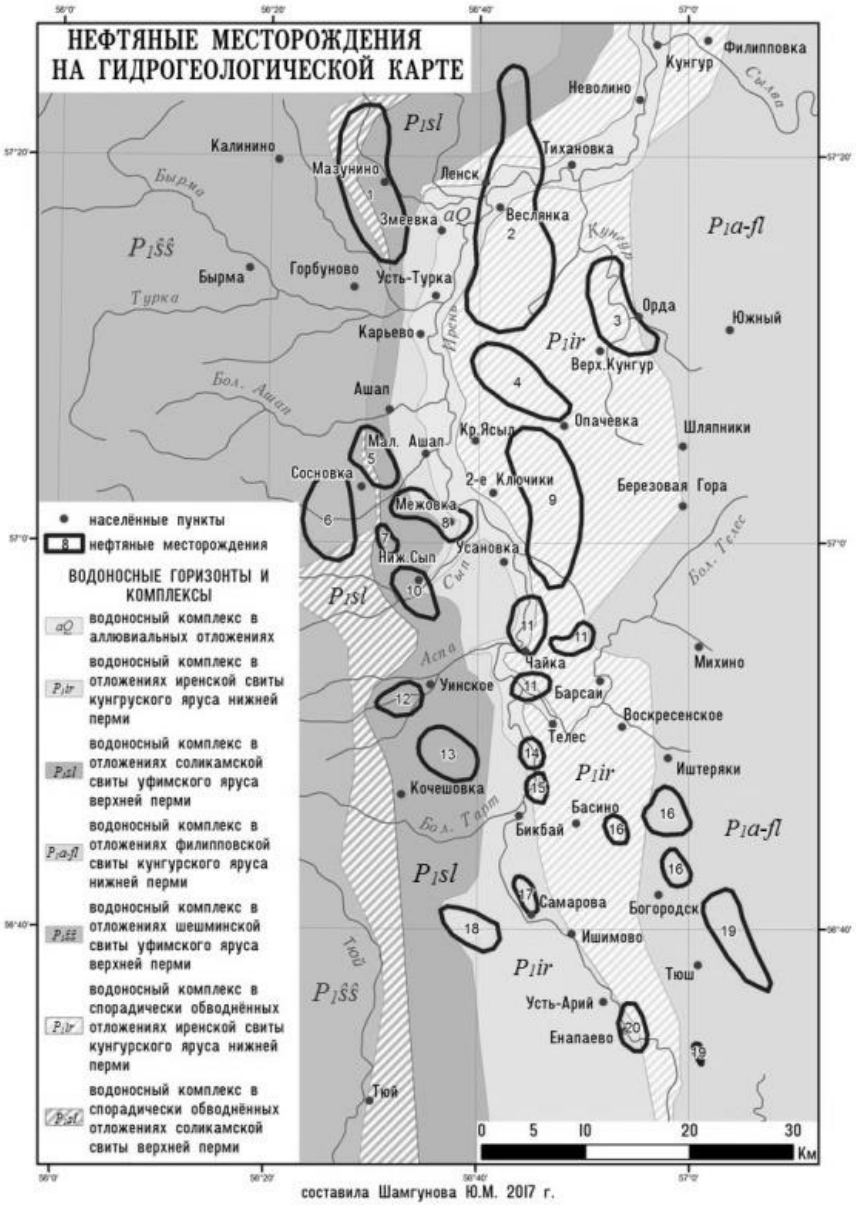


Рис. 1. Месторождения нефти на гидрогеологической карте района исследований. Месторождения:1-Мазунинское; 2-Кокуйское; 3-Ординское; 4-Губановское; 5-Сосновское; 6-Стретенское; 7-Сыповское; 8-Кулигинское; 9-Чураковское; 10-Чесноковское; 11-Чайкинское; 12-Уинское; 13-Лесное; 14-Северо-Зиковское; 15-Зиковское;16-Курбатовское; 17-Казаковское; 18-Западно-Казаковское; 19-Дороховское; 20-Енапаевское.

Примером транзита нефтепродуктов подземными водами является бассейн р. Ирень. В этом районе интенсивного гипсово-карбонатного карста (Иренский карстовый район) находится в эксплуатации 20 действующих нефтяных месторождений (рис.1). По материалам научных экспедиций кафедры динамической геологии и гидрогеологии ПГНИУ, в 2018 и 2023 гг. было зафиксировано содержание нефтепродуктов в поверхностных и подземных водах (свыше 10,0 мг/дм^3) в 7 пробах и 3 пробах содержание нефтепродуктов свыше 1 мг/дм^3 [3].

Наибольшее загрязнение нефтепродуктами (>10,0 мг/дм^3) отмечено в верхнем течении реки Ирень, в районе сёл Верх-Ирень, Антягузи, Енапаево и д. Уразметьево. Данные участки приурочены к Енапаевскому, Дороховскому и Казаковскому месторождениям нефти. Наличие нефтепродуктов в поверхностных и подземных водах связано с транзитом их от очагов загрязнения.

Экспедицией были установлены отдельные очаги проявления нефтяного загрязнения, приуроченные к родникам, находящиеся в д. Павлово на р. Тураевка, р. Ясылке (приурочены к Кокуйскому месторождению нефти).

Исток р. Тураевки у д. Павлово приурочен к карстовому роднику с дебитом 10 л/с. Залповый выброс нефти впервые произошел 18 апреля 1997 г. Вода в р. Тураевке покрылась пленкой нефти 20-сантиметровой толщины. Появление нефтяного загрязнения связано с эксплуатационными утечками при разработке месторождения. В настоящее время на истоке оборудован отстойник и очистные сооружения. Проявление загрязнения наблюдается в устье р. Тураевки, оно связано с родниковой субаквальной разгрузкой трещинно-карстовых вод зоны горизонтальной и сифонной циркуляции. С.М. Костарев (2015) связывает нефтяное загрязнение с поступлением флюидов вверх из продуктивных горизонтов по зонам неотектонической трещиноватости [1]. Проявление нефтяного загрязнения у д. Павлово на протяжении 27 лет указывает на формирование постоянно существующего очага загрязнения в карстовом массиве.

Факт загрязнения подземных и поверхностных вод в бассейне р. Ясылка правом притоке р. Ирень был установлен в 1997 г. при карстологических исследованиях по трассам магистральных газопроводов, которые пересекают долину. Нефтяное загрязнение приурочено к карстовой депрессии «Арапов ключ», в бортах депрессии вытекают три родника восходящего типа с дебитами 2-3 л/с. В воде родников наблюдается своеобразный сероводородный запах, многочисленные пленки и сгустки нефти, а также специфический серый цвет, дно родниковых ям покрыто слоем битума (рис. 2а). Серый цвет воды указывает на вторичное выпадение гипса. В результате мониторинга содержания нефтепродуктов в водах родников установлено, что максимальное количество их выносится в весенний период, когда дебиты родников увеличиваются. Тогда как в течении зимнего периода идет накопление нефтепродуктов в карстовых пустотах. Содержание нефтепродуктов в пробах воды родников зафиксировано до 5,53 мг/дм^3 и более (вода со сгустками нефти).



Рис. 2 а) Родник с нефтяным загрязнением, питающий ручей Арапов ключ. б) Участок поглощения поверхностных вод в понор.

На территории Ясыльской депрессии примером аккумуляции нефтепродуктов в карстовых полостях является пещера Пономоревская, которая расположена в карстовой котловине, длина пещеры 100 м. По дну пещеры протекает ручей, воды которого загрязнены нефтепродуктами (растворенные в воде 0,076 мг/дм^3, нерастворенные в воде 79 мг/дм^3) [4]. В пещере присутствует запах сероводорода, на стенках и дне пещеры имеются следы нефтепродуктов.

На участке выхода родников по результатам буровых работ зафиксирована линза нефтяного загрязнения грунта. Объем которой составляет 280 тыс. м^3, на площади 4 га. При опробовании донных отложений в руслах родников зафиксированы высокие содержания нефтепродуктов (до 10653 мг/кг). Ручей с нефтепродуктами, вытекающий из линзы загрязнения по долине карстовой депрессии, через 1 км полностью поглощается карстовыми понорами. На участке поглощения поверхностных вод в понор (рис. 2б) и далее по Ясыльской депрессии на расстоянии 7 км были выполнены замеры скорости потока подземных вод с помощью флуоресцеина. Скорость подземного потока с нефтяным загрязнением составила 750 м/сут.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Ореолы нефтяного загрязнения от очага загрязнения были зафиксированы на расстоянии 7 километров по потоку трещинно-карстовых вод, характерного для зоны горизонтальной и сифонной циркуляции.

2. Нефтяное загрязнение в зоне аэрации накапливается в карстовых пустотах, кавернах над горизонтом трещинно-карстовых вод или над слабозакарстованными (плохо проницаемыми) породами. Вынос и транзит нефтяного загрязнения из карстовых ловушек в основном происходит при интенсивных дождевых осадках и таянии снега. Направление транзита совпадает с потоком подземных вод и зависит от геолого-литологических, гидродинамических и иных факторов.

3. На участках разгрузки родниковых вод, загрязненных нефтепродуктами, формируются линзы загрязненных грунтов нефтепродуктами объемом до 280 тыс. м^3. В карстовых пустотах над поверхностью трещинно-карстовых вод формируются линзы мощностью 2-3 м, объемом 370 тыс. м^3. Нефтяное загрязнение, обнаруженное в карстовой пещере, является примером миграции нефтепродуктов при транзите их через карстовые полости подземным потоком.

Список литературы

1. Костарев, С.М. Особенности нефтепромыслового загрязнения геологической среды карстовых районов Пермского края / С.М. Костарев; Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: материалы Международного симпозиума; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2015. – 367 с.

2. Максимович, Н. Г. Особенности нефтяного загрязнения закарстованных территорий Пермского края/ Максимович Н. Г., Первова М. С. // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задача

геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии: Материалы годичной сес. Научн. совета РАН по пробл. Геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (20-21 марта 2008 г.) – М.: ГЕОС, 2008. – вып. 10.- С. 224-228.

3. Минькевич, И.И. Экологическая гидрогеология и гидрогеохимия: учеб. пособие / Минькевич И.И., Килин Ю.А.// Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017.– 232 с.

4. Килин, Ю.А. Нефтяное загрязнение пещеры Пономаревская I в Иренском карстовом районе/ Килин Ю.А., Копанцева Е.Н. // Гидрогеология и карстоведение: Межвуз. сб. науч. тр. – Перм. Ун-т. – Пермь, 2023. – вып. 21.- С. 43-51.

ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПРИ ВОДОПОДГОТОВКЕ ПИТЬЕВЫХ ВОД В ПЛАСТЕ

Кулаков В.В.

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, vvkulakov@mail.ru

Аннотация. В статье использованы материалы многолетнего мониторинга изучения природных биогеохимических процессов, идущих в водоносном горизонте Тунгусского месторождения некондиционных подземных вод в естественных условиях и при внутрипластовой подготовке питьевых вод. При инфильтрации, насыщенной кислородом и освобожденной от избыточных концентраций углекислого газа вода закачивается в водоносный горизонт через эксплуатационные скважины. Растворенный кислород окисляет железо, марганец и другие нормируемые компоненты в подземных водах, ускоряются биогеохимические процессы, в результате которых формируются вторичные минералы в водоносном горизонте. При откачке из скважин извлекается вода питьевого качества.

***Ключевые слова**: Тунгусское месторождение, некондиционные подземные воды, удаление железа и марганца в пласте, вторичные минералы*

Abstract. The article uses the materials of long-term monitoring of the study of natural biogeochemical processes occurring in the aquifer of the Tunguska reservoir of substandard groundwater in natural conditions and during the in-situ preparation of drinking waters. During infiltration, water saturated with oxygen and freed from excess concentrations of carbon dioxide is pumped into the aquifer through production wells. Dissolved oxygen oxidizes iron, manganese and other normalized components in groundwater, accelerates biogeochemical processes, as a result of which secondary minerals are formed in the aquifer. During pumping, drinking quality water is extracted from wells.

***Key words**: Tunguska reservoir, substandard groundwater, subsurface iron and manganese removal, secondary minerals*

Проблемы использования некондиционных подземных вод для питьевых нужд населения в бассейне р. Амур связаны с повышенными концентрациями железа (до 25–70 мг/дм^3), марганца (до 3 мг/дм^3) и кремния (до 15–30 мг/дм^3) [3, 4, 13].

Тунгусское месторождение подземных вод расположено в Хабаровском водном узле в центральной части Среднеамурской депрессии, в междуречье Амура – Тунгуски, в 10 км западнее г. Хабаровска [2, 6].

В отличие от подземных вод Европы, подземные воды региона имеют повышенную концентрацию растворенного CO_2 (200-250 мг/дм^3) и низкую температуру (около 6°С). Площади распространения некондиционных подземных вод в Приамурье приурочены к артезианским бассейнам и долинам равнинных рек, выполненным рыхлыми аллювиальными отложениями.

Наибольшее площадное распространение на территории имеют кайнозойские осадочные породы Среднеамурской впадины [2], представленные угленосными

палеогеновыми и неогеновыми уплотненными породами (глины, алевриты, пески), а также четвертичными рыхлыми породами (галечники, пески, илы).

Гидрогеологические условия Хабаровского водного узла определяются его расположением в центральной части Среднеамурского артезианского бассейна [2, 10]. Палеозойский фундамент вскрывается скважинами на глубине 100 – 200 м. К нижней части гидрогеологического разреза чехла артезианского бассейна относятся палеогеновые и неогеновые отложения, представленные песками, пластами бурого угля, глин и слабосцементированных песчаников. Верхняя часть разреза чехла артезианского бассейна сложена плиоцен-голоценовыми рыхлыми образованиями приамурской свиты и плейстоцен-голоценовыми аллювиальными отложениями надпойменных и пойменных террас Амура и Тунгуски (пески, галечники, гравийники, супеси, изредка глины). Мощность водоносного горизонта плиоцен-голоценовых отложений приамурской свиты достигает 60 м. Данный водоносный горизонт является основным источником водоснабжения за счет подземных вод в районе г. Хабаровска. Глубина залегания уровней подземных вод от поверхности земли изменяется от 0,5 – 2 м в пойме р. Амур до 5 -15 м на водоразделах междуречья.

В процессе исследований качественного состава подземных вод выполнялись многоэлементный химический анализ масс-спектрометрическим и атомно-эмиссионным методами, анализ растворенного органического углерода, определение растворенных газов, микробиологический анализ, хромато-масс-спектрометрический анализ органических веществ [4, 5, 7, 8, 13, 14].

Подземные воды Тунгусского месторождения являются достаточно агрессивными и весьма сложными с точки зрения водоподготовки [3, 5, 14]. Система «вода-порода» в водоносном горизонте месторождения является неравновесной [12], что приводит к разрушению матричного материала песков и накоплению в них продуктов разрушения и вторичного минералообразования. При отсутствии внешних воздействий эта система находится в динамическом равновесии.

По составу природные подземные воды гидрокарбонатные натриево-кальциевые. Общая минерализация подземных вод составляет 127-176 мг/дм^3. Величина pH изменяется в пределах от 5,8 до 6,3, Eh – от -30 до 50 mV, органолептически диагностируется наличие сероводорода. Концентрация кремнекислоты в воде изменяется от 30 до 65 мг/дм^3 (14-20 мг/дм^3 по Si), железа в форме Fe^{2+} от 15 до 30 мг/дм^3, марганца от 1,4 до 2,1 мг/дм^3, содержание нитритов не превышает 0,01 мг/дм^3, нитратов 0,4 мг/дм^3, фтора 0,04-0,15 мг/дм^3, иона аммония до 1-2 мг/дм^3. Растворенный кислород в подземных водах месторождения отсутствует. Растворенная углекислота - 190-250мг/дм^3.

В вертикальном разрезе и по площади химический состав подземных вод в междуречье Амура и Тунгуски существенно не меняется, за исключением уменьшения с глубиной концентраций железа и марганца и некоторого роста концентраций кремния.

В области очистки подземных вод, содержащих избыточные концентрации нормируемых компонентов (Fe, Mn, As, Ni) эффективной технологией является внутрипластовая водоподготовка, успешно применяемая на ряде водозаборов в России уже более 40 лет, а за рубежом известная более 120 лет [1, 5, 14].

В основу технологии обезжелезивания и деманганации подземных вод в водоносном пласте заложена возможность искусственного создания в нем на участках водозаборных скважин гидрогеохимических зон (биогеохимических барьеров), резко отличающихся по окислительно-восстановительным условиям от природных [1, 3, 4, 9]. Основы технологии обезжелезивания и деманганации подземных вод в пласте по методике SUBTERRA опираются на естественные природные окислительно - восстановительные процессы по созданию искусственных геохимических барьеров за счет насыщения подземной воды кислородом непосредственно в водоносном горизонте. В период эксплуатации водозаборных скважин поддерживается динамическое

равновесие (циклы откачки воды сменяются циклами насыщения подземных вод кислородом) таким образом, чтобы содержание железа и марганца в откачиваемой из скважины воде за весь период откачки не превышало нормативного значения.

Обезжелезивание и деманганация воды наиболее активно происходят на контакте вода-порода, где осуществляются химическая адсорбция, ионный обмен и микробиологические процессы.

Согласно технологии SUBTERRA в природной подземной воде при ее насыщении кислородом происходит окисление и осаждение железа, марганца и некоторых других нормируемых компонентов. Создание аэробных условий вокруг скважин стимулирует рост железо-марганцевых бактерий [8, 14]. При искусственном насыщении подземных вод кислородом и при удалении H_2S и избыточных концентраций растворенного CO_2 на участках водозаборных скважин происходит изменение состояния среды с восстановительной на окислительную. Увеличивается Eh до 250–400 mV, повышается pH до 7,0 и более.

Для создания вокруг эксплуатационных скважин эффективно работающего биогеохимического реактора требуется определенное время, за которое произойдет сорбция кислорода на поверхности частиц пород пласта, в достаточном количестве размножатся железомарганцевые бактерии, а поверхность минеральных частиц покроется каталитической пленкой нерастворимых форм железа и марганца. Эта пленка образуется за счет отмирающих бактерий. Перемещаясь потоком подземных вод в направлении рабочей части фильтра при откачке из скважин, вода поставляет органическое вещество, служащее источником органического углерода для жизнедеятельности железо-марганец-окисляющих бактерий.

При эксплуатации пускового комплекса на Тунгусском водозаборе установлено, что зона осаждения железа в пласте находится на расстоянии около 7 м от скважин и простирается в радиальном направлении до 10–15 м. Зона осаждения марганца приближена к скважинам и расположена в радиусе до 7 м.

Преимуществом технологии внутрипластовой очистки является и то, что формируемый в пласте биогеохимический барьер, на котором осаждается железо и марганец, является препятствием для поступления к скважинам вредных примесей, транспортируемых вместе с речным фильтратом из р. Амур.

Система «вода-порода» в водоносном горизонте месторождения является неравновесной, что приводит к разрушению матричного материала песков и накоплению в них продуктов разрушения и вторичного минералообразования. При отсутствии внешних воздействий эта система находится в динамическом равновесии.

Водоносные пески месторождения состоят из кварца (40-70 вес. %) и полевого шпата

Отмечаются слои, обогащенные растительными остатками и обломочным материалом гравийно-галечной размерности.

В 2013 году на р. Амур прошло катастрофическое за весь период наблюдений (более 120 лет) наводнение [11]. Минимальный уровень в конце зимнего меженного периода в апреле составил минус 0,12 м. Максимальный уровень в реке Амур у г. Хабаровска достиг отметки 8,08м, что на 1,5-2,5м выше исторически зафиксированного максимума. Слой поверхностных вод на Амуро-Тунгусском междуречье составил 0,2–1,0 м. Уровни подземных вод в наблюдательных скважинах располагались ниже уровня поверхностных вод, затопивших территорию [10]. Разница в отметках уровней поверхностных и подземных вод на территории изменялась от 1,5 до 6,5 м. Наличие покровных суглинков на изучаемой территории обусловило затрудненный водообмен между поверхностными и подземными водами, в связи с чем активное влияние паводковых вод на подземную гидросферу не было отмечено [5, 10].

Литологические характеристики водоносных пластов и изменения минералогического состава вблизи от эксплуатационных скважин изучались по

керновому материалу параметрических скважин, пробуренных в 2016-2017 годах, как на отдалении, так и вблизи от эксплуатационных скважин [7, 13]. Кроме того, непосредственно из интервала расположения рабочей части фильтров эксплуатационных скважин отобран материал, полученный путем импульсного гидродинамического воздействия на водоносный горизонт с последующей откачкой.

Содержание сидерита в песках варьирует от 0 до 14,35 вес. %, увеличиваясь с глубиной. Сидерит кристаллизуется в поровом пространстве водоносного горизонта, иногда практически полностью закупоривая его бурой кристаллической массой с образованием конкреций.

Собственные минералы (окислы и гидроокислы) железа и марганца около эксплуатационных скважин не обнаружены, что свидетельствует, что они практически в полном объеме входят в состав марганецсодержащего сидерита.

Минералогические исследования материала из наблюдательных скважин показали, что в них в интервале расположения водозаборных фильтров эксплуатационных скважин окислы и гидроокислы железа и марганца отсутствуют [4, 8]. В то же время в зоне биогеохимических реакторов наблюдается значительное количество тонкокристаллического сидерита. Окисленные соединения железа, образующиеся при внутрипластовом окислении, под воздействием природных бескислородных подземных вод с высоким содержанием CO_2 и низкими значениями pH, преобразуются в марганецсодержащий сидерит. Таким образом, на Тунгусском водозаборе основным коллектором окисленных форм железа и марганца выступают не окислы и гидроокислы, а техногенный тонкокристаллический сидерит, накапливающийся в поровом пространстве водоносного горизонта на периферии реакционных зон. Ранее предполагалось, что в зонах биогеохимических реакторов растворенные в воде железо и марганец окисляются до окислов и гидроокислов, которые в тонкодисперсном виде отгоняются потоком закачиваемой воды на периферию, где осаждаются в порах водоносного горизонта и аккумулируются на поверхности водовмещающих пород [4, 8, 15].

Железосодержащие силикаты в этом процессе не образуются. В зонах биогеохимических реакторов у каждой эксплуатационной скважины к этим продуктам добавляются вторичные минералы, которые вместе с твердыми продуктами разрушения и глинистыми минералами образуют специфический нерастворимый в кислотах композит. Этот композит, участвующий в кольматаже прифильтрового пространства эксплуатационных скважин, приводит к существенному уменьшению удельного дебита скважин и увеличению объема твердой фазы в геологическом разрезе водоносного горизонта, заполняя межзерновое пространство, снижает пористость песков.

Особое внимание было уделено изучению распределения в песках сидерита и аморфного кремнезема, как потенциальных кольматантов фильтров скважин. Во всех пробах водоносных песков отмечается наличие тонкой фракции, состоящей из глинистого материала, аморфного кремнезема, тонкозернистого сидерита и микрообломков преимущественно полевошпатового состава. Ее компоненты имеют как первично осадочную природу, так и представляют собой продукты разрушения минералов песков при взаимодействии с подземными водами, циркулирующими в пласте [7, 13].

Из минералогических изменений в зоне биогеохимических реакторов после регенерации водоносного горизонта кислотой достоверно зафиксировано лишь резкое уменьшение в составе песков сидерита вплоть до его полного исчезновения в непосредственной близости от фильтров эксплуатационных скважин. Причиной этого является разложение сидерита при взаимодействии с соляной кислотой, закачиваемой в скважины в процессе регенерации для уменьшения кольматажа фильтров эксплуатационных скважин. Косвенным свидетельством этого процесса являются

мощные выбросы углекислоты из наблюдательных скважин, расположенных на расстоянии до 6 м от эксплуатационной [13].

Высвобождение кремнезема в процессе разрушения полевых шпатов и других минералов песков (пироксены, амфиболы, слюды), обеспечивает высокое содержание растворенного кремнезема в подземных водах междуречья Амура и Тунгуски, и наличие в составе тонкой фракции водоносного горизонта аморфного кремнезема [13].

По данным результатов систематических анализов водных проб в 2017 – 2022 годах, отобранных в сборном коллекторе на станции 2-го подъема Тунгусского водозабора в процессе производственного контроля, величина pH колебалось в пределах 6,1 – 6.5, концентрации железа общего стабильно составляли 0,01 – 0,04 мг/дм^3, марганца не превышало 0 – 0,03 мг/дм^3.

Применение на Тунгусском водозаборе технологии внутрипластовой очистки подземных вод в модификации SUBTERRA способствует устойчивому процессу водоподготовки питьевых подземных вод.

Опыт эксплуатации пилотной установки с 2007 года, пуско-наладочные работы и эксплуатация, особенно в период с 2017 по 2022 год, свидетельствуют о достижении основной цели: устойчивого процесса обезжелезивания и деманганации некондиционных подземных вод в водоносном горизонте с весьма сложными гидрогеохимическими условиями. В город подается питьевая подземная вода, соответствующая нормативным значениям качества по всем лимитируемым показателям.

Учитывая несомненные экономические преимущества технологии внутрипластовой очистки подземных вод, ее безотходность, экологическую чистоту и безопасность, есть все основания для использования данной технологии в качестве приоритетной при разведке, подсчете запасов некондиционных подземных вод и разработке проектов водозаборов для централизованного обеспечения питьевых потребностей населения городов и поселков.

Список литературы

1. Алексеев В.С., Коммунар Г.М., Тесля В.Г. Опыт внутрипластовой очистки подземных вод от железа // Водоснабжение и санитарная техника. 1989. № 5. С. 14–15.

2. Варнавский, В. Г., Даммер А. Э., Тюрин И. М. и др.; Геологическое строение и инженерно-геологические условия Хабаровска и его окрестностей // Монография под ред. В. Г. Варнавского. Хабаровск: Изд-во ИТиГ ДВО АН СССР. 1991. 113 с.

3. Кулаков В.В. Использование внутрипластовой очистки подземных вод от железа и марганца (на примере г. Хабаровск) // Вестник ДВО РАН. 2013. № 2 (168). С. 84 – 89.

4. Кулаков В.В. Водоподготовка питьевых вод в водоносном горизонте на Тунгусском водозаборе некондиционных подземных вод в Хабаровске // Водное хозяйство России. 2016. № 2. С 88 – 97.

5. Кулаков В.В. Опыт внутри пластовой водоподготовки на Тунгусском месторождении некондиционных подземных вод // Труды Всероссийской научной конференции с международным участием «Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования». М.: МГУ, 2023.С.335-345. https://cloud.mail.ru/public/mNp7/sye9Xkzm7

6. Кулаков В.В. Геологическая и антропогенная эволюция взаимодействия подземных вод с горными породами аллювиальных отложений в Хабаровском водном узле // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: труды V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева / Томский политехнический университет. Томск: Изд-во ТПУ. 2023. С. 255 - 258.

7. Кулаков В.В, Бердников Н.М., Крутикова О.В., Архипова Е.Е. Природные и техногенные процессы минералообразования в водоносном горизонте Амуро-Тунгусского междуречья // Тихоокеанская геология. 2019. Т. 38, № 2. С. 63 – 72.

8. Кулаков В.В., Кондратьева Л.М. Биогеохимические аспекты очистки подземных вод Приамурья // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 109 – 118.

9. Кулаков В.В., Стеблевский В.И., Домнин К.В., Тесля В.Г., Хердлициус Й. Опытно-промышленная эксплуатация пилотной установки очистки подземных вод на Тунгусском водозаборе // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 7. С. 29 – 35.

10. Кулаков В. В. Штенгелов Р. С., Матвеенко Д. В. Взаимодействие подземных и поверхностных вод в зоне Хабаровского водного узла // Науки о земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 2. С. 151–158. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-151-158

11. Махинов А. Н., Ким В. И., Воронов Б. А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2014. № 2. С. 5–14.

12. Шварцев С.Л. Взаимодействие воды с алюмосиликатными горными породами // Геология и геофизика.1991. № 12. С. 16-51.

13. Kulakov V.V., Berdnikov N.V. Hydrogeochemical processes in the Tunguska reservoir during in situ treatment of drinking water supplies // Applied Geochemistry 120. 2020. 104683. http://www.elsevier.com/locate/apgeochem

14. Kulakov, V.V., Fisher, N.K., Kondratieva, L.M., Grischek, T. Riverbank Filtration as an Alternative to Surface Water Abstaction for Safe Drinking Water Supply to the City of Khabarovsk, Russia // In C. Ray and M. Shamrukh (eds.) Riverbank Filtration for Water Security in Desert Countries. Springer Science + Business Media. 2011. T. 103. pp. 281-298.

15. Paufler, S., Grischek, T., Feller, J., Herlitzius, J., Kulakov, V.V. Manganese release linked to carbonate dissolution during the start-up phase of a subsurface iron removal well in Khabarovsk, Russia // Science of the Total Environment. 2019. T. 650. pp.1722-1733.

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОЧИСТКЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ РАСТВОРЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Максимович Н.Г.[1], Хмурчик В.Т. [1], Деменев А.Д. [1], Березина О.А. [1], Мещерякова О.Ю. [1]
ООО «МИП «Геоинновация плюс», Пермь, Россия, E-mail: nmax54@gmail.com

Аннотация. Очистка подземных вод от растворенных нефтепродуктов является одной из приоритетных задач при проведении комплекса природоохранных мероприятий. Перспективным направлением ликвидации такого загрязнения является биологическое разрушение. Авторами было разработано специальное устройство, позволяющее создавать наиболее приемлемые условия для жизнедеятельности нефтеокисляющих микроорганизмов за счет дозированной подачи кислорода, а также организован оперативный мониторинг за гидрохимическими параметрами. Непрерывный контроль функционирования системы очистки подземных вод является одним из важнейших инструментов эффективности такого природоохранного мероприятия. Организация подобного мониторинга традиционными методами с пробоотбором и замерами повлечет значительные финансовые затраты, поэтому наиболее целесообразным является ведение мониторинга с использованием специализированных датчиков, приборов телеметрии, онлайн-сервисов для хранения, обработки и визуализации данных.

Ключевые слова: *очистка подземных вод, растворенные нефтепродукты, дистанционный мониторинг, природоохранные технологии.*

Abstract. Treatment of groundwater from dissolved petroleum products is one of the priority tasks when carrying out a set of environmental measures. A promising direction for eliminating such pollution is biological destruction. The authors have developed a special device that makes it possible to create the most acceptable conditions for the life of oil-oxidizing microorganisms through a dosed supply of oxygen, and organized operational monitoring of hydrochemical parameters. Continuous monitoring of the functioning of the groundwater treatment system is one of the most important tools for the effectiveness of such environmental protection measures. Organizing such monitoring using traditional methods with sampling and measurements will entail significant financial costs, so the most appropriate is to conduct monitoring using specialized sensors, telemetry devices, and online services for storing, processing and visualizing data.

Key words: *groundwater treatment, dissolved petroleum products, remote monitoring, environmental technologies.*

Процессы добычи нефти и газа, транспортировки, а также последующей переработки могут оказывать определенное воздействие на компоненты окружающей среды [1]. При этом нештатные ситуации в ряде случаев сопровождаются формированием источников нефтяного загрязнения [2, 3]. Скорость миграции нефтяного загрязнения зависит от природных условий территории и интенсивности поступления

загрязняющих веществ в окружающую среду. Со временем нефть или нефтепродукты достигают подземных вод и быстро мигрируют в растворенном виде с их потоком.

В настоящее время применяется широкий спектр методов, направленных на очистку водных объектов от нефтяного загрязнения, однако проблема распространения растворенных нефтепродуктов в подземных водах остается зачастую нерешенной при применении этих технологий.

Перспективным направлением ликвидации загрязнения подземных вод растворенными нефтепродуктами является их биологическое разрушение. Все вещества биологического происхождения, а к ним относятся нефть и нефтепродукты, могут быть окислены, и в природе всегда найдутся микроорганизмы, способные их расщепить полностью или частично. Биологические методы разрушения углеводородов применяют в тех случаях, когда их количество мало, чтобы применять механические методы очистки, но слишком велико, чтобы использовать загрязненные земли и воду в хозяйственных целях.

Научным коллективом осуществляются исследования по очистке подземных водоносных горизонтов с помощью биологических методов, использующих как биостимуляцию природного углеводородокисляющего сообщества микроорганизмов [4], так и биодополнение его активной биомассой автохтонных углеводородокисляющих бактерий [5, 6, 7]. Биодополнение осуществляли путем внесения активной биомассы микроорганизмов в скважину непосредственно, либо с использованием специального устройства [8].

Непрерывный мониторинг функционирования системы очистки подземных вод является одним из важнейших инструментов эффективности разрабатываемого технологического комплекса. Известно, что для начала более эффективной деструкции углеводородных загрязнений необходимо добиться концентраций растворенного кислорода в воде на уровне 5-10 мг/дм^3 [9]. Таким образом, концентрация растворенного кислорода в подземных водах – параметр, позволяющий в оперативном режиме отслеживать результативность функционирования скважинного инъектора.

В рамках проекта было разработано специальное устройство (многоканальный скважинный инъектор), позволяющее создавать наиболее приемлемые условия для жизнедеятельности нефтеокисляющих микроорганизмов за счет дозированной подачи кислорода.

В зависимости от результатов мониторинга может быть принято решение о корректировке обработки водоносного горизонта, замены источника поступления кислорода или ремонте оборудования. В связи с этим принципиальным требованием является обеспечение оперативного мониторинга контролируемых параметров или в режиме реального времени. Организация подобного мониторинга традиционными методами с пробоотбором и замерами повлечет значительные финансовые затраты, поэтому в данном случае наиболее целесообразным является организация мониторинга контролируемых параметров с использованием специализированных датчиков, приборов телеметрии и онлайн-сервисов для хранения, обработки и визуализации данных. В последствии пользователи имеют возможность взаимодействовать с системой через веб-интерфейс (рис. 1). Пользователю сервиса будут доступны оперативные и архивные данные измерений с каждого датчика в абсолютных значениях.

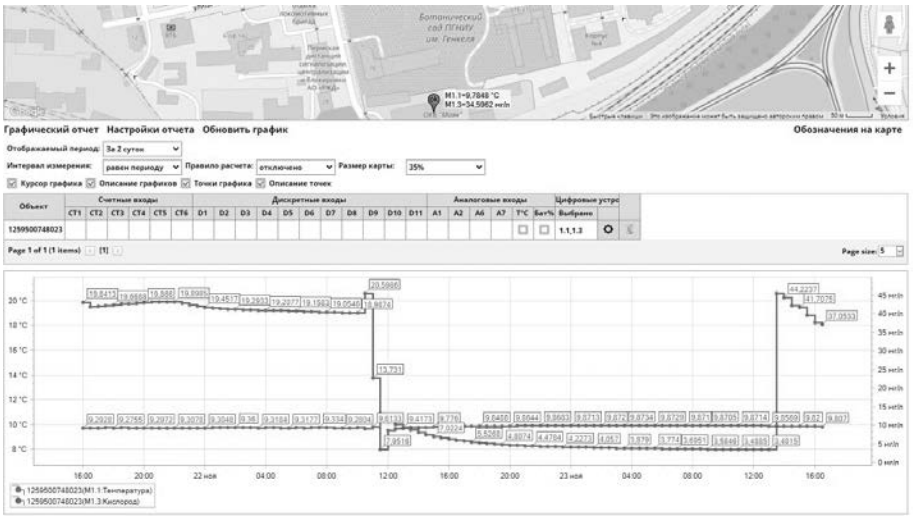


Рис. 1. Веб-интерфейс сервиса сбора данных с автономного датчика (на графике отображено изменение содержания растворенного кислорода в подземных водах)

По результатам полевой апробации многоканального скважинного инъектора можно сделать вывод о том, что разрабатываемые технические средства подтвердили свою эффективность. Процесс насыщения воды кислородом наблюдался на всем протяжении опытных работ, гидрохимические параметры стабильно передавались на сервер по беспроводной связи, в последствии данные анализировались и обрабатывались.

В дальнейшем при реализации предлагаемого метода очистки подземных вод на других объектах рекомендуется проводить подобный мониторинг, однако, с меньшей частотой отбора (например, с передачей данных 2 раза в сутки), устанавливаемой в зависимости от геолого-литологических, гидрогеологических и геоморфологических условий территории.

Список литературы

1. Давыдова С.Л., Тагасов В.И. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде – М.: Изд-во РУДН, 2004. – 163 с.

2. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с.

3. Фащук Д.Я., Овсиенко С.Н., Леонов А.В. и др. Геоэкологические последствия аварийных разливов нефти // Изв РАН. Сер. геогр. – 2003. – № 5. – С. 135-150.

4. Demenev A., Maksimovich N., Khmurchik V., Rogovskiy G., Rogovskiy A., Baryshnikov A. Field test of *in situ* groundwater treatment applying oxygen diffusion and bioaugmentation methods in an area with sustained total petroleum hydrocarbon (TPH) contaminant flow // Water. 2022. Vol. 14, article 192.

5. Maksimovich N.G., Khmurchik V.T. Remediation of oil-polluted groundwater aquifers at karst region // In: “Engineering geology for society and territory”, Vol. 3 “River basins, reservoir sedimentation and water resources” (Lollino G. et al., Eds.) – Springer, 2015 – P. 417-419.

6. Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т. Консорциум штаммов углеводородокисляющих бактерий Pseudomonas aeruginosa нд кз-1 и Pseudomonas fluorescens нд кз-2 в качестве деструктора нефтепродуктов и способ очистки нефтезагрязненных подземных вод. Патент РФ № 2312719; заявл. 15.02.2006; опубл. 20.12.2007, Бюл. № 35.

7. Максимович Н. Г., Хмурчик В. Т., Мещерякова О. Ю. Опыт очистки подземных вод от нефтяного загрязнения биологическими методами // Промышленная безопасность и экология. – 2009. № 4 (37). – С. 34-36.

8. Максимович Н. Г., Хмурчик В. Т., Мещерякова О. Ю. Опыт очистки подземных вод от нефтяного загрязнения биологическими методами // Промышленная безопасность и экология. – 2009. № 4 (37). – С. 34-36.

9. Yaniga, P.M.; Matson, C.; Demko, D.J. Restoration of water quality in a multi-aquifer system via in situ biodegradation of the organic contaminants. In Proceedings of the Fifth National Symposium and Exposition on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring, Worthington, OH, USA, 21–24 May 1985; National Water Well Association: Worthington, OH, USA, 1985. 510p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ CO_2 НА ПРИМЕРЕ ВЕРХ-ТАРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Никитенков А.Н.
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, sputnik70@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается создание модели и моделирование размещения водорастворенного углекислого газа в продуктивном пласте Верх-Тарского нефтяного месторождения. Демонстрируется структура модели, условия месторождения, предполагаемые режимы закачки, а также результаты моделирования процесса закачки на заданный срок. По итогам расчётов даётся характеристика изменений содержания углекислоты в пласте, а также pH и температурного поля, определяющего скорость, а в ряде случаев и направленность протекания химических реакций.
Ключевые слова: *Моделирование, размещение углекислого газа, водорастворенный газ, геомиграция.*

Annotation. The paper considers the creation of a model and modeling of the placement of water-dissolved carbon dioxide in the productive reservoir of the Verkhny Tarskoye oil field. The structure of the model, the conditions of the deposit, the expected injection modes, as well as the results of modeling the injection process for the period under consideration are considered, when considering which the characteristic of changes in the carbon dioxide content in the formation, as well as the pH and temperature field determining the speed and, in some cases, the direction of chemical reactions is given.
Keywords: *Modeling, carbon dioxide placement, water-dissolved gas, geomigration.*

Проблема размещения углекислого газа в недрах в последнее время всё чаще затрагивается как в средствах массовой информации, фигурируя в контексте планов развития флагманов отечественной экономики, так и в научном сообществе, вызывая взаимный интерес как у науки, так и у производства. Рассмотрению данной проблемы посвящен ряд работ как отечественных, так и зарубежных учёных. Закачка углекислоты требует в ряде случаев учёта множества сложных процессов, происходящих в пластах при закачке в них углекислого газа, в ходе взаимодействия которого с коллектором и содержащимся в нём раствором происходит изменение поля давлений в пласте, а также геохимического и геотемпературного полей, которые в своей совокупности требуют уточнения и изучения возможности активации геомеханических и гидрогеохимических процессов, происходящих внутри пласта [1-7].

В данной работе на основе гидродинамической модели делается попытка изучения особенностей изменчивости геохимического поля месторождения при условии размещения углекислого газа в водорастворенном состоянии.

Верх-Тарское нефтяное месторождение расположено на севере Новосибирской области и является одним из крупнейших в её пределах (рис. 1). Эксплуатация месторождения ведется с 2000 года и на настоящий момент оно находится на завершающей стадии разработки. В рамках месторождения выделяют один продуктивный горизонт $Ю_1$, распространенный в пределах рассматриваемой территории. Геологическое строение, а также гидрогеологические и гидрогеохимические условия достаточно детально рассмотрены в работах [8-17].

Создание модели, а также моделирование процесса насыщения раствора углекислотой и его закачки в продуктивный пласт Верх-Тарского месторождения осуществлено в программном комплексе HydroGeo [18]. Расчёт геофильтрации реализован на основе применения конечно-разностной формы дифференциального уравнения нестационарной фильтрации и теплопереноса, методом прогонки. Работа с гидродинамической дисперсией использует модель двойной пористости. При расчёте газонасыщения используется система уравнений, полученная на базе данных по растворимости газов в водных растворах.

Основой для создания модели послужили данные ИНГГ СО РАН по 17 скважинам, на которых произведен расчёт и оценка глубины залегания кровли и подошвы, а также величины проницаемости и пористости. Модель в ПК HydroGeo была описана с помощью расчётной сетки в 103x77 блоков в плане с пространственным разрешением по горизонтальным осям в 200 метров и 24 слоёв мощностью 5 метров каждый. В качестве граничных условий на основе данных по разрезу выбраны границы первого рода. Дополнительно предполагаем, что состав раствора продуктивного пласта однообразен и взят по условно «средним» по составу водам (из выборки по скважинам), баланс электронейтральности по которому, для возможности осуществления гидрогеохимических расчётов, был пересчитан по натрию (табл. 1).

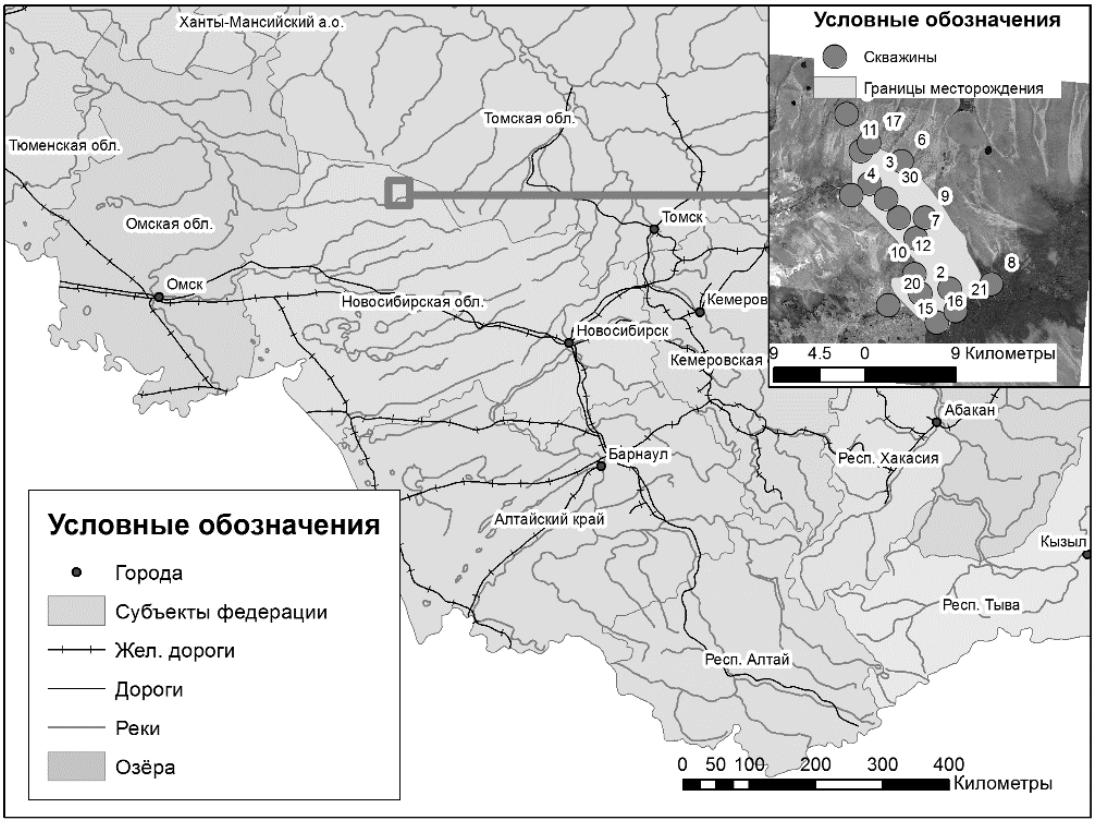


Рис. 1. Местоположение Верх-Тарского месторождения

Таблица 1. Химический состав пластового флюида Верх-Тарского месторождения, принятый для моделирования, мг/дм^3.

Компонент	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Al^{3+}	Fe^{3+}	Cl^{-}	$(HCO_3)^{-}$	$(SO_4)^{2-}$	SiO_2	pH	Eh(мВ)	M(г/л)	t (град.C)	P (МПа)
Содержание	1380	209	11084,1	157,1	0,12	8,32	19950	598,85	8,7	33,32	7,58	21,8	33,442	86	25

Размещение углекислого газа предполагается в водорастворенной форме. В качестве носителя предполагается использовать ту же пластовую воду месторождения, откачиваемую, насыщаемую до предельного состояния газонасыщения на поверхности при давлении, соответствующем пластовому и температуре 25 ^{0}C, а затем закачиваемую обратно в пласт. Также предполагаем, что при росте температуры углекислота сохранится в водорастворенной форме, насыщенный которой раствор представлен ниже (табл. 2).

Таблица 2. Состав раствора закачиваемой жидкости, мг/дм^3.

Компонент	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Al^{3+}	Fe^{3+}	Cl^{-}	$(HCO_3)^{-}$	$(SO_4)^{2-}$	SiO_2	pH	Eh(мВ)	M(г/л)	t (град.C)	P (МПа)
Содержание	1380	209	11084,1	157,1	0,12	8,32	19950	399500	8,7	33,32	2,6	6,2	432,343	25	25

Процесс насыщении раствора углекислотой сопровождается его подкислением. А сама углекислота переходит в растворе в форму HCO_3^-, содержание которого является индикатором распространения изменений в пласте. Интервал значений пористости коллектора от 6,4 до 18%. В качестве начального значения напоров была принята величина в 25 МПа, соответствующая гидростатическому давлению на заданной глубине. Проницаемость пород составляет от 0 до 1815 мД, при среднем значении ~~в~~ 35,9 мД. Величина коэффициента пьезопроводности для всего пласта была принята, по литературным данным, равной $5 \cdot 10^5$ м^2/сут.

На текущем этапе модель также учитывает изменение как химического состава за счет процессов межблочного перетекания и смешения вод, так и изменения геотемпературного поля, определяющие, в частности, изменчивость плотности рассматриваемой жидкости. Закачка насыщенного раствора производится через 14 скважин, с расходом каждой в 800 м^3/сутки, что близко к величинам их максимальной приемистости при использовании в целях ППД. Моделирование закачки осуществлено на срок в 10 лет со снимками промежуточных результатов на 10,30,60,183 суток и 1,2,3,5 лет. На основании результатов моделирования получены оценки изменчивости ряда параметров пласта, в частности содержания по пласту закачиваемого углекислого газа, для которого проанализирован рост содержания по блокам, в которые осуществлялась закачка. Содержание углекислоты по блокам скважин через расчётный срок в 1 год закачки представлены в таблице 3.

Таблица 3. Концентрация HCO_3^{2-} в блоке скважины, г/дм^3.

№ скважины	30	17	3	12	11	7	9	2	15	4	21	20	10	6
10 дней	107,87	107,15	151,49	106,57	105,60	137,81	110,63	112,04	103,52	92,64	107,75	134,52	93,61	83,53
30 дней	242,89	242,47	302,92	240,96	239,96	286,01	238,70	250,14	235,54	217,44	242,39	279,97	217,48	200,19
60 дней	336,59	337,26	375,09	335,25	335,49	366,30	328,65	343,18	330,04	315,35	335,71	359,85	311,62	297,32
183 дня	397,34	397,82	399,42	397,14	397,67	399,12	397,98	398,12	396,49	395,14	397,38	398,33	392,07	391,13
365 дней	399,45	399,48	399,50	399,42	399,47	399,50	399,49	399,48	399,42	399,40	399,47	399,47	399,13	399,23

При объёмах закачки в 800 м^3/сутки полное насыщение блоков углекислотой (до соответствия закачиваемому раствору) с вытеснением из них исходного раствора происходит за срок около одного года. При этом процесс закономерно происходит быстрее в блоках с большей проницаемостью. По общей минерализации, основную роль в которой играет гидрокарбонат-ион, закономерности те же самые: скорость роста минерализации обратно пропорциональна величине проницаемости пласта, а достижение предельных величин насыщения приходится на интервал между первым и вторым годами работы скважин. Также проведена оценка изменчивости величины pH (табл. 4).

Таблица 4. Величина кислотно-щелочного баланса в блоке скважины, pH.

№ скважины	30	17	3	12	11	7	9	2	15	4	21	20	10	6
10 дней	6,24	6,25	5,70	6,26	6,27	5,87	6,21	6,19	6,30	6,43	6,25	6,03	6,42	6,55
30 дней	4,56	4,57	3,82	4,59	4,60	4,03	4,62	4,47	4,66	4,88	4,57	4,34	4,88	5,10
60 дней	3,40	3,39	2,92	3,41	3,41	3,03	3,50	3,32	3,48	3,66	3,41	3,41	3,71	3,89
183 дня	2,64	2,64	2,62	2,64	2,64	2,62	2,63	2,63	2,65	2,67	2,64	2,64	2,71	2,72
1 год	2,61	2,61	2,61	2,62	2,61	2,61	2,61	2,61	2,62	2,62	2,61	2,61	2,62	2,62
2 года	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61
3 года	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61

5 лет	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61
10 лет	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61

Достаточно резкое изменение pH обусловлено тем, что водород расходуется на перевод углекислого газа в гидрокарбонат-ион, за счет чего уже на 10-е сутки работы нагнетательных скважин по большинству из них происходит изменение величины показателя от слабощелочного к слабокислому. Наиболее значимая коррекция происходит в течение полугода, в результате которой воды становятся сильно кислыми с величиной pH < 3, а через год в большинстве блоков происходит стабилизация состава.

На завершающем этапе работы проведена оценка пространственной изменчивости содержания углекислоты в пласте. Сделано это путем анализа слоёв модели, содержащих блоки с нагнетательными скважинами (рисунок 2), на срок в 10 лет. Как видно из иллюстрации, в отдельных случаях происходит наложение зон воздействия скважин с объединением полей их влияния. В качестве критерия изменчивости состава (чего?) был принят показатель в 10% от исходного содержания параметра, значения выше которого интерпретированы как значимо измененные блоки. Так, значимые изменения для блоков с наилучшими фильтрационными параметрами, образуют зоны диаметром до 12-13 ячеек или 2,6 км в абсолютных величинах. Таким образом, за 10 лет работы скважин, зоны геохимических изменений значимо не выходят за пределы экстента месторождения.

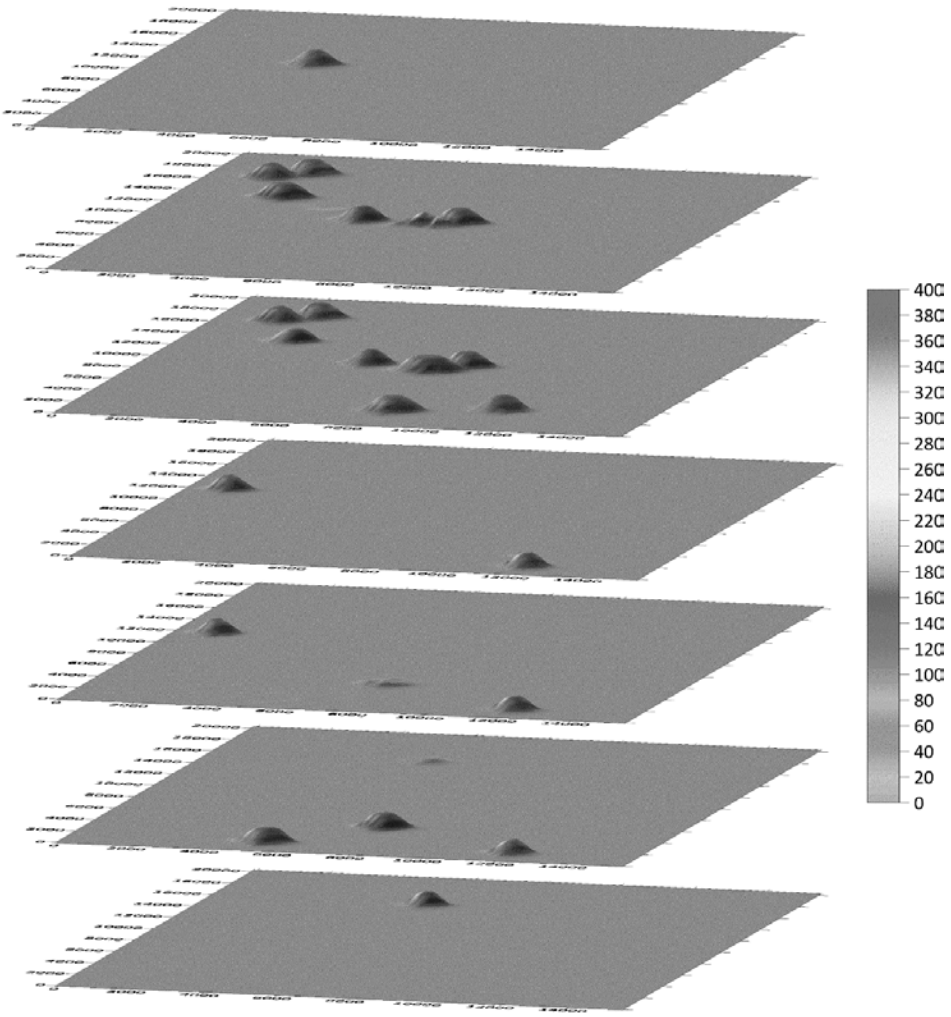


Рис. 3. Зоны распространения повышенных концентраций CO_2 (г/дм^3) по 4,8,10,14,16,18,22 (сверху вниз) слоям модели (координаты в абс. метрах).

В результате процесса нагнетания насыщенного углекислотой раствора образуется смесь, содержащая в различных пропорциях исходные и привносимые элементы. Основные изменения в геохимическом фоне в блоках расположения скважин происходят в течение первого года закачки. Установлено, что распространение значимых концентраций углекислоты (более, чем на 10% меняющих исходный состав раствора блока) произошло на расстояние до 5-7 блоков, что соответствует расстоянию в плане порядка ~1000-1400 метров от нагнетательных скважин.

Проведенные исследования позволяют дать общую оценку особенностей как качественной, так и количественной изменчивости геохимического поля пласта месторождения при размещении в нём углекислоты. Полученные результаты отражают основные природные процессы при условии отсутствия значимых взаимодействий в системе вода-газ-горная порода, учёт которых представляется целью дальнейших исследований в выбранном направлении. Для увеличения достоверности получаемых результатов предполагается переход в дальнейшем на геомиграционные алгоритмы, учитывающие геомеханические процессы в пласте, а также возможность нахождения углекислоты в разных фазах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Новосибирского государственного университета по программе Приоритет-2030.

Список литературы

1. Никитенков, А.Н. О возможности реализации проектов CCS в карбонатных коллекторах Сибирской платформы / А.Н. Никитенков, Д.А. Новиков, А.А. Максимова, А.В. Пенигин, И.В. Вараксина, Е.А. Жуковская; Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. Т. 334. № 8. – С. 68-78.

2. Никитенков, А.Н. Геохимические последствия захоронения углекислого газа в терригенных коллекторах / А.Н. Никитенков, Д.А. Новиков, А.А. Максимова, А.В. Пенигин, Л.Г. Вакуленко, И.В. Вараксина, Е.А. Жуковская; Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. № 4б. – С. 130-137.

3. Никитенков, А.Н. Особенности взаимодействия в системе вода-порода-CO2 при реализации проектов CCUS (на примере меловых резервуаров арктического сектора Западной Сибири) / А.Н. Никитенков, Д.А. Новиков, А.А. Максимова, Л.Г. Вакуленко; Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. Т. 2. № 1. – С. 233-240.

4. Фомина, Я.В. Перспективы реализации проектов CCS на территории Новосибирской области / Я.В. Фомина, Д.А. Новиков, А.Н. Никитенков; Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2023. Т. 2. № 2. – С. 284-291.

5. Новиков, Д.А. Оптимальный комплекс критериев зонального прогноза перспектив захоронения углекислого газа в геологических формациях / Д.А. Новиков, Я.В. Садыкова, И.И. Юрчик, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, С.В. Головин; Экология и промышленность России. – 2023. Т. 27. № 4. – С. 44-49.

6. Новиков, Д.А., Региональный прогноз перспектив захоронения углекислого газа на территории Российской Федерации / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, И.И. Юрчик, Я.В. Садыкова, А.С. Деркачев, А.В. Черных, А.А. Максимова, С.В. Головин, Н.Г. Главнов, Е.А. Жуковская; Нефтяное хозяйство. – 2022. № 3 (1181). – С. 36-42.

7. Новиков, Д.А. Первый опыт зонального прогноза Московского артезианского бассейна для реализации проектов CCS / Д.А. Новиков, Я.В. Фомина, И.И. Юрчик, А.С. Деркачев, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Максимова, А.Н. Никитенков, А.Г. Князев; Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. № 10. – С. 119-139.

8. Novikov, D.A. Integrated Isotope-Geochemical and Microbiological Studies of Groundwaters in Oilfields (the Southern Part of the West Siberian Basin) / D.A. Novikov, A.A. Khvashchevskaya, A.N. Pyriaev, N.G. Nalivaiko, I.A. Gosteva, A.V. Chernykh, A.A. Maksimova, S.V. Ryzhkova, S.A. Pavlova; Modeling Earth Systems and Environment. – 2023. DOI: 10.1007/s40808-023-01887-z

9. Вакуленко, Л.Г. Изотопно-геохимические особенности аутигенных карбонатов продуктивного горизонта Ю1 Верх-Тарского нефтяного месторождения (юг Западной Сибири) / Л.Г. Вакуленко, О.Д. Николенко, Д.А. Новиков, П.А. Ян; Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. № 4 (44). – С. 20-28.

10. Новиков, Д.А. Формы миграции химических элементов в подземных водах горизонта Ю1 Верх-Тарского нефтяного месторождения (юг Западной Сибири) / Д.А. Новиков, А.Е. Шохин, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2019. № 16. – С. 448-453.

11. Новиков, Д.А. Геохимия водорастворенных газов нефтегазоносных отложений южных

районов Обь-Иртышского междуречья / Д.А. Новиков, А.Е. Шохин, А.А. Черников, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных; Известия вузов. Нефть и Газ. – 2019. № 4 (136). – С. 70-81.

12. Садыкова, Я.В. Прогноз нефтегазоносности юрских и палеозойских отложений южных районов Западно-Сибирского бассейна / Я.В. Садыкова, М.А. Фомин, С.В. Рыжкова, Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных; Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. Т. 330. № 9. – С. 114-127.

13. Новиков, Д.А. Гидродинамические особенности нефтегазоносных отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, С.В. Рыжкова; Георесурсы. – 2019. Т. 21. № 4. – С. 85-94.

14. Новиков, Д.А. Гидрогеохимия доюрских комплексов Западной Сибири / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, В.А. Хилько, И.И. Юрчик, А.Ф. Сухорукова; Геология и геофизика. – 2020. Т. 61. № 11. – С. 1561-1576.

15. Новиков, Д.А. Гидрогеохимический мониторинг разработки нефтяной залежи горизонта Ю1 Верх-Тарского месторождения (Западная Сибирь) / Д.А. Новиков, С.А. Павлова, С.В. Рыжкова, А.С. Фаустова, А.А. Черников, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2020. № 17. – С. 406-410.

16. Новиков, Д.А. Состояние разработки залежи Ю1 Верх-Тарского нефтяного месторождения на январь 2019 года / Д.А. Новиков, С.А. Павлова, Д.Ю. Кузнецов, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, С.В. Рыжкова; Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2019. Т. 2. № 1. – С. 109-116.

17. Новиков, Д.А. Содержание редкоземельных элементов в подземных водах верхнеюрских отложений Верх-Тарского нефтяного месторождения (Западная Сибирь) / Д.А. Новиков, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев; Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2019. Т. 2. № 1. – С. 141-148.

18. Dutova, E. The HydroGeo Software Package and Its Usage / E. Dutova, A. Nikitenkov, K. Kuzevanov; E3S Web of Conferences. – 2019. V. 98.

ЭКОСИСТЕМНО-БАССЕЙНОВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ И СОХРАНЕНИЮ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВЫСОКИХ ГОР КЫРГЫЗСТАНА В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Оролбаева Л.Э.

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
Бишкек, Кыргызская Республика, orolbaeval@mail.ru

Аннотация. Природные факторы Тянь-Шаня предопределили закономерности формирования поверхностного и подземного стоков, их взаимосвязь, особенности распространения подземных вод. В горных геосистемах, таких как Тянь-Шань, водные ресурсы, их количество и качество в значительной степени зависит от состояния основных экосистем в зоне формирования стока, взаимосвязи подземных и поверхностных вод. В статье приводится обоснование необходимости управления водными ресурсами на основе комбинированного, геосистемного подхода, включающего экосистемные особенности в пределах бассейнов. Управление водными ресурсами межгорных бассейнов с самостоятельными водными циклами требует необходимости объединения управления водными ресурсами, землепользованием и экосистемами

Ключевые слова: *межгорные артезианские бассейны, горные экосистемы, управление питанием подземных вод, экологический сток.*

Abstract The natural factors of the Tien Shan predetermined the patterns of formation of surface and underground runoff, their interrelation, and the peculiarities of groundwater distribution. In mountain geosystems, such as the Tien Shan, the state of water resources, their quantity and quality is determined largely depends on the state of the main ecosystems in the runoff formation zone, the relationship of underground and surface waters. The article provides a justification for the need for water resources management based on a combined, geosystem approach that includes ecosystem features within the basins. The management of water resources of intermountain basins with separate water cykle requires the need to combine the management of water resources, land use and ecosystems.

Keywords: *intermountain artesian basins, mountain ecosystems, groundwater nutrition management, ecological flow*

Высокими горными системами считаются такие, которые возвышаются более 3 тыс. метров над уровнем моря и имеют хорошо выраженный нивальный пояс, покрытый вечными ледниками и снегом.

Высокие горные системы Тянь-Шань и Памир качественно отличаются от низких своей способностью улавливать влагу из верхних слоев атмосферы. представляют собой гигантские природные аккумуляторы пресной воды, переносимой воздушными массами преимущественно с Атлантического океана.

Горные системы вообще, а высокие горные системы, расположенные в аридной зоне, в особенности, отличаются крайне высокой степенью пространственной неоднородности, которая вообще встречается на поверхности Земли. На протяжении нескольких километров по вертикали и нескольких километров по горизонтали наблюдаются все переходы от жестких аридных условий континентальных пустынь через горные полупустыни, степи, луга, леса и субнивальному и нивальному поясу. Избыток тепла и недостаток увлажнения у подножий гор сменяется относительным избытком увлажнения и недостатком тепла на вершинах [1].

В горных геосистемах, таких как Тянь-Шань и Памиро-Алай, состояние водных ресурсов, их количества и качества определяется не только водопользованием, но и в значительной степени зависит от состояния основных экосистем в зоне формирования стока. Состояние горных ледников, снежников, а также лесного покрова высокогорья напрямую сказывается на региональных запасах водных ресурсов. Любые изменения, происходящие в горных экосистемах, имеющие природный или антропогенный характер влекут за собой изменения гидрогеосферы в целом и наоборот. В горах Кыргызской Республики формируется более 45 % всех водных ресурсов Центральной Азии. Более 4 % территории страны занято ледниками и снежниками, от водных запасов которых зависит окружающая среда, биоразнообразие, здоровье жителей и экономическая деятельность Кыргызстана, Казахстана, Узбекистана и Туркменистана. Значительные запасы подземных и поверхностных вод Кыргызской Республики полностью формируются в пределах собственной территории. Водных источников, поступающих извне в республику нет.

Естественный суммарный среднемноголетний годовой сток рек, формирующихся на территории республики, составляет 44,5км$^{3.}$, 1745 км^3 содержат озера и 650 км^3 сосредоточено в ледниках. Ледники Тянь-Шаня и Памиро-Алая являются источниками формирования стока рек Центральной Азии. Оледенение по речным бассейнам распределено крайне неравномерно (рис. 1).

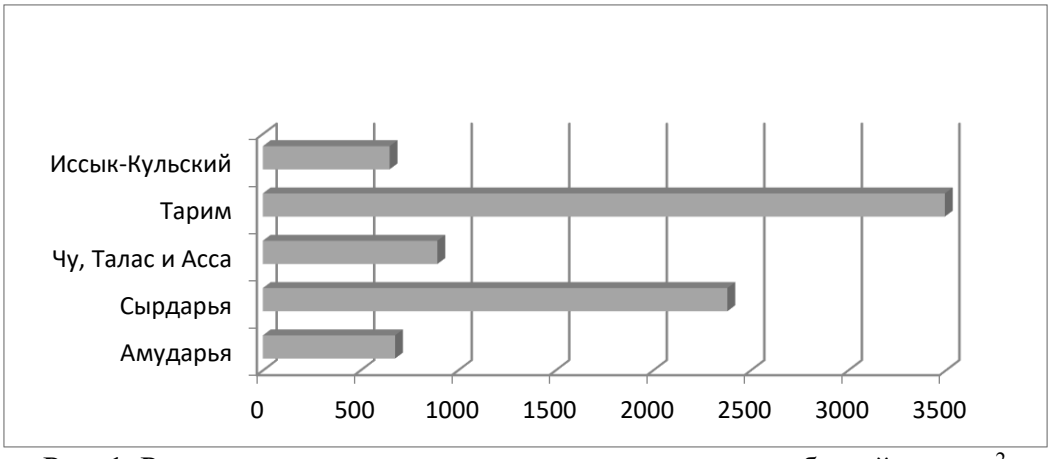


Рис. 1. Распределение оледенения по крупным речным бассейнам, км^2

Потенциальные запасы подземных вод оцениваются в 13 км^3. Разведанные по промышленным категориям эксплуатационные запасы пресных подземных вод, при непрерывном режиме водоотбора по 44 месторождениям составляют 188 м^3/с. Кыргызстан использует только 10-17% от имеющихся запасов, 90% из них расходуется на орошение [1].

Основные ресурсы подземных высококачественных пресных вод сосредоточены в межгорных артезианских бассейнах. Основная часть годового стока этих бассейнов формируется в высоких горах, и многие его параметры в значительной степени зависят от их экологического состояния.

Межгорные бассейны выделяются значительной мощностью осадочного чехла до 3-4 км, невыдержанностью по площади и разрезу водоносных и водоупорных пластов, блоковостью строения большинства структур, наличием в пределах межгорных впадин большого числа малых артезианских бассейнов с самостоятельными водными циклами [2].

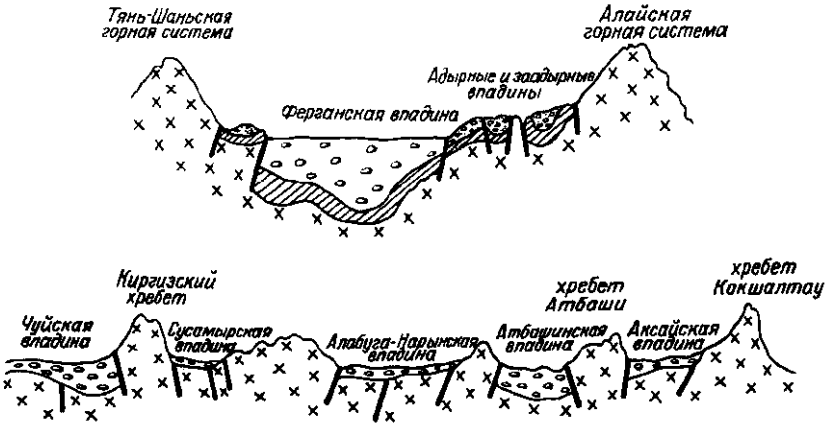


Рис.2. Схема Тянь-Шаньской горной системы [3].

Гидродинамические особенности межгорных бассейнов определяются их размерами, малыми расстояниями от области питания до области разгрузки в пределах 10- 60 км тесной взаимосвязью подземных вод с поверхностными водотоками и водоёмами.

В формировании подземных вод межгорных бассейнов значительная доля принадлежит инфильтрационным потерям из русел рек и временных водотоков. Поверхностные и подземные воды горных геосистем Тянь-Шаня и Памиро-Алая характеризуются теснейшей взаимосвязью, которая по течению рек неоднократно меняется и на смену участкам инфильтрационных потерь из русел рек, приходят участки разгрузки подземных вод в реки.

Подземные воды имеют практически повсеместное распространение в пределах межгорных бассейнов. Мощность эксплуатируемых водоносных горизонтов колеблется от 20 до 500 м в различных гидрогеологических зонах. В межгорных бассейнах до 75% расхода в естественных руслах рек идут на инфильтрацию и питание подземных вод, поэтому даже незначительные их изменения в верховьях речных систем напрямую влияют на расходы в среднем и нижнем течении. Наибольшее количество рек - 46% характеризуется ледниково-снеговым типом питания, 43% рек имеют снегово-ледниковое питание, значительно меньше рек снегового питания (10%), ещё меньше рек имеющих снегово-дождевое питание.

Широкое использование рек, связанное с безвозвратным водопотреблением и регулированием, изменяет структуру водного баланса межгорных бассейнов, приводит к сокращению питания подземных вод. Речной сток является важнейшим фактором формирования запасов подземных вод межгорных бассейнов Тянь-Шаня и Памиро-Алая,

в связи с чем, объём допустимого изъятия воды из водных объектов, показатель экологического стока является важной характеристикой для сохранения речных экосистем, регулирования естественного питания подземных вод [4,5].

В Водном кодексе Кыргызской Республики есть статья об обязательных экологических попусках в руслах рек, однако до настоящего времени нет утверждённых документов, регламентирующих объёмы экологического стока. За соблюдением режима экологических попусков фактически нет наблюдений и контроля. Значительное увеличение отбора подземных вод в межгорных бассейнах в последние годы, в совокупности с сокращением инфильтрационного питания из русел рек сопровождается снижением их уровня, что может привести в будущем к истощению запасов пресных подземных вод.

Одной из причин нарушения гидрологического режима в регионе является сокращение площади лесов, уменьшение лесистости горных территорий, где формируется сток горных рек.

Леса Кыргызстана в основном приурочены к горам. В северной части республики (Прииссыккулье, Нарынская область, склоны Кыргызского хребта) леса образованы в основном елью тянь-шаньской. В более сухих и жарких условиях Алайского хребта распространены арчовые леса, по долинам произрастают пойменные леса. На юге республики (Джалал-Абадская обл.) по склонам Ферганского и Чаткальского хребтов произрастают уникальные, единственные в мире по площади орехово-плодовые леса.

Причинами таяния ледников является конечно же глобальное потепление. Однако существует другая немаловажная причина. Это сокращение площади горного леса в зоне ледников. Лес увеличивает атмосферную влажность и осадки. Таким образом, лес предотвращает или, как минимум, замедляет таяние ледников. Сегодня лес составляет 5,6% от всей территории страны и продолжает сокращаться по причине экстенсивного животноводства и браконьерства.

Как показали результаты оценок, приведённых в Национальном сообщении об изменении климата [6] за последнее столетие количество осадков уменьшилось во Внутреннем Тянь-Шане. Абсолютные значения годового баланса массы ледников Тянь-Шаня уменьшаются с запада на восток, т.е. в том же направлении, что и годовая сумма осадков. Так, в высокогорной зоне Внутреннего Тянь-Шаня осадки местами значительно уменьшились (на 41-47%.) что существенно повысило аридность этой территории. Высока вероятность того, что это связано с существенным сокращением лесных массивов. На этой территории в военные и послевоенные годы сплошной и значительной вырубке подверглись лесные массивы ели и было утрачено 60% хвойного леса. В последующем в меньшем объёме производились лесовосстановительные работы [1,4,5].

В Кыргызстане 36% (около 160 тыс. га) арчевых лесов и половина ореховых и плодово-ягодных лесов утрачены с 1968 г. Так, например, площадь арчевых лесов сокращается со скоростью 0.8 % в год.

В настоящее время более трети домашних хозяйств Кыргызстана использует для отопления уголь или дрова, при этом заготовка топливной древесины относится к важнейшим факторам деградации лесов. Высокая пастбищная нагрузка на леса усугубляет деградацию, а также оказывает негативное влияние на восстановление лесов, замедляя рост самосева и подроста [7-10]

Расстройство растительного покрова наряду с сокращением площади ледников дополнительно снижает выпадение осадков в горах Леса и лесохозяйственные мероприятия оказывают значительное влияние на водные ресурсы. Результаты наблюдений показывают, что повышение лесистости водосборных бассейнов методом создания лесных культур приводит к увеличению суммарного значения стока [11].

Увеличение лесного покрова в горной зоне формирования стока увеличением количества осадков, понижением общей температуры воздуха будут способствовать

сохранению ледников, что может иметь положительный эффект на все бассейны рек Тянь-Шаня.

Исследования, проведённые в восточной части Прииссыккулья показали, что восстановление горных еловых лесов в относительно короткий срок способствуют увеличению стока, улучшению питания водотоков по сравнению с безлесными участками.

Таким образом, исходя из особенностей формирования водных ресурсов в межгорных бассейнах с замкнутыми гидродинамическими циклами, целесообразно бассейново-экосистемный подход к управлению питанием подземных вод.

Управление питанием подземных вод предназначено для регулирования питания подземных вод с целью увеличения объема водных ресурсов, улучшения качества воды в подземных горизонтах и регулирования возвратных вод с орошаемых территорий [12].

В пределах замкнутых межгорных артезианских бассейнах с самостоятельными водными циклами, характеризующихся синергетической связью между состоянием горных экосистем (ледников и леса), поверхностными и подземными водами, управление питанием подземных вод может быть весьма эффективным. Наибольшее значение при этом имеет восстановление хвойных лесов.

Увеличение лесистости в бассейнах горных рек путем создания смешанных насаждений позволит повысить водный сток рек: при увеличении лесистости от 10 до 60 % на каждые 10 % лесистости отмечается повышение речного стока на 7–10 мм. Например, для арчового пояса с годовой суммой осадков 500–600 мм количество дополнительной влаги составляет 50–150 мм, или 500–1560 м куб./га воды.

Речной сток является средообразующим фактором водной экосистемы. При изъятии речного стока в реке должен оставаться необходимый его объем, обеспечивающий нормальное функционирование водной экосистемы, и поддерживающий способность речной системы к самовосстановлению. Поэтому изъятие речной воды не должно приводить к снижению объема стока ниже экологически допустимого уровня.

Обязательные экологические попуски в естественных руслах рек должны стать предметом контроля и специального обоснования, учитывающего природные особенности межгорных бассейнов.

Требуется защита естественных лесных экосистем от чрезмерного антропогенного давления и, в первую очередь, от экстенсивного животноводства [13].

Необходимо восстановление хвойных лесов, в значительной степени влияющих на осадки в высокогрной зоне и баланс ледников. Для этого требуется увеличение площади горных хвойных лесов в высотном поясе от 2 до 3,5 тыс. метров над уровнем моря. Ниже, в интервале от 1,8-2 тыс. метров необходимо так же восстановление арчевых и орехово-плодовых, а также пойменных лесов и заложение плантаций быстрорастущих деревьев для получения древесины.

Заключение

В условиях горных стран, где состояние водных ресурсов определяется синергическими связями между всеми природными компонентами, комплексное управление водными ресурсами межгорных бассейнов требует необходимости объединения управления водными ресурсами, землепользованием и экосистемами. Управление горными лесными экосистемами, сопряжённое с управлением водными ресурсами бассейнов, позволит решать проблемы по увеличению питания подземных вод, снижения рисков паводковой и селевой опасности, эрозионных процессов.

Внедрение управления питанием подземных вод в межгорных бассейнах может значительно уменьшить последствия нарастающего дефицита водных ресурсов и улучшить управление водными ресурсами как на местном, так и региональном уровнях.

Список литературы

1. Оролбаева Л. Э. Геогидрология горных стран (на примере Тянь-Шаня и Памиро-Алая) / Л. Э. Оролбаева. – Бишкек: «Текник», 2013. – 185 с.

2. Барановская Е.И., Питьева К.Е., Оролбаева Л.Э. Условия формирования подземных вод артезианских бассейнов межгорного типа. / Е. И. Барановская, К. Е. Питьева, Л. Э. Оролбаева // Вестник Московского университета Серия 4 Геология. 2021.- № 4.- С.109-119.

3. Мангельдин Р. С. Ресурсы пресных подземных вод внутригорных впадин Тянь-Шаня / Р. С. Мангельдин Бишкек: Илим, 1991. – 148 с.

4. Оролбаева Л. Э. Техногенные трансформации гидрогеосферы Кыргызской Республики. / Л. Э. Оролбаева // Изв. Урал. гос. горн. ун-та (Екатеринбург). – 2018. – № 4. – С.67-71.

5. Оролбаева, Л. Э. Влияние изменения горных экосистем на трансформацию гидрогеосферы Тянь-Шаня и Памиро-Алая и формирование георисков / Л. Э. Оролбаева // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2018. – № 3. – С. 75-79.

6. Второе Национальное сообщение Кыргызской Республики по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата. - Бишкек, 2008 - 216с

7. Онучин А. А. Влияние лесистости и климатических факторов на годовой сток рек Прииссыккулья / А. А. Онучин, К. К. Гапаров, Н. А. Михеева // Лесоведение №6. - 2008. – С. 45-52.

8. Гапаров К. К. Влияние лесохозяйственных мероприятий на гидрологические и защитные функции еловых лесов Прииссыккулья / К. К. Гапаров // Национальная академия наук Кыргызской Республики Институт леса и ореховодства им. проф. П.А. Гана. - Бишкек, 2007 - 103с.

9. State of Forests of the Caucasus and Central Asia Нью-Йорк и Женева, 2019 United Nations, Geneva – 1822416 (R) – May 2019 – 441 – ECE/TIM/DP/72

10. Бикиров Ш. Б., Мурзакматов Р. Т., Уметалиева Н. К., Жумагул кызы, Бостоналиева К. К., Ашырова Б. Б. Биологическое разнообразие лесных экосистем Кыргызстана и их сохранение/ Ш. Б. Бикиров, Р. Т. Мурзакматов, Н. К. Уметалиева, Жумагул кызы Ы К. К. Бостоналиева, Б. Б. Ашырова // Сибирский лесной журнал. 2016. № 6. С. 3–12.

11. Snow-ice and water resources of Central Asia, Almaty, 2007. Shukurov, E. D., Mustafin, S., Major natural ecosystems and regional strategy for sustainable development of mountain regions of Central Asia).

12. Управление питанием подземных вод: решение проблемы дефицита водных ресурсов в Ферганской долине / Исследовательский отчет Международного Института Управления Водными Ресурсами 151 г. Коломбо, Шри Ланка 52 с.

13. Темиркулов А. «Зеленая» модель развития Кыргызской Республики «ТООТОКОЙ» / А. Темиркулов // Сборник аналитических статей «Перспективы Зеленой Экономики» «Argus Print» 2017. с 5-20.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И КОНДЕНСАЦИОННЫХ ВОД НА ОЗЕРНОМ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Плюснин А.М.[1,2], Дубенко К.А.[2], Украинцев А.В.[1], Чернявский М.К.[1], Чередова Т.В.[1,2]
[1]Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, plyusnin@ginst.ru
[2]Восточно-Сибирский государственный университет технологий управления, Улан-Удэ, dubenko.2002@inbox.ru

Аннотация. В статье представлены результаты изучения ореолов загрязнения воздушной среды над вскрышными породами и окисленными рудами Озерного полиметаллического месторождения. Показано, что в составе конденсационной влаги собранной над отходами добычи месторождения, обнаруживаются очень высокие концентрации токсичных химических элементов. Концентрация алюминия, фосфора, марганца, железа, меди, цинка, свинца и ртути превышает ПДК, установленных для вод рыбохозяйственных водоемов. Атмосферные осадки, выпадающие на территории ГОКа, содержат высокие содержания марганца, меди, цинка, ртути и свинца, которые могут загрязнять поверхностные воды, имеющие большое рыбохозяйственное значение.
Ключевые слова: *отходы добычи руд, токсичные элементы, конденсат, дождь, загрязнение*

Abstract. The article presents the results of a study of air pollution halos over overburden rocks and oxidized ores of the Ozernoye polymetallic deposit. It has been shown that very high concentrations of toxic chemical elements are found in the condensation moisture collected over mining waste. The concentration of aluminum, phosphorus, manganese, iron, copper, zinc, lead and mercury exceeds the maximum permissible concentrations established for the waters of fishery reservoirs. Atmospheric precipitation falling on the territory of the mining and processing plant contains high levels of manganese, copper, zinc, mercury and lead, which can pollute surface waters of great fishery importance.
Key words: *ore mining waste, toxic elements, condensate, rain, pollution*

Введение. Месторождение Озерное расположено в Западном Забайкалье на Витимском плоскогорье, на границе таежных и степных ландшафтов. Территория характеризуется среднегорным рельефом. Абсолютные отметки высот на месторождении от 1100 до 1335 м, относительные превышения над обширными плоскими котловинами составляют 250-300 м. Гидросеть развита слабо, северо-восточнее месторождения протекает р. Заза, которая впадает в р. Витим. На юго-востоке расположены озера Большое Еравное, Малое Еравное, Сосновое, Гунда и Исинга, имеющие большое рыбохозяйственное значение. Разработка месторождения может нанести вред состоянию окружающей среды за счет выбросов жидких и твердых аэрозолей от мест складирования вскрышных пород, склада окисленных руд, карьера и хранилищ отходов переработки руд. Проведенные исследования формирования потоков аэрозолей от некоторых объектов инфраструктуры имели цель определить точку отсчета загрязнения атмосферы до начала разработки месторождения.

Физико-географическая характеристика. Климат района резко континентальный, с сухой продолжительной зимой и коротким жарким летом. Зимой погоду определяет сибирский антициклон с преобладанием малооблачной погоды со слабыми ветрами и небольшим количеством осадков. В теплое время года усиливается циклоническая деятельность с заметным увлажнением. Многолетняя среднегодовая температура воздуха отрицательная. По данным метеостанции Усть-Заза она составляет -5,1 °С. Наиболее холодный месяц - январь, среднемесячная температура -5,4 °С, абсолютный минимум -50 °С. Самый теплый месяц - июль, среднемесячная температура 17,1 °С, абсолютный максимум 36 °С. Продолжительность безморозного периода от 33 до 50 дней. Годовая сумма осадков по данным ст. Усть-Заза колеблется от 170 до 387 мм. В теплый период (май-сентябрь) выпадает до 90 % годовой суммы осадков. Устойчивый снежный покров образуется в основном к началу ноября, и высота его редко превышает 10 см при максимальной средней декадной величине 29 см.

Многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение, мощность их в водораздельной части составляет 100-150 м, на склонах северной экспозиции 120-150 м, в Еравнинской и Зазинской впадинах 15-120 м. Под названными озерами располагаются сквозные талики. На склонах, в русловых частях рек и во впадинах, где имеются тектонические нарушения, имеются несквозные талики. Температура многолетнемерзлых пород по данным термокаротажа скважин на месторождении Озерное от -0,5 до -2,5 °С, в геотермической режимной скважине в с. Гунда -1,2 + -1,5 °С. Мощность сезонного протаивания пород от 1,5 м на залесенных северных склонах до 3 м на открытых участках и склонах южной экспозиции.

Геологическое строение. Месторождение Озерное является крупнейшим объектом рудного узла, который насчитывает 17 месторождений свинца, цинка, золота, железа, бора, барита, меди, марганца, апатита. Руды месторождения залегают в вулканогенных и вулканогенно-осадочных породах: туфах кислого и среднего состава, известковистых и углистых туффитах, известняковых брекчиях на туфовом цементе, известняках. Выделены три рудоносных уровня с интервалами 300-600 м. Первый уровень сложен колчеданно-полиметаллическими рудами собственно Озерного месторождения, залегающими до глубины 350 м. Второй объединяет бедные колчеданные руды, залегающие среди туффитов и туфолав на глубинах до 880 м. Третий представлен колчеданными и колчеданно-полиметаллическими рудами в туффитах в интервале глубин 950-1450 м. Протяженность рудных залежей по простиранию от 480-900 до 1900-2340 м при ширине в плане от 50-100 до 400-500 м. Внутреннее строение рудных тел неоднородное, с чередованием слоев колчеданно-полиметаллических руд, в различной степени оруденелых туфов, туффитов и известняковых брекчий.

Главные рудные минералы – это пирит и сфалерит, менее распространен галенит. Второстепенные минералы - магнетит, гематит, арсенопирит, халькопирит, блеклые руды, минералы серебра. Среди нерудных минералов преобладают сидерит, кальцит, доломит, барит, кварц, серицит и хлорит. Основная масса руд тонкозернистая и скрытокристаллическая. Характерны тонкое срастание сульфидов между собой и преобладающая малая крупность зерен (0,01-0,05 мм). Элементы-примеси - мышьяк, сурьма, германий, таллий.

С полиметаллическими рудами пространственно и генетически связаны зоны железисто-магнезиальных карбонатов и баритовой минерализации. На юго-восточном фланге сидеритовая минерализация сливается в единое рудное тело и заходит языками между пластовыми залежами колчеданных руд. Запасы сидеритовых руд составили 29 млн т, среднее содержание железа 30,7 % и марганца 3.9 %. Баритовая минерализация характерна для пород, подстилающих колчеданно-полиметаллические руды. Содержания барита варьируют в пределах первых процентов, редко достигая 10 %. На юго-восточном фланге распространены эпигенетические прожилки и редкие жилы средне-крупнокристаллического барита.

Нижняя граница зоны окисления располагается на глубине от 5 до 50 м, она характеризуется резким переходом от окисленных руд к первичным. В составе окисленных руд преобладают гидрооксиды железа. Свинец и цинк представлены плюмбоярозитом, смитсонитом, церусситом, англезитом и пироморфитом. Содержание свинца в окисленных рудах изменяется от 0,3 до 20 %, цинка от 0,3 до 1,8 % [1].

Освоение месторождения. С 2004 по 2018 год было возведено несколько объектов рабочей инфраструктуры, построены технологические автодороги и подготовлены площадки рудных складов. Проведено более миллиона куб. м вскрышных работ. В 2019 году Озерная Горнорудная Компания приступила к строительству инфраструктурных объектов. Один из факторов техногенного воздействия на окружающую среду - большие объемы отходов производства. Часть вскрышных пород, особенно в начальный период эксплуатации предприятия, будет использоваться для строительства и ремонта дорог,

зданий и сооружений, возведения дамб и др. инженерных сооружений. Хвосты обогащения будут складироваться в хвостохранилище.



Рис. 1. Схема опробования отходов добычи Озерного полиметаллического месторождения. Условные обозначения: 1- карьер, 2- вскрышные породы, 3- склад окисленных руд, 4- поселок, 5 – места опробования атмосферных осадков, 6- конденсационных вод, 7- не обнаружен конденсат, 8- временный водоток.

Методы исследования. На месторождении были отобраны пробы поверхностных вод, атмосферных осадков и собраны конденсационные воды. Конденсационные воды опробованы в пределах вскрышных пород и на складе окисленных руд. Атмосферные осадки собраны на территории хранения окисленных руд, они отбирались с помощью полиэтиленовой пленки площадью 1 м^2, методика отбора конденсационных вод приведена в работе [2]. Схема опробования приведена на рисунке 1. Химический состав вод проанализирован методом индуктивно связанной плазмы (аналитик Е.П. Чебыкин) [3].

Полученные результаты. Вдоль отвала вскрышных пород протекает временный водоток, который образуется в результате дренирования складированных пород, в понижении рельефа образована лужа, размер ее составляет 10х20 м. Температура воды составляет 11.7^{o}C, pH=9.3 (отобрана проба OV-1). В трех из пяти установленных конденсаторов в этом месте не удалось собрать воду, несмотря на залегание грунтовых вод на глубине 30-40 см. Вероятно, близкое залегание мерзлых пород не благоприятствует испарению воды. При опробовании участка складирования окисленных руд ночью прошел дождь с ветром. Два конденсатора были вскрыты, поэтому отобрано всего 3 пробы конденсационных вод. На этом участке в каждой точке установки конденсаторов отобраны атмосферные осадки. Таким образом, проанализирована одна проба поверхностных вод, пять проб атмосферных осадков, пять проб конденсационных вод. Результаты исследования микроэлементного состава представлены в таблице 1.

Общая минерализация атмосферных осадков изменяется от 2 до 35 мг/л, в среднем составляет 17 мг/дм^3. Минерализация конденсационных вод больше – достигает

значений 110-130 мг/л, в среднем 118 мг/дм^3. Общая минерализация воды временного водотока составляет 510 мг/дм^3.

Несмотря на низкие значения общей минерализации, содержание некоторых микроэлементов в пробах атмосферных вод значительно превышают концентрацию этих элементов в озере Байкал. Среди химических элементов выделяются высокими концентрациями марганец, железо, медь, цинк, свинец. Эти элементы входят в состав рудной минерализации месторождения и при ее окислительном разложении переходят в растворенное состояние, и далее при испарении формируют ореол загрязненных аэрозолей. Также в конденсационных водах отмечаются высокие содержания фосфора, алюминия, концентрация которых достигает десятков мкг/дм^3. Концентрация алюминия, фосфора, марганца, железа, меди, цинка, свинца и ртути превышает ПДК, установленные для вод рыбохозяйственных водоемов [4].

Обсуждение полученных результатов. Хотя разработка месторождения находится на начальной стадии, еще не работает обогатительная фабрика, нет склада хвостов обогащения, тем не менее происходит загрязнение атмосферы токсичными элементами. Жидкие аэрозоли, содержащие токсичные вещества, выделяются из вскрышных пород и из окисленных руд, складированных к северо-западу от карьера. Наиболее активно мигрируют в атмосферных потоках токсичные элементы в пределах склада окисленных руд. Собранные здесь атмосферные осадки содержат очень высокие концентрации марганца, цинка, свинца. Содержание ртути, которая относится к первой группе токсичных элементов, в выпавшем на этой территории дожде превышает предельно допустимые концентрации, установленные для вод рыбохозяйственного назначения в 16-35 раз. Естественно, и в поверхностном водотоке, который формирует ресурсы в районе складирования вскрышных пород, обнаружены высокие содержания ряда химических элементов, а содержание ртути превышает предельно допустимые концентрации в 12 раз.

Таблица 1. Микроэлементный состав атмосферных осадков и конденсационных вод на Озерном ГОКе, мкг/дм^3

Элемент	Предел обнаруж	ПДК	Байкал	Атмосферные осадки	Временный водоток, OV-1	Конденсационные воды				
						Вскрышные породы		Склад окисленных руд		
Be	0.001	0.3	0.0014	0.0023-0.005 0.003	<0.001	0.004	0.0026	0.009	0.0027	0.0019
B	0.08	100	5.8	2.1-2.7 2.5	5.1	9.2	84	26	4.7	2
Al	0.4	40	4.6	11.3-28 20.1	37	35	61	107	33	16
P	5	50	19	36-57 46.2	62	77	104	250	41	40
Ti	0.03	60	0.26	0.33-0.64 0.51	1.4	0.47	1.05	7.3	0.81	1.05
V	0.002	1	0.39	0/086-0.179 0.122	0.24	0.125	0.2	0.63	0.11	0.073
Cr	0.03	70	1.26	0.92-1.2 1.1	0.9	1.5	1.97	5.9	1.26	3.2
Mn	0.02	10	0.118	24-910 299	79	58	129	152	560	99
Fe	1	100	4.7	35-79 59	81	52	131	230	71	55
Co	0.001	10	0.05	0.16-1.9 0.61	0.46	0.24	0.37	1.62	0.99	1.25
Ni	0.3	10	<0.3	0.66-0.96 0.81	1.15	3.1	3.7	24	2.6	1.78
Cu	0.03	1.0	1.32	0.56-1.24 0.98	5.6	10.1	13.5	59	6.4	1.89
Zn	0.1	10	16.7	8.3-300 78	12.4	39	21	159	111	52
Br	0.3	1350	8.8	5.2-6.4 6.12	30	7.4	5.8	34	11.8	7.5
Rb	0.001	100	0.61	0.22-0.68 0.39	1.47	0.92	1.54	7.3	1.31	2.1
Ag	0.0009		0.0011	0.054-0.124 0.07	0.03	0.048	0.046	0.095	0.086	0.23
Cd	0.0007	5	0.003	0.1-2.5 0.82	0.17	0.85	0.4	0.86	2	2.1
Sn	0.005	112	<0.005	0.042-0.086 0.06	0.042	0.92	0.15	3	0.118	0.061
Cs	0.0005	1000	0.0011	0.012-0.41 0.02	0.008	0.025	0.022	0.036	0.05	0.145
Ba	0.004	740	10.4	13.8-39 28	66	127	145	70	68	92
W	0.0004	0.8	0.051	0.074-0.093 0.082	0.08	0.131	0.15	0.31	0.083	0.083
Au	0.0004		<0.0004	0.0008-0.0016 0.0011	0.005	0.0037	0.002	0.012	0.0026	0.002
Hg	0.02	0.01	<0.02	0.16-0.35 0.22	0.12	0.19	0.09	0.36	0.44	12.9
Tl	0.0003		0.001	0.101-1.9 0.75	0.13	0.051	0.141	0.2	1.8	2.7
Pb	0.002	6.0	0.078	3.9-68 28.6	2.8	17.9	7.3	67	67	90

Примечание: в числителе приведены минимальные-максимальные содержания, в знаменателе – среднее из 5 проб

Заключение. При разработке Озерного полиметаллического месторождения активизируется миграция токсичных химических элементов в воздушной среде. Потоками воздуха аэрозоли, выделяющиеся из отходов добычи руд, могут переноситься на большие расстояния, токсичные элементы могут нанести вред уникальным экологическим системам Еравнинских озер. Для исключения негативного воздействия окисленных руд необходима их своевременная рекультивация с перекрыванием непроницаемым для воды материалом.

Работа выполнена в рамках проекта АААА-А21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока.

Список литературы
1. Кислов Е. В., Плюснин А. М. Экологические проблемы освоения свинцово-цинкового месторождения Озерное (Западное Забайкалье) // География и природ. ресурсы. 2009. №2, с. 37-43.
2. Плюснин А. М., Воронина Ю. С., Украинцев А. В., Чернявский М. К., Перязева Е. Г., Чебыкин Е. П. Загрязнение атмосферы от хранилищ отходов добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд. Геохимия, 2023, том 68, № 12, с. 1295–1311. DOI: 10.31857/S0016752523110092.
3. Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В. и Грачёв М.А. (2012). Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам. Химия в интересах устойчивого развития. 20(5), 613-631.
4. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 "Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения" (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 N 45203)

ВОЗМОЖНОСТИ ВОДООТВЕДЕНИЯ ОЧИЩЕННЫХ БЫТОВЫХ СТОКОВ В ТРЕЩИНОВАТЫЕ ПОРОДЫ ПРИБАЙКАЛЬЯ (НА ПРИМЕРЕ ОЛЬХОНСКОГО РАЙОНА)

Попов В.Н.
ООО НПФ «Аквастрим», г. Иркутск, irk.popovvn@yandex.ru

Аннотация. Территория Прибайкалья, особенно Ольхонского района, активно посещается туристами. Существенно повышается техногенная нагрузка, особенно в тёплый период года. Предлагается способ утилизации жидких бытовых стоков путём закачивания их через скважины в трещиноватые горные породы после очистки до требований Рыбводхоза. Приводятся контраргументы противникам реализации этого подхода. Даётся пример опытной закачки вод в трещиноватые породы на острове Ольхон. Для получения лицензии на изучение и эксплуатацию участка недр, требуется разработать программу контроля качества очищенных жидких бытовых стоков, а также программу мониторинга для участка недр трещиноватых пород.
Ключевые слова. *Ольхон, подземный сток, трещиноватые породы, очищенные бытовые стоки.*

Annotation. The territory of the Baikal region, especially the Olkhon district, is actively visited by tourists. The technogenic load increases significantly, especially in the warm season. A method is proposed for the disposal of liquid domestic wastewater by pumping them through wells into fractured rocks after cleaning up to the requirements of the Fish Farm. Counterarguments to the opponents of the implementation of this approach are given. An example of experimental injection of water into fractured rocks on the island of Olkhon is given. To obtain a license for the study and operation of a subsurface area, it is required to develop a quality control program for purified liquid domestic wastewater, as well as a monitoring program for a fractured rock subsurface area.
Keywords. *Olkhon, underground runoff, fractured rocks, purified household drains.*

Гидрогеология и гидрология Прибайкалья изучена достаточно подробно. Наряду с основным питанием оз. Байкал за счёт впадающих рек и ручьёв имеет место подземный сток, который составляет до 5% от общего количества вод, наполняющих озеро [1]. Минеральный состав подземных вод отличается от состава поверхностных вод Байкала. При низком значении модуля подземного стока для острова Ольхон менее 1,0 л/с. км2 состав подземных вод, длительное время взаимодействующих с вмещающими породами, имеет следующие значения: водородный показатель 6,6-8,0 ед РН, общая минерализация 288-464 мг/дм^3, жёсткость 3,7-5,7 мг-экв/дм^3, кремний 6,6-9,6 мг/дм^3, железо 0,05-0,2 мг/дм^3. Для поверхностных вод в районе острова Ольхон характерны следующие показатели: водородный показатель 7,2-7,5 ед РН, общая минерализация 128,2 мг/дм^3, жёсткость 1,1 мг-экв/дм^3, кремний 1,6 мг/дм^3, железо 0,03 мг/дм^3. Общий объём воды в

Байкале около 23 тысяч км^3. При этом доля подземного стока составляет не менее 1,1 тыс. км^3 [2]. Это количество растворяется в оз. Байкал без какого-либо изменения в составе поверхностных вод.

В Ольхонском районе проживает порядка 10 тысяч человек. За счёт туристов количество проживающих, особенно в тёплое время года, увеличивается многократно. Техногенная нагрузка на территорию Ольхонского района, где основную часть занимает Прибайкальский национальный парк, существенно возрастает. Важной проблемой стало водоотведение жидких бытовых стоков. Согласно приказу МПР №83 от 21.02.20г., очищенные жидкие бытовые стоки до требований Рыбоводхоза, допускается сбрасывать в реки, впадающие в оз. Байкал. Однако, закачивать их в трещиноватые породы через скважины, расположенные достаточно далеко от берега, почему-то нельзя. Хотя прямого запрета на эту процедуру нет, но и разрешения тоже нет. Невозможно даже получить лицензию для изучения участка недр, где предполагается закачивать очищенные бытовые стоки в трещиноватые породы. Этот вариант утилизации очищенных бытовых стоков никогда и никем не рассматривался.

Складывается абсурдная ситуация. В поверхностные водотоки очищенные воды сбрасывать можно, а в трещиноватые породы, где формируется подземный сток, нельзя. Как быть на Ольхоне, где практически нет поверхностных водотоков? Да и на побережье Байкала, где расположено большинство рекреационных объектов, поверхностных водотоков мало.

В официальном ответе 16.08.2023 №15-4730554 Министерства природных ресурсов и экологии РФ поддерживается решение ФГКУ «Росгеолэкспертизы» об отказе получения лицензии на изучение условий данного подхода к утилизации бытовых стоков. При этом ссылаются на заключение ФГУП «Гидроспецгеологии», где приводится ссылка на карты условий захоронения промышленных отходов, согласно которым территория острова Ольхон отнесена к «- бесперспективным для размещения жидких промышленных отходов в связи с разнообразием гидрогеологических условий, обусловленных сейсмической активностью, наличием тектонических разломов, островным распространением многолетних мёрзлых пород…». Достаточно пояснить, что на острове Ольхон никогда не было островной многолетней мерзлоты, даже глубина сезонного промерзания вследствие отепляющего воздействия озера Байкал намного меньше, чем на материке, окружающим озеро Байкал.

При чём здесь промышленные отходы? Речь идёт о бытовых стоках, очищенных до рыбохозяйственных значений, т.е. таких значений, класс опасности которых не превышает V класс. Согласно постановлению Правительства РФ от 31.12.2020г. №2399 «Об утверждении перечня видов деятельности, запрещённых в центральной экологической зоне Байкальской природной территории» запрещено размещение отходов производства и потребления, за исключением отходов 1V и V классов опасности на специально оборудованных объектах.

Метод утилизации жидких производственных и бытовых стоков путём создания полигонов по закачиванию их в недра широко используется в России. Как отмечает в своей работе Альфия Бадретдинова, полигоны утилизации хозяйственно – бытовых стоков стали единственной возможностью решения экологических проблем в г. г. Губкинский, Тарко–Сале Ямало–Ненецкого АО и др. всего более 20 полигонов, не считая десятков в нефтегазовой отрасли. По мнению автора подземное захоронение жидких стоков является практически единственным способом их утилизации. Многолетний отечественный и зарубежный опыт эксплуатации полигонов показал их исключительную санитарную и экологическую эффективность и безопасность, а также по сравнению с другими методами низкую капиталоёмкость.

Однако в сравнении с закачиванием и захоронением стоков в поглощающий горизонт, который предполагает высокие ёмкостные и фильтрационные параметры,

обеспечивающие закачку заданного объёма очищенных сточных вод, в нашем случае предполагается модель, где из заполненного поглощающего горизонта - подземного резервуара, происходит транзит в поверхностный водоём. При этом закаченные очищенные бытовые стоки смешиваются с подземными водами в течение длительного времени.

Влияния на химический состав вод оз. Байкал различных по составу вод промышленных, хозяйственно – бытовых и др. отходов изучено в малой степени и требует дополнительных исследований. Воздействие на уникальный состав природных вод оз. Байкал таких «монстров» как Селенгинский целлюлозно-картонный комбинат, Байкальский БЦБК (хотя он и прекратил деятельность, его отходы с накопительных отстойников до сих пор сливаются в оз. Байкал), отходов от деятельности городов Северобайкальск, Слюдянка, Бабушкин, Нижнеангарск, Выдрино, Листвянка и других посёлков, деревень, многочисленных турбаз, не считая «диких» туристов, размещающихся сотнями на берегах озера, настолько велико, что требует кардинальных мер на правительственном уровне, чтобы хотя бы уменьшить негативное влияние на водную среду Байкала.

В настоящее время наиболее крупные объекты рекреации, расположенные на острове Ольхон туристические базы, отели и др. откачивают жидкие бытовые стоки и вывозят через паром на полигон отходов «Имел-Кутул». Полигон «Имел-Кутул» для складирования твёрдых и жидких бытовых отходов находится в верховьях одноимённой пади, на расстоянии 6,5 км от Байкала: координаты : СШ $52^0\,27'\,14{,}37''$ ВД $106^0\,41'\,12{,}22''$, абсолютная отметка 686 м. Оформление и организация его началась в 2006 г., функционирует с 2012г. На этом полигоне наряду с площадками размещения твёрдых бытовых отходов имеются специально подготовленные траншеи куда сливают жидкие бытовые стоки. Жидкая фаза со временем испаряется, а твёрдая остаётся в траншеях. По мере накопления твёрдой составляющей жидких отходов траншеи обновляются. Следует отметить, что породы в основании полигона «Имел–Кутул» до глубины 131 м водонепроницаемые и загрязнение глубоких горизонтов не происходит [3].

Большая часть мелких туристических баз на острове Ольхон и прилегающем побережье оз. Байкал, залив Мухор и др. для складирования жидких бытовых стоков используют обычные «выгребные» ямы, зачастую даже без изоляции от вмещающих пород. Организованных септиков крайне мало.

В настоящее время администрацией Ольхонского района прорабатывается вариант создания прудов - испарителей, которые будут заполняться очищенными до требований Рыбводхоза жидкими бытовыми стоками. Организация подобных сооружений является дорогостоящим предприятием, необратимо изменяющим ландшафт на достаточно большой площади. Национальный парк даже согласовал четыре участка для сооружения прудов-испарителей. Реализация этого проекта нанесёт непоправимый вред природному ландшафту.

Концепция АО «Инжпроектсервис» наиболее привлекательна в плане наименьшего воздействия на экологию Прибайкалья. Предлагается создать каскад канализационных станций и напорных трубопроводов из района посёлка Листвянка до иркутских очистных сооружений правого берега Ангары. Транспортировка не очищенных бытовых стоков до Листвянки будет осуществляться танкерами водоизмещением около 300 тонн. Также предполагается, особенно в зимнее время, использовать суда на воздушной подушке с технологическими ёмкостями около 10-20 тонн. Загрузка танкеров и судов бытовыми стоками будет осуществляться из аккумулирующих резервуаров. Как говорят сами авторы, «это не простая и технологически сложная задача, требующая больших затрат».

АО «Корпорация Туризм РФ» рассматривает вариант транспортировки очищенных бытовых стоков по трубе до верховьев р. Лена, где и будет осуществляться сброс. Предполагается сложная система логистики для доставки и аккумуляции бытовых

стоков до самой трубы. Каким - то образом будет происходить очистка бытовых стоков и которые большим количеством перекачивающих станций, дюкеров и других инженерных сооружений будет доставляться с Ольхонского района до р. Лена. Несостоятельность этой идеи очевидна.

Нами предлагается наиболее дешёвый и абсолютно безопасный для экологии подход, который позволит в короткие сроки и на различных объектах туризма и населённых пунктов утилизировать жидкие бытовые стоки путём закачивания их в трещиноватые породы после очистки до требований Рыбводхоза.

Зона повышенной трещиноватости сформировалась на побережье оз. Байкал в результате постоянных землетрясений, количество которых порядка 2 тысяч в год. Наряду с участками повышенной трещиноватости есть участки монолитных пород с очень небольшим количеством трещин, практически водонепроницаемых [3].

Данные по водозаборным скважинам на побережье оз. Байкал и острове Ольхон свидетельствуют о том, что есть участки, где коэффициент фильтрации изменяется от 10–50 м/сут до участков с коэффициентом фильтрации 0,5– м/сут. Так как коэффициент фильтрации следует принимать, когда вода полностью заполняет трещины (пустоты) породы, то в нашем случае, когда пустоты в породе не заполнены полностью, правильнее будет говорить о коэффициенте влагопроводимости. Приводим пример определения приёмистости пород при принудительной закачке в трещиноватые породы для худших условий по проницаемости. Под приёмистостью в данном случае понимается способность трещиноватых пород поглощать под давлением определённое количество воды в единицу времени.

Опыт проводился в 2022 г. на территории гостиницы Байкал-Вью, находящейся в 3,5 км южнее п. Хужир острова Ольхон. Опытная скважина № 3 находится на расстоянии 700 м от уреза воды оз. Байкал. Глубина скважины 122 м. Сверху, до глубины 80 м глины неогеновые, буровато-серые, очень плотные, водонепроницаемые. В интервале 80–122 м протерозойские гнейсы, хорошо трещиноватые до глубины 117 м. Обсадные трубы глухие диаметром 127 мм, установлены с поверхности +0,5 м до глубины 91 м. Ниже ствол скважины открытый. Водоносный горизонт находится сразу под толщей глин в интервале 80–122 м. Воды напорные, статистический уровень установился на глубине 16,9 м, что соответствует абсолютной отметке 456,27 м.

Опытно-экспериментальные работы заключались в определении приёмистости трещиноватых гнейсов путём принудительной закачки воды в скважину №3. Вода поступала по полиэтиленовой трубе диаметром 32 мм из водозаборной скважины № 1, расположенной выше по склону на расстоянии 190 м от скважины № 3. Оголовок скважины № 3 герметизирован, чтобы вода под давлением поступала непосредственно в горизонт трещиноватых пород. Перед оголовком скважины в полиэтиленовой трубе установлен манометр марки HP1/4” x6 бар (50 мм) для определения давления и водосчётчик СВМ-25 для определения количества вода, закачиваемой в скважину. Давление воды в водопроводящей трубе регулировалось насосной станцией марки AL-KO HW 4500 FCS и составляло от 2,5 до 3,2 атм., причём максимальное давление 3,2 достигалось за 6-7 минут, затем давление падало до уровня 2,5 атм. гораздо быстрее, за 1 минуту. Такой режим был выбран, чтобы не нарушать герметичность водовода и оголовка скважины. Соответственно количество закачиваемой воды также изменялось, но незначительно.

Опытные работы проводились в два этапа в начале июня, продолжительностью всего 3 суток, так как водозаборная скважина №1 задействована для обеспечения нормальной работы гостиницы Байкал-Вью. Основные работы были продолжены в период с 15 октября по 20 ноября 2022 г., то есть больше месяца. При этом отмечался установившийся квазистационарный объём закачиваемых вод в пределах 20-26 $м^3$/сут.

В начале опыта объём закачиваемых вод составлял 20-22 м^3/сут, затем он постепенно увеличивался и в конце экспериментальной закачки равнялся 26 м^3/сут. Общий объём закаченных в трещиноватые породы воды равен 870 м^3 за 36 суток.

Для практических целей в гостинице Байкал-Вью необходимо утилизировать максимально до 36 м^3/сут очищенных бытовых стоков. Поэтому, в данном случае необходимо соорудить ещё одну нагнетательную скважину, на расстоянии 60 м к юго-западу от скважины №3 в пределах территории, отведённой гостинице Байкал-Вью.

Важным вопросом является время поступления очищенных бытовых стоков в оз. Байкал. Во время гидрогеологических исследований на участке недр гостиницы «Байкал Вью» была выполнена инструментальная привязка абсолютной отметки уреза оз. Байкал и устьев скважин. На момент выполнения работ абсолютная отметка уровня подземных вод была равна уровню озера. Ориентировочный расчет времени достижения до уреза оз. Байкал закачиваемой воды в одиночную скважину в условиях полуограниченного пласта с границей постоянного напора, без учета несовершенства ложа (ΔL) акватории озера выполняется по формуле:

$$T = \frac{2\pi m \mu R^2}{3Q}$$

где m – мощность водоносной зоны трещиноватости под толщей глинистых пород (средняя мощность 83 м, минимальная 50 м);

μ - величина активной водоотдачи водовмещающих пород (средняя - 0,012, минимальная – 0,004);

R – расстояние до уреза оз. Байкал без учета ΔL (700 м);

Q – расчетный объем закачки очищенных стоков (30 м^3/сут).

Определим время достижения закачиваемой воды в нагнетательную скважину при средних и минимальных расчетных показателях.

При средних значениях:

$$T = \frac{2 \times 3{,}14 \times 83 \times 0{,}012 \times 700^2}{3 \times 30} = 34054 \text{ суток} \approx 93 \text{ года}$$

При минимальных значениях:

$$T = \frac{2 \times 3{,}14 \times 50 \times 0{,}004 \times 700^2}{3 \times 30} = 6838 \text{ суток} \approx 19 \text{ лет}$$

Если приёмистость скв. № 3 достигает 24 м^3/сут при соответствующем давлении 2,5–3,2 атм для худших условий, где коэффициент фильтрации равен 0,5 м/сут, то на участках трещиноватых пород с коэффициентом фильтрации более 10 м/сут приёмистость трещиноватых пород будет намного больше. Следует также учесть, что давление в водоподводящей трубе можно увеличить за счёт прочности материала, объём закачиваемых вод также существенно увеличится.

Кроме выяснения возможностей приёмистости трещиноватых пород нужно рассмотреть подходы к способам очищения жидких бытовых стоков до требования Рыбводхоза, контролю качества очистки и мониторингу процедуры закачиваемых в недра очищенных вод. Для очистки жидких бытовых стоков возможно привлечь любые предприятия, которые могут подготовить и поставить модульные установки очищающие жидкие бытовые стоки до требований Рыбводхоза любой производительности. Получение лицензии на изучение условий реализации этого проекта, а также для получения лицензии на использование участка недр, необходимо разработать и согласовать в Роспотребнадзоре программу контроля качества очищенных бытовых стоков, а также программу мониторинга на участке трещиноватых пород. Последняя должна быть согласована в Центр Сибнедра.

Участки недр для размещения скважин нагнетающих очищенные бытовые стоки в трещиноватые породы следует размещать вне зоны влияния водозаборов для питьевых

целей. Гидрогеологические условия Прибайкалья позволяют определить участки, исключающие их взаимовлияние за счёт изоляции практически непроницаемыми метаморфическими породами или неогеновыми глинами.

Реализация данного подхода к утилизации бытовых стоков позволит существенно улучшить экологическую обстановку в Ольхонском районе, без нарушения ландшафта в центральной экологической зоне Байкальской природной территории, а также озера Байкал, как объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО.

Для проведения пионерных опытных работ нами предполагается на уже подготовленном участке недр, территории гостиницы Байкал–Вью выполнить полный комплекс утилизации жидких бытовых стоков. Количество очищенных бытовых стоков 30 - 36 м^3 при небольшом модуле подземного стока, после смешивания их с природными подземными водами никоим образом не повлияют на качество питьевых подземных вод и не изменят в худшую сторону состав вод Байкала.

Список литературы

1. Естественные ресурсы подземных вод юга Восточной Сибири. Изд. Наука. 1976 г. 128 с.

2. Галазий Г.И. Байкал в вопросах и ответах. Иркутск. Восточно -Сибирское книжное издательство. 1987г. 384 с.

3. Попов В.Н. Гидрогеологическое обоснование размещения полигона для складирования и утилизации твёрдых и жидких бытовых отходов в Ольхонском районе. Подземная гидросфера. XXIII совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. 2021. С. 532-533.

ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ РЕГИОНАЛЬНОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОДАХ НА УЧАСТКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Пушкарева О.В.[1], Караулов В.А.[1], Минин А.В.[2], Красильников В.Я.[2], Неуважаев Г.Д.[3], Озерский Д.А.[3]

[1] Акционерное общество «Красноярскгеология», Красноярск, pov@krasgeo.ru

[2] ФГУП «НО РАО», г. Москва, avminin@norao.ru.

[3] Институт безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, oda@ibrae.ac.ru,.

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены результаты опытно-фильтрационных работ в наклонных скважинах глубиной до 165 м в составе разведки Енисейского участка, которые позволили уточнить фильтрационные характеристики и зависимости в зоне развития трещинного коллектора в архейских породах. Полученные данные уточнили проницаемость, водообильность и водопроводимость пород, проследить закономерности в изменениях быстроменяющихся показателей, выявить общности по свойствам для дальнейшего использования при моделировании геофильтрации.

Ключевые слова: *ПИЛ, разведка участка, опытно-фильтрационные работы, наклонные скважины.*

Abstract. In this article, the results of flow experiments in inclined boreholes up to 165 m deep as part of the geological exploration of the Yeniseiskiy site are considered. which made it possible to detalize the flow characteristics and dependencies in the zone of a fractured reservoir in Archean rocks. The data obtained clarified the permeability, water content and conductivity of rocks, to trace patterns in changes in rapidly changing indicators, to identify commonalities in properties for further use in modeling.

Key words: *URL, geological exploration, flow experiments, inclined boreholes.*

Прогнозные гидрогеологические расчеты для обоснования долговременной безопасности глубинного захоронения радиоактивных отходов 1-го и 2-го классов опасности (РАО) являются основой для принятия решений по объектному проектированию, конструированию и управлению. Более того, именно реакция геофильтрационной среды на захоронение пристально рассматривается научным и общественным сообществами и является базой аргументации самой возможности захоронения. Прогнозирование осуществляется методами математического моделирование фильтрационных и миграционных процессов и, естественно, что качество получаемых расчетов напрямую связано с качеством данных, закладываемых в модель [7].

Комплексной программой исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО на Енисейском участке в Красноярском крае, реализуемой Госкорпорацией «Росатом» и научным руководителем создания ПИЛ – ИБРАЭ РАН, заявлено доизучение принципиальных (с точки зрения долговременной безопасности захоронения РАО) параметров геологической среды, в т.ч. уточнение фильтрационных и миграционных параметров геологических элементов в зонах разрывных нарушений и повышенной трещиноватости, непосредственно на участке строительства и в области потенциального влияния проектируемого ПГЗРО [1].

Учитывая большую площадь дальней зоны объекта захоронения, получение экспериментальных данных является наиболее значимой проблемой таких обоснований. В случае рассмотрения объекта на Енисейском участке в Красноярском крае – подземная исследовательская лаборатория, как базиса строительства будущего пункта глубинного захоронения – дальняя зона примерно определена. Она занимает более 170 км^2 [4] и распространяется на территории, изученной весьма неравномерно.

Данный факт отражен в действующем в отношении Енисейского участка документе – Протоколе ФБУ «ГКЗ» от 03.02.2016 № 4523-пс. В нем рекомендовано провести гидрогеологические исследования по направлению линии разгрузки потока подземных вод от участка «Енисейский» до р. Енисей, определение возраста вод по линии разгрузки потока подземных вод в р. Енисей, определение сорбционных свойств массива на участке распространения загрязненных подземных вод от объекта до зоны разгрузки потока подземных вод в р. Енисей, получение воднобалансовых характеристик, необходимых для создания численной математической модели процессов фильтрации и миграции [5], т.е. по сути, повысить качество исходной информации для моделирования. К тому же, указанные направления исследований стали задачами разведочной стадии геологического изучения недр (ГИН) на Енисейском участке [6].

В 2023 г. в составе проекта разведки Енисейского участка для захоронения радиоактивных отходов, получившего положительное экспертное заключение в Уральском территориальном отделе ФГКУ «Росгеолэкспертиза», предусмотрены мероприятия для реализации указанных задач: расширена площадь проведения ГИН, которая позволит проводить буровые и опытно-фильтрационные работы, оценивая профили в направлении основных дренирующих зону водных объектов – р. Енисей и р. Шумиха, сконцентрированы в пределах зоны захоронения картировочные буровые работы с целью подтвердить и детализировать структурно-тектонические особенности участка строительства, запроектировано изучение ранее выделенных гидрогеологических элементов поинтервальными испытаниями в скважинах и при проходке стволов.

Пилотной работой, открывающей разведку Енисейского участка, стало наклонное картировочное бурение 10 скважин со вскрытием зоны региональной трещиноватости в архейских породах, зафиксированная на поисковых стадиях на глубинах до 150 м в зависимости от особенностей рельефа. В этой зоне пакерными исследованиями в интервалах по 50 метров была выделена зона водообмена со значимыми коэффициентами фильтрации.

Поисковые и оценочные работы на Енисейском участке зафиксировали относительно водоносную зону экзогенной трещиноватости раннеархейских пород [3]. Геологически она представлена биотитовыми и силлиманит-кордиерит-биотитовыми плагиогнейсами, биотит-кварц-плагиоклаз-кордиеритовыми и плагиоклаз-биотит-кварцевыми кристаллическими сланцами и секущими их дайками долеритов и габбро-диабазов. Структура потока подземных вод представляет собой водопроводящие тонкие линзы субгоризонтального направления, образованных за счет микротрещиноватости, возникшей в результате внутреннего напряженного состояния массива. Попытки возмущения горизонта кустовыми экспериментами не давали конкретных результатов и установили сложную взаимосвязь в вертикальных составляющих возможных перетоков.

Именно в этой зоне формируются воды, потенциально контактирующие с трещинными водами относительно непроницаемой зоны архейских пород, расположенных на глубинах более 200 м, в которой и будет размещен объект (450-525 м от поверхности). Их взаимодействие необходимо доизучить, хотя по имеющимся данным оно оценивается на уровне не более 3%. Тем не менее при постановке задачи моделирования этой зоной нельзя пренебречь или учесть ее укрупненно, т.к. процесс массопереноса в таком обширном массиве рассматривается стохастическим. Более того, разломы и системы трещин, по контактам которых возможна фильтрация, превалируют непосредственно в толще до 150 м, что подтверждено и площадными геофизическими исследованиями, и каротажами скважин.

Безусловно, крайне важным является уточнение геологической модели участка [2], которая создает основу для построений массива и без которой качественной фильтрационной модели не получить. Поэтому наклонное бурение выполнено с полной ориентировкой и геомеханической документацией керна скважин.

Пробные откачки проводились непрерывно, на одно максимально возможное понижение. Длительность откачек составляла 1 сутки, но увеличивалась по необходимости. При интрепретации установлена достаточно сильная неоднородность результатов: коэффициент фильтрации (рассчитанный по мощности водоносных зон по каротажным диаграммам) варьирует в пределах 0,003–1,58 м/сут при среднем 0,35 м/сут, водообильность водоносных зон пестрая, удельные дебиты скважин изменяются от 0,005 до 0,08 л/с на метр понижения. Во всех скважинах наблюдалось проявление границ с более проницаемыми водоносными зонами (выполаживание графиков понижения). Наиболее вероятно, что таковыми являются зоны экзогенной трещиноватости, что характерно для пород архея и протерозоя в рассматриваемой геологической области. Прямая гидравлическая связь особенно явно проявилась при откачке скважины С-2, где наблюдалось парадоксальное повышение уровня в ходе откачки, что может объясняться только временным увеличением питания водоносной зоны за счет инфильтрации обильных атмосферных осадков.

Выполненные наблюдения за температурой подземных вод показывают, что в изученном интервале глубин наиболее низкие значения отмечаются при откачках из скважин, где выделенные водоносные интервалы залегают ниже по глубине. В процессе откачки происходит незначительный нагрев воды за счет нагрева насоса, а концу восстановления происходит понижение температуры ниже, чем перед проведением испытания, в том числе и за счет охлаждения пород, разогретых трением бурового снаряда. Наблюдения за неустойчивыми показателями откачиваемой воды показывают, что величина pH и электропроводность, в процессе ОФР остаются практически неизменными, а величина окислительно-восстановительного потенциала (Eh), являющегося положительным, к концу откачки часто возрастает, по-видимому, за счет извлечения более «молодых», в том числе и промывочных вод.

По водопроницаемости (по величине коэффициента фильтрации) грунты водоносных зон по ГОСТ 25100 -2011 относятся: в скважинах С-1, С-5 к водонепроницаемым; в скважинах С-2, С-6, С-9, С-10 к слабоводопроницаемым; в

скважинах С-3, С-4, С-7, С-8 к водопроницаемым. Неравномерность показателей проницаемости в пределах участка площадью 1,75 км^2 связана с невыдержанность систем трещин как в плане, так и по глубине. Зоны экзогенной трещиноватости наиболее выражены в локализациях склонов и врезки водотоков, а на повышениях рельефа – слабее. Водопроводимость приурочена к верхней части разреза и на 95% обеспечена до глубины 90 м, ниже – встречается эпизодически и во всех случаях происходит по контакту разрывных нарушений (рис. 1). В то же время, тектонические элементы не обязательно обводнены (не более 25% на глубине и только в половине по всей толще), т.к. они залечены в относительно древних периодах.

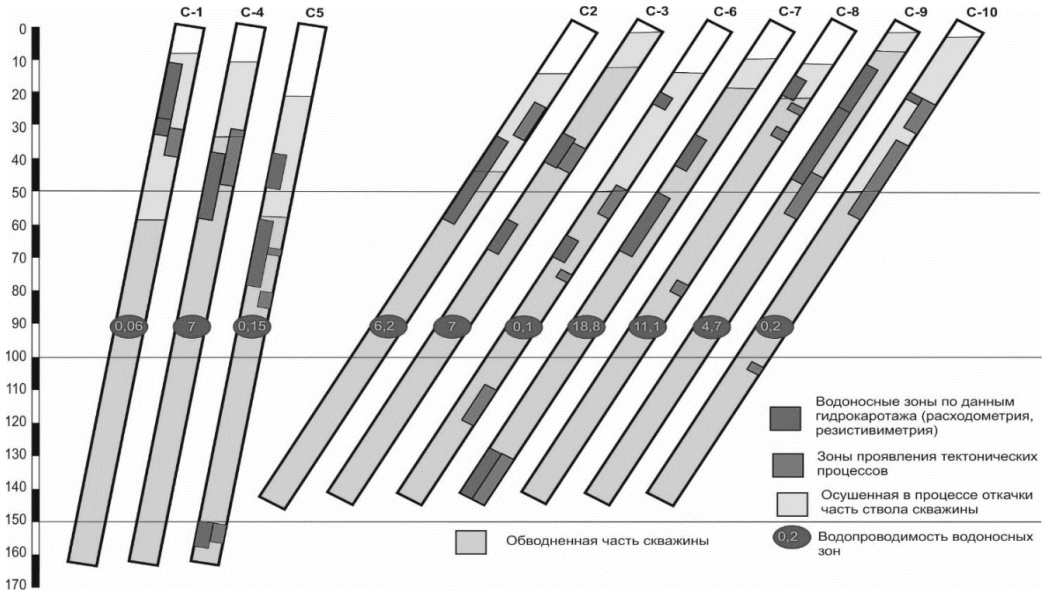


Рис.1. Расположение зон проявления тектонических процессов и зон водопритоков

При анализе колонок скважин в совокупности с геофизическими данными о распространении водоносных трещинных систем выявлено, что расположение зон водопритоков далеко не всегда совпадает с зонами проявления тектонических процессов, а также наличие протяженных тектонических зон не обеспечивает повышенную водообильность скважины. В процессе проведения работ других особенностей пород, маркирующих повышенную водообильность разреза скважин, в изученном интервале глубин также не выявлено.

Выводы о несовпадении зон трещиноватостей и водоносных коллекторов становятся подтверждением тезиса об отсутствии незалеченных разрывных нарушений в толще пород архейского возраста на Енисейском участке даже на небольших глубинах. С ее нарастанием монолитность пород увеличивается, и тектоника выражена еще слабее. Однако в отдельных случаях, именно по контактам даек фиксируются повышенная водопроницаемость, которую необходимо будет учесть в модели геофильтрации в районе ПИЛ/ПГЗРО для последующей оценки долговременной безопасности проектирумого объекта. В дальнейшем планируется развитие DFN (Discrete Fracture Network) подхода [8]. Модели DFN основаны на явном представлении отдельных трещин в массиве горных пород. Эти модели отражают сложную геометрию, ориентацию и связность трещин, что позволяет детально проанализировать пути потока от проектируемого ПГЗРО до потенциальной зоны разгрузки. С помощью расчетного кода GeRa [9] планируется развивать разработанные модели на сегодня [10] в рамках DFN подхода.

Впереди разведочное бурение на большие глубины с обязательным выполнением ОФР, кроме того, гидрогеологические работы обязательны к выполнению при проходческих работах. Ожидаемая геологическая и гидрогеологическая информация при

проходке впервые будет получена при разведке объекта недропользования, не связанного с добычей полезных ископаемых, и использована для обоснования разведочных кондиций объекта – подземной исследовательской лаборатории на енисейском участке.

Список литературы

1. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастерплан исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 32-41.

2. НП-100-17. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов.

3. Озерский А.Ю., Полякова Е.Г. История, результаты и проблемы геологического изучения Енисейского участка для захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Томск. 2021. Т.1. С. 443-447.

4. Озерский Д.А., Гупало В.С., Казаков К. С., Неуважаев Г.Д. К вопросу обоснования границ области исследований геологической среды при создании и эксплуатации подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Томск. 2021. Т.1. С. 448-451.

5. Озерский Д. А., Гупало В. С., Казаков К. С., Неуважаев Г. Д. Изучение параметров геологического массива в рамках создания и эксплуатации подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» в Красноярском крае // Радиоактивные отходы. 2022. № 4 (21). С. 78-89.

6. Озерский Д.А., Иванова Т.П., Пушкарева О.В., Казаков К.С., Лозовой А.И. Состояние, проблемы и задачи гидрогеологического изучения участка захоронения радиоактивных отходов в южной части Енисейского кряжа // Геология и недропользование. Москва. № 4 (2021). С. 96-104.

7. Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д., Смирнов К. Д. Интерпретация опытно-фильтрационных работ из несовершенных скважин в слабопроницаемом скальном массиве с учетом потока в стволе совершенной наблюдательной скважины на примере участка «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 61-71.

8. Jeffrey D. Hyman, Satish Karra, Nataliia Makedonska, Carl W. Gable, Scott L. Painter, Hari S. Viswanathan, dfnWorks: A discrete fracture network framework for modeling subsurface flow and transport, Computers & Geosciences, Volume 84, 2015, Pages 10-19, ISSN 0098-3004, https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.08.001.

9. Konshin I, Kapyrin I (2017) Scalable Computations of GeRa Code on the Base of Software Platform INMOST. In: Malyshkin V (ed) Parallel Computing Technologies: 14th International Conference, PaCT 2017, Nizhny Novgorod, Russia, September 4-8, 2017 (Lecture Notes in Computer Science). Springer, Cham, Switzerland, pp 433–445. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62932-2_42.

10. Неуважаев, Г. Д. Разработка и параметрическое обеспечение расчетных моделей для обоснования долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (участок "Енисейский"): – Москва, 2022. – 124 с.

РЕАБИЛИТАЦИЯ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

Расторгуев А.В.[1], Сорокоумова Я.В.[2]
[1]*Московский Государственный Университет имени. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: alvr9@mail.ru*
[2]*Московский Государственный Университет имени. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: yana1992@gmail.com*

Аннотация. Нефтепродукты являются опасным загрязнителем подземных вод. Для реабилитации загрязнённых ими водоносных горизонтов применяется комплекс мероприятий – откачка свободной фазы, мониторинг самоочищения, закачка окислителей и ПАВ.

Ключевые слова: *Свободные нефтепродукты, растворенные нефтепродукты, биоразложение, ПАВ*

Abstract. Petroleum products are a dangerous pollutant of groundwater. To rehabilitate aquifers contaminated by them, a set of measures is used - pumping out the free phase, monitoring self-purification, injection of oxidizing agents and surfactants.

Key words: *Free petroleum products, dissolved petroleum products, biodegradation, surfactants*

Общими свойствами для нефтепродуктов являются способность мигрировать в виде отдельной жидкой фазы, в небольшой степени растворяться в воде и переходить в газообразное состояние. Как правило, нефтепродукты менее плотные, чем вода и в литературе, как зарубежной [5], так и отечественной, их называют LNAPL (light nonaqueous phase liquids – легкая неводная фаза). Из-за низкой плотности они способны скапливаться и мигрировать в виде линз на поверхности грунтовых вод. Как следует из обзора [5], первой задачей реабилитации территорий, загрязненных нефтепродуктами, является удаление или минимизация наличия их жидкой фазы. Если свободную фазу не убрать, она сможет самостоятельно мигрировать. Поэтому на первом этапе, необходимо проведение изысканий, оценка запасов, проектирование мероприятий по излечению свободных нефтепродуктов. Часто в наблюдательных скважинах фиксируют значительные мощности нефтепродуктов, что позволяет говорить о больших запасах и даже техногенных месторождениях. При разработке таких месторождений большие запасы, как правило, не подтверждаются. Это бывает связано с грубой оценкой запасов, когда исходят из того, что существует резкая граница раздела между фазами, а нефтепродукты существуют внутри линзы, имеющей постоянную насыщенность пор – такая модель не всегда применима. Более точная оценка может быть выполнена на основе интегрирования углеводородной фазы по вертикальной координате в пределах распространения свободных углеводородов. Такая методика, основанная на гидростатическом распределении фазовых давлений, впервые была предложена Ленхардом-Паркером [6]. В результате, удается оценить запасы свободных и остаточных нефтепродуктов, обосновать стратегию извлечения свободных нефтепродуктов и проведение мониторинга. Для оптимизации расчетов была разработана программа **Oilfem 2**, позволяющая рассчитывать миграцию и извлечение линз нефтепродуктов [1]. Откачка нефтепродуктов позволяет извлечь их лишь частично.

Неизвлекаемые остаточные нефтепродукты способны растворятся в водной фазе и мигрировать в растворенном виде. Поэтому важную роль играет оценка риска, связанного с миграцией растворенных нефтепродуктов, а также оценка скорости процессов самоочищения. Такая оценка выполнена на площадке Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) [2]. На основе данных мониторинга, проводимого на комбинате, была разработана трёхмерная геомиграционная модель. В ходе калибрации модели до удовлетворительного совпадения модельных и наблюденных значений содержания нефтепродуктов, определены следующие значения миграционных

параметров – коэффициент сорбционного распределения kd = 0,01 л/кг, константа биоразложения λ = 0,001 сут$^{-1}$. В результате прогнозного моделирования было выявлено (рис. 1), что, при условии устранения источников поступления нефтепродуктов, грунтовые воды территории БЦБК очистятся от растворенных нефтепродуктов (будут соответствовать нормам для водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение), по истечении приблизительно четырех лет (1450 сут).

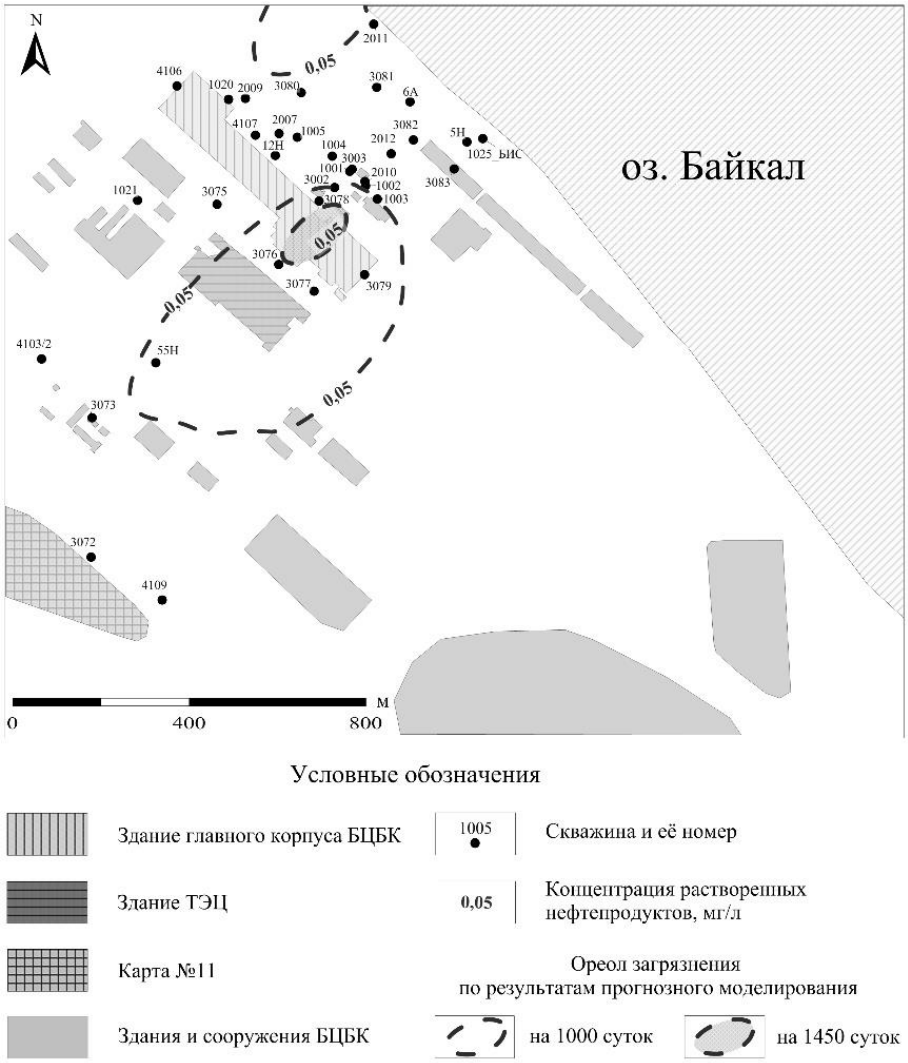


Рис. 1. Положение прогнозных ореолов загрязнения спустя 1000 сут и 1450 сут после реабилитационных мероприятий

Если процессы самоочищения недостаточны, должны быть выполнены исследования и проектирование мероприятий по интенсификации процессов самоочищения. Миграция растворенных нефтепродуктов может быть минимизирована за счет биохимических реакций (разложения), реализуемых с помощью аборигенной микрофлоры, которая всегда присутствует в подземной гидросфере.

Реакции биоразложения невозможны без окислителей – акцепторов. В наибольшей степени биоразложение происходит в аэробных условиях, когда акцептором является кислород. Аэробное биоразложение нефтепродуктов может быть представлено на основе реакции окисления бензола:

$$C_6H_6 + 7.5O_2 \rightarrow 6CO_2 + 3H_2O$$

Результаты моделирования закачки растворенного кислорода с помощью программы RT3D [3] приведены на (рис. 2).

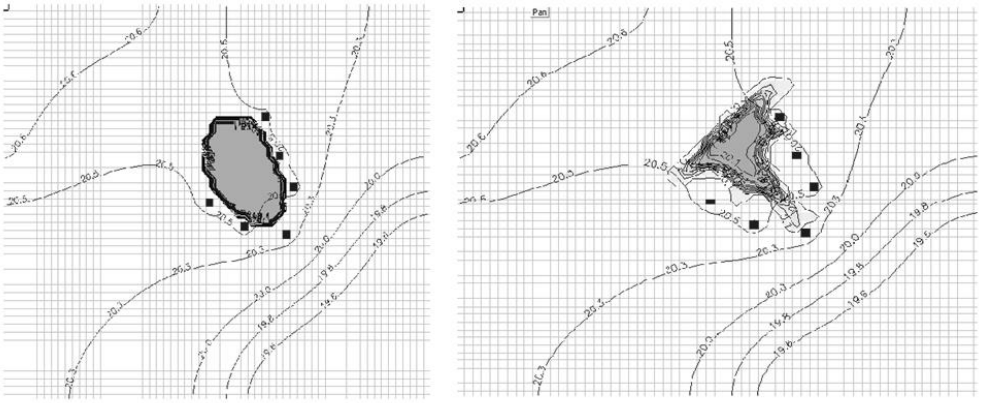


Рис. 2. Результаты моделирования области, загрязненной нефтепродуктами, через 2 года после закачки кислорода

Другим мероприятием, сокращающим риск загрязнения нефтепродуктами, является применение поверхностно-активных веществ (ПАВ). Полевые исследования [4] показали эффективность биоразлогаемого ПАВ Твин-80. Промывка ПАВ реализуется с помощью закачивающих и откачивающих скважин. На сегодняшний день, программные средства для обоснования такой промывки отсутствуют, поэтому авторы, в настоящее время, занимаются разработкой программного кода, соответствующего постановке:

$$n_{eHC}\frac{\partial[HC]}{\partial t} = div\left\{nD\nabla[HC] - \boldsymbol{v}[HC]\right\} + q_s[HC]_s + \alpha(s)(HC^* - HC)$$

$$\frac{dHC_{Napl}}{dt} = -\alpha(s)(HC^* - HC)$$

$$n_{eS}\frac{\partial[S]}{\partial t} = div\left\{nD\nabla S - \boldsymbol{v}[S]\right\} + q_s[S]_s$$

где НС – концентрация нефтепродуктов в растворенном виде, HC_{Napl} – концентрация остаточных(защемленных) нефтепродуктов, S – концентрация ПАВ, $\alpha(s)$ – константа массообмена нефтепродуктов в твердой фазе (защемленных) и жидкой, НС* – растворимость нефтепродуктов в воде, n_{eHC} и n_{eS} – эффективные пористости для нефтепродуктов и ПАВ, учитывающие сорбцию.

Разработка мер, позволяющих оптимизировать реабилитацию подземных вод от загрязнения свободными, защемленными и растворенными нефтепродуктами является весьма актуальной задачей современной науки, ввиду достаточно большого количества объектов, являющихся источниками такого загрязнения.

Список литературы

1. Нурисламов А.И., Расторгуев А.В. Моделирование реабилитации водоносных горизонтов от линз нефтепродуктов. Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, 2, 68-77, 2022

2. Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В., Моделирование миграции растворенных нефтепродуктов в грунтовых водах на территории байкальского целлюлозно-бумажного комбината, Инженерная геология том XVIII, № 3. С. 66-78, 2023

3. Clement, T.P. 1997. RT3D - A Modular Computer Code for Simulating Reactive Multi-Species Transport in 3-Dimensional Groundwater Aquifers. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, USA. PNNL-11720. Found online at: http://bioprocess.pnl.gov/rt3d.htm.

4. Jae-Yeon Um, Gyusang Lee, Sung-Ho Song, Sunwook Hong. Pilot scale feasibility test of in-situ soil flushing by using 'Tween 80' solution at low concentration for the xylene contaminated site // Journal of Soil and Groundwater Environment. – 2013. – Vol.18. – N.6. – P. 38-47

5. Mineo. S. Groundwater and soil contamination by LNAPL: State of the art and future challenges. Sci Total Environ. Volume 874, 20 May 2023, 162394. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162394

6. Parker J.C., Lenhard R.J. Vertical integration of threephase flow equations for analysis of light hydrocarbon plume movement // Transport in Porous Media. 1989. N 5.P. 187–206

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ НА УРАЛЕ

Скалин А.В., Скалин В.А., Скалин А.А.
ООО «Научно–производственное объединение Уралгеоэкология», Екатеринбург, inform@uralgeoecology.ru

Аннотация: Технологические схемы очистки подземных вод в пластах предлагается подразделить на два класса: безреагентный гидрогеодинамический и реагентный гидрогеохимический. В класс безреагентных можно выделать способы очистки подземных вод, основанные на использовании физического принципа расслоения жидкостей по плотности, которые рассматриваются на примерах очистки подземных вод от эмульгированных светлых нефтепродуктов (смесей бензина, дизельного топлива и керосина) в гранитоидных массивах на площадках нефтебаз города Екатеринбург. В класс реагентных выделяются способы очистки подземных вод на геохимических барьерах, которые имеют электрохимическую природу. Управляемая метаморфизация химического состава подземных вод, в частности обезжелезивания, рассматривается на геохимическом щелочном барьере Оброшинского месторождения питьевых подземных вод в лесопарке города Екатеринбург.

***Ключевые слова**: гранитоидный массив, очистка в пластах, геохимический барьер, обезжелезивание.*

Abstract: Technological schemes for groundwater treatment in reservoirs are proposed to be divided into two classes: reagentless hydrogeodynamic and reagent hydrogeochemical. In the class of non-reactive, it is possible to distinguish methods of groundwater purification based on the use of the physical principle of stratification of liquids by density, which are considered using examples of groundwater purification from emulsified light petroleum products (mixtures of gasoline, diesel fuel and kerosene) in granitoid arrays at the sites of oil depots in Yekaterinburg. The reagent class includes methods of groundwater purification based on geochemical barriers, which are of an electrochemical nature. Controlled metamorphosis of the chemical composition of groundwater, in particular de-ironization, is considered on the geochemical alkaline barrier of the Obroshinsky field of drinking groundwater in the forest park of the city of Yekaterinburg.

***Keywords**: granitoid massif, purification in layers, geochemical barrier, de-ironization.*

На современном этапе прикладной гидрогеоэкологии целесообразно рассмотреть вопрос об унификации терминологии, используемой при водоподготовке в надземных сооружениях и при очистке подземных вод в водоносных пластах с применением гидрогеодинамических и гидрогеохимических барьеров. При характеристике водоподготовки применяется термин «технологическая схема» [7], под которой принимают сочетание соответствующих процессов и сооружений, подразделяемые на два основных класса – безреагентный и реагентный. Используя аналогию, способы очистки подземных вод в пластах предлагается также подразделять на два класса – безреагентный гидрогеодинамический и реагентный гидрогеохимический.

В класс безреагентных гидрогеодинамических предлагаются обобщить способы очистки подземных вод, основанные на использовании физического принципа расслоения жидкостей по плотности. Например, плотности эмульгированных смесей светлых нефтепродуктов (бензина, дизельного топлива и керосина) и подземных вод различаются примерно на 20 %. Теоретические основы гидрогеодинамических способов очистки подземных вод от загрязнения эмульгированными смесями светлых нефтепродуктов были заложены трудами В. М. Гольдберга [1], В. А. Мироненко и В. Г. Румынина [3], в основном, применительно к модели безнапорного однородного пласта.

Практическое применение этих гидрогеодинамических способов очистки подземных вод в интрузивах гранитоидных массивах Восточно-Уральской гидрогеологической складчатой области показало, что в качестве рабочей модели должна быть принята схема безнапорного двухслойного пласта [4, 5]. Анализ опыта по безопасному устройству «гидрогеодинамических ловушек» эмульгированных нефтепродуктов показывает, что при их обосновании должно учитываться уменьшение с глубиной коэффициентов гравитационной емкости – от песчаных кор выветривания к трещиноватым гранитам (рис. 1).

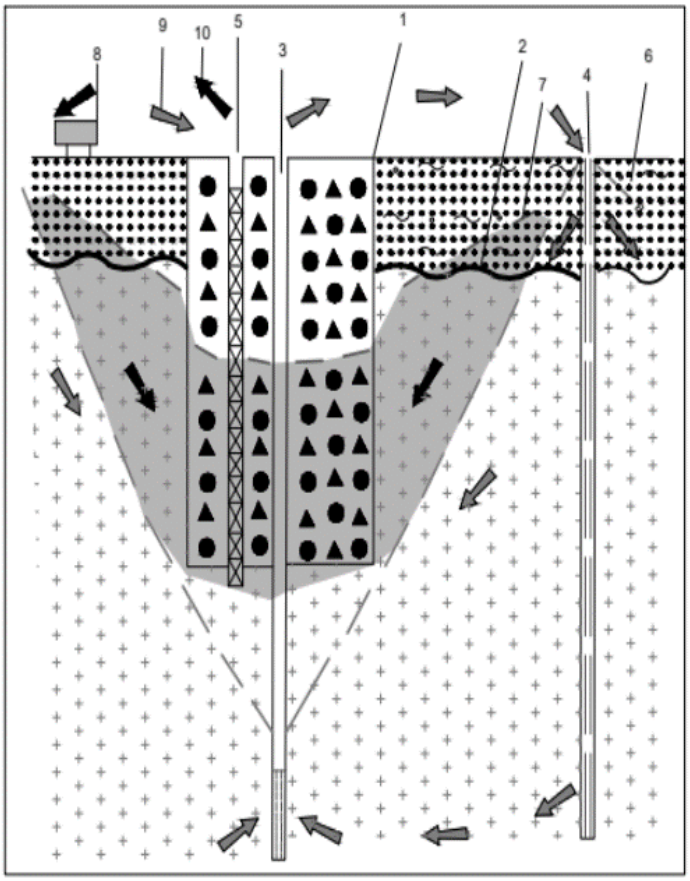


Рис. 1. Схема устройства гидрогеодинамической ловушки эмульгированных светлых нефтепродуктов в зоне каонтакта пористых и трещенно-жильных коллекторов гранитоидного массива : 1-граница технологической гравитационной накопительной емкости в трещиноватых гранитах, образуемая при засыпке через скважины гравийно-галечниковых или дресвяно-щебенистых смесей; 2- граница, отделяющая песчано-глинистые образования коры выветривания от трещиноватых гранитов; 3-водопонизительная скважина; 4-водопоглощающая скважина-для утилизации откачиваемых подземных вод, создания гидравлической завесы и водооборота; 5-нефтеоткачивающая скважина; 6-динамический уровень подземных вод; 7-динамический уровень подземных нефтепродуктов; 8-резервуар для накопления откачиваемой водо-нефтяной эмкльсии; 9-линия тока воды; 10-линия тока нефтепродуктов.

Объем инфильтрующихся эмульгированных нефтепродуктов из водоносных слоев в песчаной коре выветривания может превышать объем емкостей пространства трещиноватых интрузивных пород, участвующий в формировании гравитационных запасов. Это создает потенциально возможную опасность их самоизлива из депрессионной воронки подземных вод.

Гидрогеоэкологические работы по добыче эмульгированных светлых нефтепродуктов «техногенных месторождений», загрязняющих подземные воды Большеистокского и Седельниковского гранодиоритовых массивов, позволили повысить промышленную и экологическую безопасности эксплуатации нефтебаз в г. Екатеринбурге.

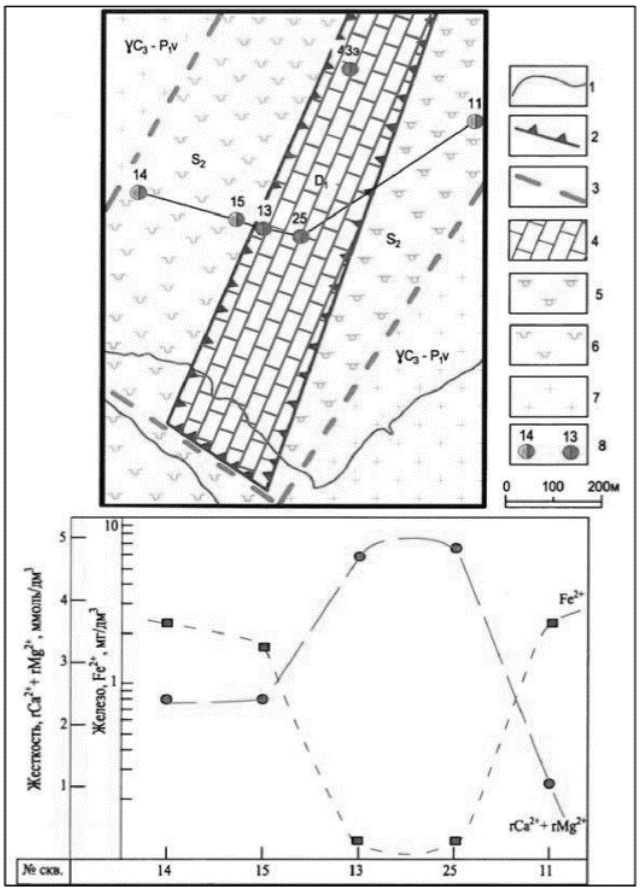


Рис. 2. Гидрогеохимическая схема Оброшинского месторождения: 1 - линия уреза Верх-Исетского пруда; 2 - линия щелочного гидрогеохимического барьера вдоль контакта полосы мрамора, трассируемая лимонитизированными глинами с конкрециями бурых железняков; 3 - линия тектонического нарушения; 4 - мрамор; 5 - парасланец графитисто-биотит-кварцевый с сульфидной минерализацией 1-10%; 6 - ортосланец биотит амфиболовый; 7 - плагиогранит; 8 - знак гидрогеологической скважины: сверху-номер, цвет соответствует преобладающему макроаниону в химическом составе подземной воды (голубая HCO3 , желтая SO4 , красная Cl)

В классе реагентных гидрогеохимических целесообразно объединить способы очистки подземных вод на геохимических барьерах, которые имеют электрохимическую природу. Теоретические основы гидрогеохимических способов очистки до гигиенических нормативов питьевых подземных вод были заложены трудами С. Р. Крайнова, В. М. Швеца [2] и др. Например, на геохимическом щелочном барьере возможно управлять процессами обезжелезивания кислых сульфатных подземных вод, располагая в определенном порядке водозаборные скважины и подбирая их определенные дебиты при откачках. В этих процессах метаморфизации химического состава вод прослеживается аналогия с нейтрализацией кислых сульфатных вод с помощью «известкового молока», например, на шламонакопителе Синарского трубного завода.

На примере «природной водоочистной системы» Оброшинского месторождения питьевых подземных вод (рис. 2) в лесопарковой зоне г. Екатеринбурга рассматриваются процессы обезжелезивания подземных вод в пласте [6]. При этом железо удаляется из подземных вод в виде хлопьев $Fe(OH)_3$, осаждающихся в карстовых полостях и образующих гнездовые залежи бурого железняка, в большей или меньшей мере кремнистого. В XIX в. на Оброшинском железном руднике залежи бурого железняка были вскрыты дудками на глубину около 50 м. При коагуляции сернокислого железа в

Оброшинской водоочистной системе одновременно устраняется коллоидная кремниевая кислота и марганец. В случае непредвиденного техногенного загрязнения могут осаждаться некоторые органические и радиоактивные вещества. Выделения углекислого газа в результате указанной реакции обусловливает следующие последствия: угнетение жизнедеятельности патогенных бактерий при загрязнении второго пояса зоны санитарной охраны; природную консервацию расфасованной воды; повышение устранимой жесткости воды.

Список литературы

1. Гидрогеологичские основы охраны подземных вод от загрязнения. Центр международных проектов ГКНТ. М.: Недра, 1984. 410 с.

2. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.

3. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Т.1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 611 с.

4. Скалин А.А., Скалин А.В. Опыт создания гидрогеодинамических ловушек нефтепродуктов в интрузивных массивах // Геоэкология. 2019. № 3. С. 75-82.

5. Патент РФ № 266561 Способ гидрогеодинамической очистки от нефтепродуктов водоносных пластов и гидрогеодинамическая ловушка для нефтепродуктов/ Скалин А.В., Скалин А.А.; Опубл. 11.09.2018. Бюл. № 26.

6. Скалин А.В., Скалин В.А., Скалин А.А. Защита геохимическими барьерами месторождений подземных вод в долинах Среднего Урала // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 1. С. 40-50.

7. Фрог Б.Н., Левченко А.П. Водоподготовка: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГУ, 2003. 680 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ КОНТАМИНАНТОВ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА НА ТЕРРИТОРИИ БАЙКАЛЬСКОГО ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО КОМБИНАТА

Сорокоумова Я.В.[1], Расторгуев А.В.[2]

[1]Московский Государственный Университет имени. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: yana1992@gmail.com

[2]Московский Государственный Университет имени. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, e-mail: alvr9@mail.ru

Аннотация. Исследование миграции загрязнения, поступающего с площадки Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) в грунтовые воды четвертичного водоносного горизонта, остается весьма актуальной задачей несмотря на то, что работа предприятия была прекращена в 2013 году, ввиду разгрузки этих вод непосредственно в воды озера Байкал – уникальный биогеоценоз и объект списка всемирного наследия ЮНЕСКО. В работе приведены результаты моделирования распространения контаминантов от различных источников на территории БЦБК. Калибрация модели, с учетом данных двадцатилетнего мониторинга состава и свойств подземных вод, показала, что дисперсивность при массопереносе консервативного вещества на порядок меньше, чем при теплопереносе.

Ключевые слова: *Миграция контаминантов, теплоперенос, массоперенос, дисперсивность, Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат*

Abstract. The study of pollution migration from the Baikal pulp and paper mill site to groundwater is a very important task nowadays due to the discharge of these waters into Lake Baikal, which is a unique biogeocenosis and a UNESCO World Heritage Site. Despite the fact that operations at the plant have been stopped since 2013, this paper presents the results of a model simulation of pollutants spread from the territory of the mill.

Calibration of the model based on data from twenty years of monitoring groundwater composition and properties has revealed that dispersion for mass transfer is one order of magnitude lower than for heat transfer.

Key words: *Contaminant migration, heat transfer, mass transfer, dispersivity, Baikalsk pulp and paper mill*

Озеро Байкал и прилегающая к нему территория находятся под действием особых охранных норм, которые подразумевают минимизацию техногенного воздействия, а также устранение последствий ранее осуществляемой деятельности. Одним из объектов поступления загрязнения, как химического, так и теплового, является площадка Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК), расположенная на юго-западном побережье озера, в непосредственной близости от уреза воды. Предприятие было закрыто еще в 2013 году, однако, исследования, проведенные в 2021-2022 годах, показали существенно повышенное значение минерализации грунтовых вод – 4604 мг/л при фоновом значении – 200 мг/л, а также довольно высокое значение температуры грунтовых вод 16,7 ºС при фоновом – 8 ºС.

Для воспроизведения распространения загрязнения с территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината была разработана модель [1, 2] миграции теплового и химического загрязнений, воспроизводящая двадцатилетний период техногенного воздействия промышленных объектов площадки БЦБК на грунтовые воды, которая также учитывала режим работы перехватывающего водозабора, эксплуатируемого на участке, для перехвата потока подземных вод до разгрузки в воды озера.

Калибрация геофильтрационной модели позволила достичь удовлетворительного соответствия расчетных уровней подземных вод имеющимся наблюденным данным. Диапазон вариации нормализованной ошибки для рассматриваемых стресс-периодов составил ~12-18 %.

Калибрация геомиграционных моделей теплового и растворенного загрязнения производилась в два этапа – в первую очередь, определен режим и интенсивность выделенных источников загрязнения для достижения нормализованной ошибки менее 20% при сопоставлении наблюденных и расчетных значений; далее производилась калибрация по параметру продольной дисперсивности для достижения более достоверного воспроизведения распространения двух типов загрязнения в подземных водах, при этом соотношение продольной и поперечных дисперсивностей сохранялось одинаковым для каждого из моделей.

Расчеты теплопереноса показали, наименьшая нормализованная ошибка (15,8 %) достигается при значении параметра продольной дисперсивности 230 м. Расчеты массопереноса для консервативного мигранта, который определялся данными по значению минерализации подземных вод, показали, что наименьшая нормализованная ошибка (12,3%) достигается при значении параметра продольной дисперсивности 4 м, что на порядок меньше, чем в модели теплопереноса.

Различие параметра продольной дисперсивности для моделей теплопереноса и массопереноса можно объяснить тем, что, в случае переноса тепла, процесс продвижения контаминанта осуществляется не только с помощью конвективного переноса с движущимися грунтовыми водами, но и с помощью теплопередачи через скелет водовмещающих горных пород. К аналогичному выводу пришли авторы статьи [3] при сравнении оценок скоростей фильтрации подземных вод на основе моделирования распространения тепла и массопереноса в условиях близких к изучаемому объекту. Другим возможным объяснением может быть большая удаленность источника теплового загрязнения от наблюдательных скважин по сравнению с удаленностью их от источника химического загрязнения.

Список литературы

1. Расторгуев А.В., Куранов П.Н., 2002. Обоснование защиты озера Байкал от загрязнения подземными водами. Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики, Сборник докладов

конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАН В.А. Мироненко, Санкт-Петербург, 2002, с. 141-146.

2. Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В., 2023. Моделирование миграции растворенных нефтепродуктов в грунтовых водах на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината. Инженерная геология, Том XVIII, No 3, с. 66–78.

3. Irvine DJ, Simmons CT, Werner AD, Graf T. Heat and solute tracers: how do they compare in heterogeneous aquifers? Groundwater. 2015; 53:10–20.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ УЧАСТКОВ НЕДР ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ CCS

Фомина Я.В.[1,2], Никитенков А.Н.[2,3], Лесина Н.В.[4]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, sadykovayv@ipgg.sbras.ru

[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск

[3]Томский политехнический университет, Томск

[4]ПАО «ЛУКОЙЛ», г. Москва

Аннотация: В работе рассмотрена система критериев зонального и локального прогноза гидрогеологических структур с целью реализации проектов по геологическому размещению углекислого газа в глубоких водоносных горизонтах. В систему оценки входят группы критериев: общегидрогеологические и структурно-тектонические, литологические, гидродинамические и геотермические, гидрогеохимические, природоохранные, ресурсные, геомеханические и результатов моделирования. Целью исследования являлось проведение с помощью предложенной методики прогноза перспектив реализации подобных проектов на севере Западно-Сибирского бассейна, оценке лицензионных участков недропользователей – как банка перспективных структур для размещения углекислого газа. Выполненный анализ позволяет перейти к дальнейшей локальной оценке наиболее перспективных объектов для осуществления лицензирования недр, что подразумевает более детальные исследования коллекторов и флюидоупоров, структурно-тектонических показателей, проведение компьютерного моделирования взаимодействий в системе «вода-порода-газ» и обязательных лабораторных экспериментов.

Ключевые слова: *проекты размещения углекислого газа, технология CCS, методика выделения перспективных объектов, критерии, осадочные бассейны, Западно-Сибирский артезианский бассейн, Россия.*

Abstract: The paper considers a system of criteria for zonal and local forecasting of hydrogeological structures in order to implement projects on the geological distribution of carbon dioxide in saline aquifers. The assessment system includes groups of criteria: general hydrogeological and structural-tectonic, lithological, hydrodynamic and geothermal, hydrogeochemical, environmental, resource, geomechanical and modeling results. The purpose of the study was to use the proposed methodology to forecast the prospects for the implementation of similar projects in the north of the West Siberian basin, to evaluate the licensed areas of subsoil users as a bank of promising structures for the placement of carbon dioxide. The performed analysis allows us to move on to further local assessment of the most promising objects for subsoil licensing, which implies more detailed studies of reservoirs and seals, structural and tectonic indicators, computer modeling of interactions in the “water-rock-gas” system and mandatory laboratory experiments.

Key words: *carbon dioxide placement projects, CCS technology, methodology for identifying promising objects, criteria, sedimentary basins, West Siberian artesian basin, Russia.*

Введение

В настоящее время наиболее перспективной технологией, позволяющей значительно сократить количество выбросов парниковых газов в атмосферу и улучшить экологический баланс в окружающей среде, является геологическое хранение углекислого газа путем размещения в глубоких водоносных горизонтах (carbon capture and storage – CCS). Действующие проекты в России в настоящее время отсутствуют, однако существуют благоприятные предпосылки для размещения больших объемов углекислого газа. Для длительного хранения углекислого могут быть выбраны глубокозалегающие водоносные горизонты, не используемые для питьевого и хозяйственного водоснабжения, в значительной мере выработанные месторождения углеводородов и искусственно-созданные объекты в соляных, глинистых, угольных, базальтовых и других слабопроницаемых отложениях. Высокая степень изученности и экономической рентабельности делает привлекательными объектами для размещения углекислого газа выработанные углеводородные залежи и угольные пласты, в первом случае CO_2 может быть использован для поддержания пластового давления и интенсификации добычи остаточных запасов углеводородов.

В России в 2022 году был подписан Федеральный Закон Российской Федерации № 598-ФЗ «О внесении изменений в Закон Российской Федерации "О недрах" и статья 2 Федерального закона "Об отходах производства и потребления"», где появилось понятие об утилизации углекислого газа, а в 2023 году был утвержден и введен в действие ГОСТ Р ИСО 27917-2023 «Улавливание, транспортирование и хранение углекислого газа», который является переводным вариантом международного стандарта ISO 27917:2017. В связи с этим, в настоящее время многие недропользователи начали рассматривать существующие в их ведении участки, имеющие лицензии на геологическое изучение и эксплуатацию недр на все виды полезных ископаемых в качестве объектов для организации в их пределах хранилищ углекислого газа. В связи с эти встал вопрос о методических подходах к проведению скрининга, который был опробован на севере Западно-Сибирского артезианского бассейна.

По результатам проведенного ранее регионального прогноза перспективности территории Российской Федерации для реализации проектов CCS Западно-Сибирский артезианский бассейн (ЗСАБ) характеризуется как весьма перспективный, поскольку это один из крупнейших в мире бассейнов, богатых не только подземными водами, но и углеводородами [1]. Наличие литологически выдержанных глубокозалегающих водоносных горизонтов, надежно изолированных от зоны активного водообмена региональным туронско-датским водоупорным горизонтом, отсутствие активной тектоники, широкое распространение структурных ловушек делают бассейн подходящим объектом для реализации проектов CCS. Кроме того, многие открытые ранее месторождения углеводородов находятся на стадии падающей добычи, в этом случае CO_2 может применяться для поддержания пластового давления и интенсификации добычи остаточных запасов.

Методика исследований

Методика оценки пригодности гидрогеологических бассейнов и их частей для реализации проектов CCS включает в себя три уровня детальности: региональный, зональный и локальный. Самый общий уровень – региональный, позволяет оценить территорию как благоприятную или неблагоприятную для реализации проектов в целом [1]. Второй уровень оценки перспектив территорий – зональный, на нем оцениваются части бассейнов, выделяются перспективные водоносные горизонты по площади и в разрезе. Выполняется численное математическое моделирование и дается экспертная оценка объемов возможной утилизации CO_2 в перспективных горизонтах. Самый детальный уровень прогноза – локальный, на котором выполняется обоснование конкретных геологических структур для проектирования полигонов для размещения

углекислого газа с учетом действующих лицензионных соглашений, выданных ранее для добычи всех видов полезных ископаемых.

При локальном и зональном уровнях прогноза наиболее значимыми являются восемь групп критериев: общегидрогеологические и структурно-тектонические, литологический, гидродинамические и геотермические, гидрогеохимические, природоохранные и ресурсные. На конечном этапе исследований геомеханические исследования и результаты трехмерного моделирования искусственной залежи существенно влияют на выбор подходящих участков для реализации проектов CCS. Подробная характеристика критериев регионального и зонального уровней приведена в методической работе [2].

При оценке отдельных лицензионных участков, помимо перечисленных параметров, весьма важно оценить площадь, занятую залежами полезных ископаемых (углеводородов), буферными зонами вокруг населенных пунктов и ООПТ, и вычислить свободную площадь участка, в пределах которой возможно проводить размещение углекислого газа.

Кроме того, оценивается стратиграфическая приуроченность залежей, ниже которых возможна закачка в пределах всего ЛУ, а выше и в занятых залежами водоносных горизонтах, только вне их контуров. Необходимо так же обратить внимание, что планируемые полигоны для размещения углекислого газа должны быть расположены на достаточном расстоянии от нагнетательных скважин систем поддержания пластового давления, мест утилизации отходов и подземных вод. Закачку углекислого газа предпочтительнее проводить в плотнофазном состоянии (>300 кг/м^3 при пластовых условиях). Фазовый переход происходит при давлении 7,38 МПа и температуре 31,1 °С, минимальная пороговая глубина для закачки CO_2 в сверхкритическом состоянии составляет около 800 м.

На основе суммарной площади Σ_S, пригодной для оценки под размещения CO_2 в рамках каждого ЛУ, может быть выполнено ранжирование лицензионных участков по степени перспективности для проектирования газовых хабов с целью размещения углекислого газа для долговременного хранения. Площадь рассчитывается по формуле: $\Sigma S = (S_{лу} \cdot n_в) + (S_{св} \cdot n_{св})$, где $S_{лу}$, $S_{св}$ – общая площадь ЛУ; площадь ЛУ, свободная от месторождений УВ, ООПТ, буферных зон вокруг городов и поселков городского типа (пгт), км^2; $n_в$, $n_{св}$ – количество водоносных горизонтов пригодных для оценки ресурсов для размещения CO_2 на всей площади ЛУ; количество водоносных горизонтов вне контура нефтегазоносности, ООПТ, буферных зон вокруг городов и пгт, шт. ЛУ могут быть разделены на: высоко-, средне-, низко- и бесперспективные. К высокоперспективным отнесены ЛУ с Σ_S более 5000 км^2, среднеперспективным – ЛУ с Σ_S от 1500 до 5000 км^2, низкоперспективным – ЛУ с Σ_S от 500 до 1500 км^2 и бесперспективным – ЛУ с Σ_S менее 500 км^2. Кроме того, в процессе исследования авторами статьи была разработана собственная методика оценки потенциальной предельной емкости перспективных структур для утилизации CO_2, которая была успешно апробирована на изучаемой территории.

Обсуждение основных результатов

Западно-Сибирский артезианский бассейн является одним из крупнейших в мире. В его северных и арктических областях промышленные залежи нефти и газа связаны с отложениями широкого стратиграфического диапазона – от зоны контакта фундамента с осадочным чехлом (Новопортовское месторождение) до туронских осадков (Заполярное, Южно-Русское, Южно-Мессояхское и др. месторождения). Кроме этого, залежи газа выявлены и в более молодых отложениях верхнего мела и даже палеогена. Глубина залегания выявленных залежей изменяется в пределах 470-4220 м.

Район исследования приурочен к северной части ЗСАБ. В регионе отсутствуют складчатые области и щиты, для водоносных комплексов характерно преобладание пластовых гидрогеологических тел и терригенных коллекторов с поровым типом

пустотного пространства. Анализ активных разломов и наведенной сейсмичности показал, что рассматриваемая территория относится к региону с интенсивностью сейсмических сотрясений ниже 5 баллов и может быть оценена как благоприятная.

В гидрогеологическом разрезе выделяется два этажа: нижний, относящийся к зоне затрудненного и застойного водообмена и верхний – активного. В пределах нижнего водоносного этажа выделяется пять водоносных комплексов, надежно изолированных от зоны активного водообмена туронско-датским региональным водоупором (сверху – вниз): апт-альб-сеноманский, неокомский, верхнеюрский, нижне-среднеюрский, палеозойский (совместно с триасовым). В верхней части разреза выделяется палеогеново-четвертичный комплекс (рис 1).

В регионе развито большое количество структурных ловушек, кроме того, в неокомском и юрских комплексах выделяются литологические ловушки. Пористость песчаников/алевролитов в пределах нефтегазоносных отложений меняется в широком диапазоне от 0,70 до 42,55 %, закономерно уменьшаясь от меловых к доюрским резервуарам. Наилучшими коллекторскими свойствами обладают мощные регионально выдержанные песчаные пласты верхней части неокомского и апт-альб-сеноманского комплексов. Наиболее надежные водоупорные характеристики присущи регионально выдержанным глинистым толщам кимериджско-валанжинского, аптского и туронско-датского возраста.

Гидродинамический режим подземных вод имеет ключевое значение для проектов по геологическому хранению CO_2, особенно при закачке в истощенные нефтяные и газовые залежи. Зоны повышенных и аномально высоких пластовых давлений (АВПД) не могут рассматриваться в качестве перспективных. Области с пониженным давлением лучше всего подходят для геологического улавливания и хранения CO_2, т.к. они способны компенсировать увеличение пластового давления во время закачки. В регионе выявлено доминирование элизионного водообмена при формировании современной структуры гидродинамического поля, что отражается в развитие зон аномально-высоких пластовых давлений [3]. Апт-альб-сеноманский водоносный комплекс отличается преимущественно нормальными пластовыми давлениями, варьирующими в интервале 3,5-28,4 МПа, которые контролируются глубиной залегания водоносных горизонтов.

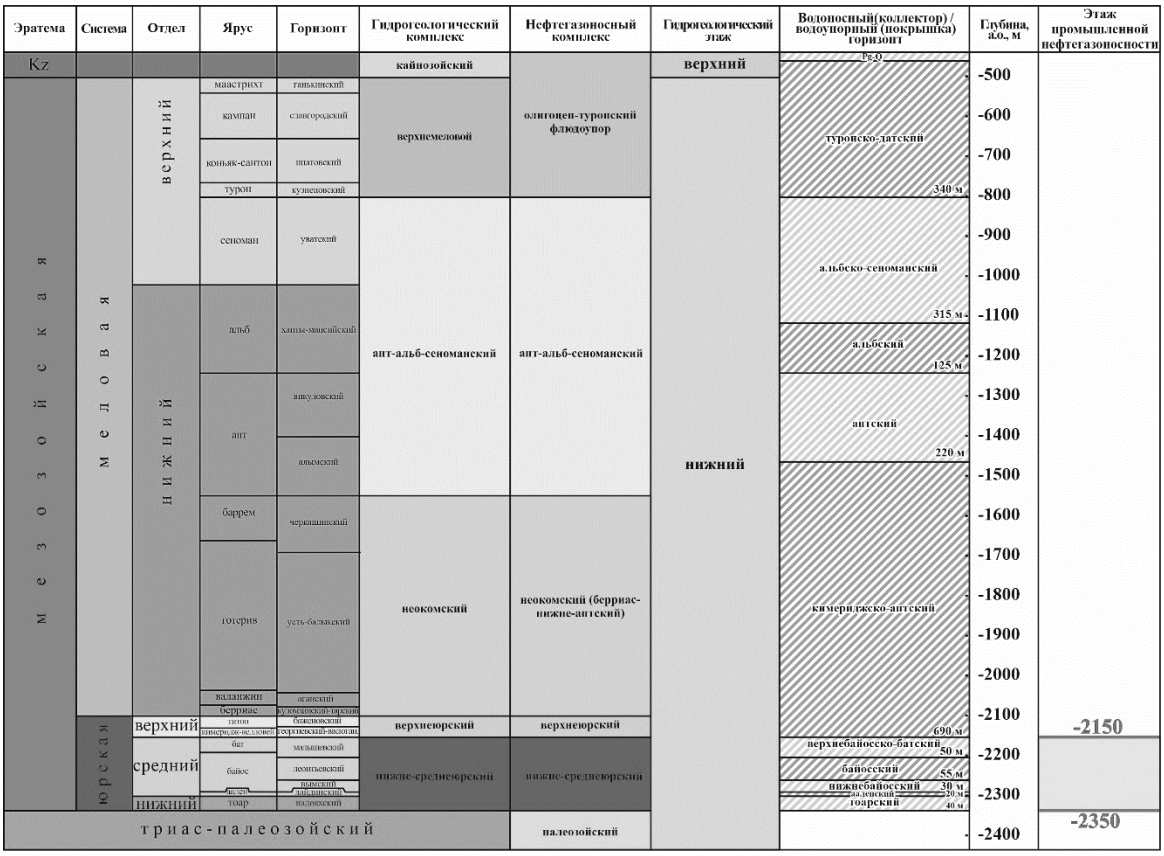


Рис. 1. Пример схемы гидрогеологической стратификации разреза северных районов ЗСАБ

Для неокомского водоносного комплекса характерны повышенные пластовые давления, а в нижней его части отмечено наличие зон с АВПД. Верхнеюрский водоносный комплекс имеет сложное строение и характеризуется пластовыми давлениями, варьирующимися от 9,9 до 67,7 МПа. Зона АВПД развита в западных и центральных районах, в то время как для восточных характерны нормальные, а для южных районов — повышенные пластовые давления. Нижне-среднеюрский водоносный комплекс характеризуется пластовыми давлениями, изменяющимися от 6,6 до 101,9 МПа. В центральных районах доминирующая роль принадлежит повышенным и аномально высоким пластовым давлениям, в то время как в восточном и западном направлении получает распространение зона нормальных давлений. Доюрские водоносные комплексы на севере ЗСАБ изучены крайне слабо ввиду большой глубины их залегания.

Интервал изменения пластовых температур в кровле апт-альб-сеноманского водоносного комплекса составляет от 0 до 50 ºС. Околонулевые и отрицательные температуры приурочены к прибортовым частям, и связаны с влиянием толщи многолетнемерзлых пород. Фоновыми значениями для изучаемых отложений выступает интервал температур от 20 до 30-35 ºС. В неокомском комплексе пластовые температуры достигают 100 ºС, при фоновых значениях 30-75 ºС, наименьшие значения приурочены к прибортовым частям бассейна, а повышенные отмечаются в центральной части района исследований. Характер изменения пластовых температур в кровле верхнеюрского водоносного комплекса имеет схожее строение с вышезалегающими стратиграфическими уровнями. Максимальные температуры в изучаемом интервале достигают 140 °С. В подошве юрских отложений пластовые температуры достигают 200 °С.

Комплексный анализ геологического строения и гидрогеологических условий показал, что для целей реализации проектов CCS на севере ЗСАБ наиболее подходящие зоны для размещения углекислого газа превалируют в осевой части, где развиты

регионально выдержанные водоносные горизонты, и надежно экранирующие их водоупорные толщи с низкой степень опесчанивания. Учитывая региональные особенности, верхняя граница благоприятного интервала пластовых температур для размещения углекислого газа в сверхкритическом состоянии расположена на глубинах 800-1200 метров. Выше по разрезу на большей части территории развита мощная криогенная толща. Наибольшими перспективами обладают апт-альб-сеноманский и неокомский комплексы. Бесперспективными они будут только в пределах Большехетской мегасинеклизы и Надымской гемисинеклизы, где развиты зоны повышенных давлений. Наименьшие перспективы для размещения углекислого газа следует связывать с водонапорными толщами юрского возраста. Верхнеюрские водоносные горизонты будут перспективными в пределах Хантейской гемиантеклизы. Установлено, что геохимические особенности подземных вод так же будут оказывать существенную роль при размещении углекислого газа в водоносных горизонтах за счет контроля его предельной растворимости в пластовых условиях и последующих процессов взаимодействия карбонизированных вод с породами коллекторов и водоупорных толщ.

Заключение

Таким образом, в рамках настоящих исследований на основе ранее выполненного регионального прогноза перспектив размещения углекислого газа на территории РФ и изучения особенностей гидрогеологического строения и нефтегазоносности северных районов Западно-Сибирского артезианского бассейна были выявлены наиболее перспективные районы. Мощный этаж (более 2,5 км) промышленной нефтегазоносности в изучаемом регионе во многом осложняет выбор целевых горизонтов для размещения CO_2. Установлено, что наиболее перспективные зоны для размещения углекислого газа превалируют в центральных районах изучаемого региона (в осевой части ЗСАБ), где развиты регионально выдержанные водоносные горизонты, и надежно экранирующие их водоупорные толщи с низкой степенью опесчанивания.

Комплекс выполненных региональных и зональных исследований позволил закартировать на севере ЗСАБ области, благоприятные для размещения углекислого газа. Наибольший интерес в этом плане представляют апт-альб-сеноманский и неокомский водоносные комплексы, которые характеризуются отсутствием зон развития аномально высоких пластовых давлений и температур, кроме того, пластовые условия позволяют разместить диоксид углерода в плотнофазном состоянии. На отдельных участках возможно размещение углекислого газа в нижезалегающих верхнеюрском и нижне-среднеюрском комплексах.

На локальном уровне выполнен детальный анализ геолого-геофизической и гидрогеологической информации, что позволило выделить в гидрогеологическом разрезе перспективные водоносные горизонты для последующей оценки условий под размещение углекислого газа. Выполнены расчеты суммарной площади перспективных водоносных горизонтов и их количества, потенциально пригодных для размещения углекислого газа.

Дальнейшее применение методов численного физико-химического моделирования позволит оценить объемы потенциальных горизонтов для утилизации углекислого газа и выявить геохимические последствия процессов, протекающих в системе вода-порода-CO_2.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014 и Новосибирского государственного университета по программе Приоритет-2030.

Список литературы

1. Новиков Д.А. Региональный прогноз перспектив захоронения углекислого газа на территории Российской Федерации /. Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, И.И. Юрчик, Я.В. Садыкова, А.С. Деркачев, А.В.

Черных, А.А. Максимова, С.В. Головин, Н.Г. Главнов, Е.А. Жуковская // Нефтяное хозяйство. – 2022. – №3. – С.36-42.

2. Новиков Д.А. Оптимальный комплекс критериев зонального прогноза перспектив захоронения углекислого газа в геологических формациях / Д.А. Новиков, Я.В. Фомина, И.И. Юрчик, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, С.В. Головин // Экология и промышленность России. – 2023, – Т.27. – № 4. – С.44-49.

3. Новиков Д.А. Роль элизионного водообмена в формировании гидродинамического поля Ямало-Карской депрессии / Д.А. Новиков // Литология и полезные ископаемые– 2019. – № 3. – С. 248-261.

РАСТВОРЕННЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА КАК ИНДИКАТОР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПЭТ-УПАКОВКАМИ И ГЕНЕЗИСА ВОД

Хаустов А.П., Редина М.М.

ФГАО ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», г. Москва, khaustov-ap@rudn.ru

Аннотация. На примере набора проб вод различного генезиса, хранящихся в пластиковой и в стеклянной таре демонстрируется различная интенсивность проникновения органических компонентов из материала упаковки в водную среду. Выявлена различная интенсивность выщелачивания при различном составе вод. Как недонасыщенный раствор, они способны поглощать различные даже малорастворимые компоненты, что сопровождается значительным повышением концентраций фталатов, полиаренов и др. Доказана необходимость тщательного соблюдения регламентов отбора и хранения проб, а также необходимость тщательных исследований для выбора оптимальных упаковок в целях хранения питьевых и минеральных вод.

***Ключевые слова**: упаковка, минеральная вода, полиэтилентерефталат, выщелачивание*

Abstract. On the example of a set of samples of waters of various genesis stored in plastic and glass containers, the different intensity of penetration of organic components from the packaging material into the water is demonstrated. The different intensity of leaching by different water composition was revealed. As an unsaturated solution, water is able to absorb various even slightly soluble components, which is accompanied by a significant increase in concentrations of phthalates, polyarenes, etc. The necessity of careful compliance with the regulations for sampling and storage of samples, as well as the need for careful research to select the optimal packages for the storage of drinking and mineral waters, has been proved.

***Key words**: packaging, mineral water, polyethylene terephthalate, leaching*

Взаимодействие воды с полимерными материалами (в частности полиэтилентерефталатом, ПЭТ) изучается несколько десятилетий. Хотя ПЭТ-упаковки имеют преимущества перед другими видами тары, и с 80-х гг. для развивающихся стран даже продвигалась «технология» борьбы с инфекционными заболеваниями SODIS (от Solar Water Disinfection – «солнечная дезинфекция воды» –хранение воды под солнечным светом в ПЭТ-таре для снижения количества болезнетворных организмов за счет УФ-облучения), выявлены значительные негативные эффекты взаимодействия вод с ПЭТ. Актуальность проблемы возросла в связи с загрязнением вод микро- и нанопластиком, способным проникать в клетки организма – вместе с ним поступают полиарены, фталаты, парафины и др. Наши работы показали вероятность повышения концентраций растворенных органических веществ (РОВ) при хранении вод в ПЭТ-таре более чем в 20-40 раз: они поступают в воду из материала стенок.

В эксперименте проанализированы пробы вод разных химических типов. Были сопоставлены активности изменения их состава при хранении и определены возможные источники РОВ в подземных водах. Объекты анализа – следующие.

1. Метановый вулкан Арарат (Керченско-Тиманская провинция; проба 1К) – пульсационный источник подземных минеральных вод постоянного действия. Объект выбран с целью оценки сорбции ПАУ в условиях пульсации на взвешенном материале (эксгаляции вулкана). По химическому составу воды метановые субтермальные (температура 16–30°С), с pH ≈8. Минерализация воды для различных объектов – от 11 до 14 г/дм^3[1]. По химическому составу воды хлоридно-гидрокарбонатные натриевые с относительно постоянными вариациями состава (не более 10 %). Также идентифицированы SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, B, Rb, Sr, Ba. В газовой фазе преобладает метан (до 99% абс.). В незначительных количествах обнаружены тяжелые углеводороды.

2. Сероводородный источник Чокракский (2К) – выход хлоридно-натриевых вод с повышенным содержанием B и I. Двумя скважинами в районе озера вскрыты воды с минерализацией 6 и 6.29 г/дм^3 с концентрацией H_2S до 420 мг/дм^3 [1]. Источник субтермальный (15 °С); химический состав вод характеризуется следующей формулой [2]:

$$M_{27}\frac{Cl^-93}{(Na^+ + K^+)84Mg^{2+}10}\,pH6{,}8$$

3. Состав источника в пади Бабчик (4К) неизвестен. Это холодный источник; он каптирован, вода используется в качестве столовой. Предположительно вода гидрокарбонатно-кальциевая, с минерализацией до 1 г/ дм^3.

4. Рапа оз. Чокрак (вблизи которого расположены и источники 1К, 2К, 4К). Озеро – бальнеологический объект с уникальными природными грязями. Состав рапы озера [2]:

$$Mg_{329-342}\frac{Cl^-(79-87)SO_4^{2-}(10-19)}{(Na^+ + K^+)(58-78)Mg^{2+}(21-40)}$$

Общая минерализация рапы достигает 200–260 г/дм^3. Скорее всего, озеро стратифицировано, а химический состав вод резко изменяется по площади в зависимости от источников питания: атмосферных выпадений, испарения, инфильтрации пресных и морских вод, субаквальной разгрузки подземных вод, эксгаляции грязевых вулканов.

5. Вода скважины Добруджа (курорт Албена, Болгария; используется для питья) – гипотермальный источник (до 30°С); физико-химические показатели: pH 8,1; CO_2 – 273 мг/дм^3, минерализация 0,58 г/дм^3, H_2S – 1,81 мг/дм^3; анионы (мг/дм^3): HCO^{-3} –379,5, Cl^- 34,0, SO^{2-}_4 32,1; катионы: Ca^{2+} 66,5, Mg^{2+} 40,5, $Na^+ + K^+$ 13,8 (мг/дм^3). Специфика вод – высокие содержания РОВ за счет выщелачивания и метаморфизации флишевых формаций.

6. Вода Черного моря в районе курорта Албена (Болгария).

7. Вода из питьевой скважины моренного горизонта в с. Мошницы Солнечногорского района Московской обл.

8. Естественная вода из карьера торфяного озера (Солнечногорский р-н), содержащая в растворенной и эмульгированной формах органические вещества.

Разнообразие состава и генезиса вод позволило провести сравнительный анализ битумоидной части РОВ. Пробоотбор и подготовка, методы экстракции условия хранения проб детально представлены в [6]. Часть проб отбиралась в новые пластиковые емкости (ПЭТ темно-коричневого цвета) параллельно – стеклянную тару (банки из светлого стекла). Некоторые пробы отобраны в многократно использованные светлые ПЭТ емкости.

Подчеркнем, что анализ рассматриваемых соединений затрудняется крайне низкими значениями их концентраций в связи с низкой растворимостью (на уровне нг/дм^3 – чаще эти вещества обозначаются как «нерастворимые в воде»). Применение стандартной методики ПНД Ф 14.1:2:4.186-02 может дать значительные аналитические ошибки. Поэтому необходимы более точные методы – например, с применением сорбентов-патронов. В нашем эксперименте определялись содержания в водах полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), фталатов, парафинов и

изопарафинов, нафтенов, олефинов, высших спиртов, алкилбензолов, фенолов, хлорфенолов, карбоновых кислот, метиловых эфиров жирных кислот. Несмотря на высокочувствительные аналитические методы помимо ПАУ[3] были обнаружены фталаты, парафины, нафтены, олефины и алкибензолы и в отдельных пробах карбоновые кислоты. Детально концентрации соединений представлены в [6], а интенсивность миграции ПАУ и других классов органических веществ представлена в табл. 1.

Однозначные закономерности в выщелачивании и поглощении рассмотренных соединений сформулировать сложно. Уверенно выделяется лишь активность миграции Naph из ПЭТ-упаковок для всех проб. Обратный переход дважды отмечен для Py. Также важный момент – высокая активность перехода ПАУ в упаковки для сероводородных вод: очевидно, это реакция раствора на перевод его из восстановительной среды в окислительную.

Выделение органических соединений из упаковки. Полиарены. Наиболее активно из ПЭТ-упаковки выделяется Azu в водах метанового типа. Это ПАУ органического (растительного) происхождения, крайне слабо растворим в воде. Его источником должны быть сами воды за счет деструкции других соединений. Скорее всего, Naph, An, Phen и др. ПАУ биоокисляются с образованием моно- и дициклических соединений оксикислот, которые затем расщепляются на альдегиды и CO_2. Основные продукты метаболизма могут быть более растворимы в воде, чем исходные углеводороды.

Таблица 1. Миграция органических соединений между водным раствором и ПЭТ

Тип вод, проба	Поглощаются	Выделяются
1К – метановый вулкан	*ПАУ:* **Flu = Py = Pl > 4CpPhen** > Acnph	*ПАУ:* **Azu** >> Ace > BaP > Naph > Flrn *Группы органических соединений:* **Парафины** >> **фталаты** > алкилбензолы > нафтены > ПАУ
2К – сероводородный источник	*ПАУ:* **Acnph** = **Ace** = **Flrn** = DBt = **4CpPhen** = **BaP** > Phen >> (Py)	*ПАУ:* Flu > Naph *Группы органических соединений:* **Парафины** >> **фталаты** > (ПАУ)
4К – пресный холодный источник	*ПАУ:* Flu = Py = BaA	*ПАУ:* DBt >> Phen > Naph > Asu *Группы органических соединений:* **Олефины > парафины** >> ПАУ > алкилбензолы > фталаты

**Жирным выделены наиболее активно мигрирующие соединения*

Acnph и Ace также малорастворимы в воде. Их максимальные количества выявлены в рапе оз. Чокрак – вероятно, в связи с субаквальной разгрузкой грязевых вулканов.

Характер накопления и миграции Naph весьма индивидуален. Это связано и с генезисом вод, и с возможностью выделения из ПЭТ-упаковок, что доказано рядом исследований [7 и др.]. Его присутствие в ПЭТ незначительно в связи с жестким контролем при производстве материала, в том числе рециклированного, но производные

[3] Нафталин (Naph), азулен (Azu), аценафтен (Ace), аценафтилен (Acnph), флуорен (Flrn), дибензтиофен (DBt), 4H-циклопента[def]-фенантрен (4CpPhen), фенантрен (Phen), антрацен (An), флуорантен (Flu), пирен (Py), хризен (Chr), бенз(a)антрацен (BaA), бенз(a)пирен (BaP), бенз(b)флуорантен (BbFlu), бенз(k)флуорантен (BkFlu), пери-лен (Pl), бенз(ghi)перилен (Bghi), индено(1,2,3-cd)пирен (IP), дибенз(a,h)антрацена (DBa)

Naph иногда применяют как добавки для улучшения барьерных функций ПЭТ по отношению к CO_2 [4].

Дибензтиофены высоко устойчивые ПАУ; они присутствуют в составе подземных (например, нижнедевонских отложений Западной Сибири) и нефтезагрязненных вод. Именно нафтиды, генерированные аквагенным органическим веществом обогащены дибензтиофенами. В наших пробах DBt выявлен практически во всех пунктах (кроме вулкана Арарат). Вероятный источник – метаморфизация пород, содержащих сероорганические вещества и их последующий переход в воду. DBt – биопалеомаркер даже для современных отложений моренного комплекса Подмосковья. Относительно высокие концентрации DBt впервые выявлены в воде Черного моря, что объясняется геохимической дифференциацией акватории и повсеместным наличием сероводородной зоны.

Flrn – относительно легкий полиарен; его наиболее активный естественный источник –степные пожары и природные нефти. В ряде технологий Flrn – компонент для синтеза ПЭТ (например, патент RU 2081876 C1) и, вероятно оставается в ПЭТ в остаточных количествах.

Flu, как и Py – стабильные слабо мигрирующие продукты пирогенеза, но переход Flu из упаковок в процессе эксперимента был зафиксирован для пресного источника.

Среди мигрирующих ПАУ также идентифицирован BaP: он активно поглощается материалом упаковки из воды (сероводородный источник) и выщелачивается из упаковки в раствор (вулкан Арарат). Так, концентрации BaP бенз(а)пирена в пластиковой упаковке в 4 раза выше, чем при хранении в стекле и в 5 раз выше ПДК для разливаемых вод высшей категории. Но концентрации BaP во всех образцах (кроме вулкана Арарат и воды в источнике Добруджа) не выше даже наиболее строгих ПДК – для питьевых вод высшей категории.

Фталаты – один из наиболее изученных компонентов, выщелачивающихся из ПЭТ-тары [3, 5]. Эти соединения токсичны, относительно хорошо растворимы в воде (от 4 до 45000 мг/дм^3) и в жирах. Чаще их происхождение – техногенное, но и в природных водах выявлены высокие концентрации геофталатов (веществ естественного генезиса). Фталаты высоко подвижны, способны поступать в водную среду. Это объясняется тем, что в объеме полимера фталаты не создают прочных связей с молекулами ПЭТ. Даже небольшое повышение температуры приводит к их легкому высвобождению. Высокие содержания фталатов обнаружены нами в водах практически во всех пробах, с максимумом (8,12 мкг/л) в воде из скважины курорта Добруджа (месторождение минеральных вод из верхнеюрско-нижнемеловых известняков и доломитов с высоким содержанием РОВ).

Парафины и изопарафины – смесь предельных углеводородов с числом атомов С преимущественно 18–35 с прямой (н-парафины) или разветвленной цепью. *Парафины* в наших экспериментах репрезентативно отражали способность ПЭТ упаковок к взаимодействию с водой. Приросты концентраций соединений достигают 2400% (пресный источник, где содержание парафинов минимально). Переходы парафинов из упаковок установлены нами для всех проб в эксперименте. В то же время максимальное количество геопарафинов (более 3 мкг/дм^3) установлено для сероводородного источника и даже, несмотря на столь высокие концентрации, все равно зафиксирован 10 кратный переход из ПЭТ-упаковки в раствор. Таким образом, подтверждается эффект недонасыщения своих пределов фазовых переходов воды. Скорее всего искусственное концентрирование произошло за счет преимущественно н-парафинов. Геопарафины в естественных средах имеют более низкую молекулярную массу. *Изопарафины* более стойки чем н-парафины; они зафиксированы лишь в одной пробе – в рапе оз. Чокрак в количестве 1,14 мкг/м^3. Вероятно, в ПЭТ они (если и содержатся) достаточно прочно связаны другим соединениями и не переходят в раствор.

Нафтены идентифицированы в максимальных концентрациях в рапе (до 4,36 мкг/дм^3). Чаще всего в природных соединениях это циклоалканы. Вероятно, их фиксация в рапе озера – результат активных молекулярных процессов – жизнедеятельности бактерий.

Олефины. Максимальные концентрации выявлены также в рапе оз. Чокрак. Их генезис – продукты дегидрирования парафиновых углеводородов под воздействием естественных (микробиологических) процессов, хотя не исключено поступление за счет современной вулканической деятельности. Выявлен более чем 5-кратный прирост концентраций олефинов в процессе эксперимента для пресного источника Бабчик. Вероятно, техногенное поступление олефинов в воду: альфа-олефины – необходимый компонентом получения полиэтилена.

Алкилбензолы в высоких концентрация также зафиксированы в рапе. В природных битумоидах содержатся все производные бензола, по C_9 включительно. Это подтверждают относительно высокие концентрации алкилбензолов в торфяном озере Подмосковья. В ходе эксперимента зафиксирован их переход из ПЭТ-упаковки для вулкана (рост концентраций в 3 раза) и пресного источника (более чем в 5 раз). Это может объясняться избирательной активностью алкилбензолов в технологии изготовления упаковок (входят в состав моющих средств; являются компонентом в технологии многих пластиковых материалов).

Карбоновые кислоты выявлены в минимальных количествах в водах Черного моря (10 нг/дм^3) и подземных водах моренного горизонта Подмосковья (до 70 нг/дм^3), а в максимальных значениях в торфяном карьере 2,53 мкг/дм^3. Это объясняется наличием в торфяном битуме разнообразного ряда кислот, в том числе и карбоновых.

Поглощение соединений материалом ПЭТ-упаковки. Нами выявлена молекулярная адсорбция отдельных веществ пластиковой упаковкой. Этот процесс может объясняться контактом поляризованных молекул упаковки и растворенных веществ. Избирательное выведение РОВ из воды или поступление в нее *объясняется и свойствами (составом) самих вод*. Объяснить активность переходов только структурой молекул ПАУ (например, различия миграции мало- и многокольцевых ПАУ) и различиями в растворимости невозможно.

Например, проба 2К с содержанием H_2S, агрессивного по отношению к материалу упаковки. Под влиянием соединений серы и прочих РОВ материал ПЭТ может утратить прочность [5], и гидрофобные соединения из многокомпонентном раствора получают возможность мигрировать вглубь стенки емкости. Именно в пробе 2К зафиксировано большинство фазовых переходов в упаковочный материал.

Проба 2К из сероводородного источника предполагает высокую восстановительную активность вод (а значит, и вероятность выщелачивания ПАУ и других соединений из ПЭТ-тары). Но различия между суммарным содержанием ПАУ в водах в стеклянной и пластиковой таре минимальны, хотя состав ПАУ при хранении в стеклянной таре разнообразнее. Лишь содержание Naph в ПЭТ-таре выше почти на 40%.

Проба 3К – холодный родник с наиболее «агрессивными» водами. По сумме ПАУ относительный выход веществ из ПЭТ – один из максимальных. Наиболее ярко проявляется комплексообразующий принцип взаимодействия вод со средой; результат – существенное снижение роли химического потенциала за счет процессов молекулярной диффузии.

Бутилирование минеральных и питьевых вод в ПЭТ-тару, длительное их хранение в условиях инсоляции могут привести к существенному переходу в раствор ряда ПАУ (включая высокотоксичный и приоритетный для контроля BaP). Для фталатов, парафинов и нафтенов также велики вероятности переходов из ПЭТ-тары в водные растворы.

Исследование сорбции и переход микропластика в растворенные формы при взаимодействии с водой – актуальная проблема геохимии техногенеза. Система

«вода↔упаковки» – эволюционирующая и неравновесная, зависящая в первую очередь от химического состава взаимодействующих вод и в меньшей степени от состава упаковки.

ПЭТ-упаковки выделяют органические соединения (ПАУ, фталаты, парафины с ростом концентраций в 10 и более раз) во все типы вод, независимо от химического состава. В природных объектах (рапа оз. Чокрак) отмечены экстремальные значения концентраций геофталатов. В нашем эксперименте за исключением бенз(а)пирена превышение ПДК нормируемых веществ для растворенных органических веществ в водах не выявлено.

Рапа оз. Чокрак – уникальный природный раствор, максимально насыщенный ПАУ, изопарафинами, нафтенами. Источники формирования химического состава вод и грязей весьма многообразны. Условно приняв за эталон химической состав вод Черного моря, можно видеть существенные различия (по общему содержанию ПАУ более чем в 20 раз). По нашему мнению, причина – своеобразные органические процессы, типичные только для данного озера.

Анализируемый набор ПАУ указывает на возможности обменных реакций между упаковочным материалом и водами. Состав пула ПАУ, переходящих из упаковок, не имеет (кроме Naph) четко выраженных закономерностей. Нами выявлены разные типы самопроизвольных потоков миграции ПАУ в системе «вода-упаковка» для создания внутреннего равновесия или приспособления раствора к внешней среде (ПЭТ). Диапазон концентраций ПАУ, выделяемых ПЭТ-емкостями, для исследуемых типов вод максимален в случае пресного источника (526% прироста за счет концентраций Naph и DBt).

Фталаты и парафины наиболее ярко демонстрируют переходы РОВ из ПЭТ-упаковок: в природных водах их концентрации незначительны или не выявлены.

Эксперимент подтвердил, что для каждого типа вод изменение состава комплекса РОВ специфично. Для ряда вод барьерные функции ПЭТ недостаточны. Необходимо расширение списка нормируемых веществ (включение малоизученных РОВ, присутствующих в следовых количествах). Требуется и корректировка регламента технологии разлива вод питьевого назначения с учетом поведения ПАУ и других токсичных РОВ в водах. Разливаемые воды должны контролироваться в аккредитованных лабораториях и сертифицироваться с учетом содержания опасных уровней ПАУ, фталатов и парафинов.

Список литературы

1. Гидрогеология СССР. Том VIII. Крым. / Под ред. Рипского Е.В. и др. М.: Недра, 1970. 364 с.

2. Матюнина В.А., Каюкова Е.П. Рапа соляных озер–важный бальнеологический ресурс Крымского полуострова. Геология, геоэкология, эволюционная география: Колл. монография. Т. XVIII / Под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Снытко. СПб.: Изд.-во во РГПУ им. А.И. Герцена, 2019. С. 122–125.

3. Шилов В.В., Хурцилава О.Г., и др. Токсиколого-гигиеническая оценка содержания фталатов в бутилированной питьевой воде. // Токсикологический вестник, 2023. № 31(3). С. 178-184.

4. Beeva D. A., Borisov V. A. et al. Controlling the barrier properties of polyethylene terephthalate. A review. // International Polymer Science & Technology. 2015, №42(7). С. 45–52.

5. Keresztes S., Tatár E. et al. Study on the leaching of phthalates from polyethylene terephthalate bottles into mineral water. // Sci. Total Environ., 2013. Vol. 458. Pp.451–458.

6. Khaustov A., Redina M., Goryainov S. Migration of PAHs and phthalates from package materials during water storage: glass or plastic? // Polycyclic Aromatic Compounds, 2022. Vol. 42(2). Pp. 358-370.

7. Konkol, L. Contaminant levels in recycled PET plastic: PhD Thesis. Environment and Biotechnology Centre Swinburne University of Technology, 2004. 318 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗМЕЩЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

Черных А.В.[1,2], Дульцев Ф.Ф.[1,2]
[1] Новосибирский государственный университет, Новосибирск, ChernykhAV@ipgg.sbras.ru, DultsevFF@ipgg.sbras.ru
[2] Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

Аннотация. На основе выполненных исследований термобарического режима недр установлен характер распределения пластовых температур и давлений в пределах основных гидрогеологических комплексов. В районе исследований значения геотермического градиента варьируют от 2,4 до 4,6 °С/100 м, гидродинамическое поле характеризуется прямой гидродинамической зональностью и развитием нормальных и повышенных пластовых давлений. Выполненный анализ позволил закартировать области, благоприятные для размещения CO_2 в сверхкритическом состоянии. Так, наименьшие перспективы следует связывать с верхними частями разреза апт-альб-сеноманского водоносного комплекса, ниже по разрезу, начиная с неокомского водоносного комплекса, во всем регионе, за исключением юго-восточных районов, устанавливается режим недр, благоприятный для размещения CO_2 в сверхкритическом состоянии.

Ключевые слова: *проекты размещения углекислого газа, технология CCS, методика выделения перспективных объектов, пластовые температуры, пластовые давления, сверхкритическое состояние CO_2, Новосибирская область, Западно-Сибирский артезианский бассейн.*

Abstract. Based on the studies of the thermobaric regime of the subsurface, the nature of the distribution of reservoir temperatures and pressures within the main hydrogeological complexes was established. In the study area, the geothermal gradient values vary from 2.4 to 4.6 °C/100 m, the hydrodynamic field is characterized by direct hydrodynamic zoning and the development of normal and increased reservoir pressures. The analysis performed made it possible to map areas favorable for the placement of CO_2 in a supercritical condition. Thus, the least prospects should be associated with the upper parts of the section of the Aptian-Albian-Cenomanian aquifer complex; lower along the section, starting with the Neocomian aquifer complex, in the entire region, with the exception of the southeastern regions, a subsoil regime is established that is favorable for the placement of CO_2 in a supercritical condition.

Key words: *carbon dioxide placement projects, CCS technology, methodology for identifying prospective target, reservoir temperatures, reservoir pressures, supercritical condition of CO_2, Novosibirsk region, West Siberian artesian basin.*

По результатам проведенного ранее регионального прогноза перспектив территории РФ для реализации проектов CCS Западно-Сибирский артезианский бассейн характеризуется как весьма перспективный для размещения больших объемов CO_2 [1, 2]. Для его подземного хранения как правило используются глубокозалегающие водоносные горизонты с высокоминерализованными пластовыми флюидами, которые не могут быть объектом питьевого и хозяйственного водоснабжения, а также месторождения углеводородов, находящиеся на падающей стадии добычи и угольные пласты в виду высокой степени изученности и экономической рентабельности, где он может быть использован для поддержания пластового давления и интенсификации добычи остаточных запасов углеводородов [3-5].

Район исследования административно приурочен к северо-западу Новосибирской области (юг Западно-Сибирского артезианского бассейна). Наличие литологически выдержанных водоносных горизонтов (апт-альб-сеноманский, неокомский, верхнеюрский, нижне-среднеюрский, палеозойский (совместно с триасовым)) в интервале глубин от 800 до 3000 м, надежно изолированных от зоны активного водообмена (неогеново-четвертичный водоносный комплекс) региональным туронско-датским водоупором, отсутствие активной тектоники, широкое распространение структурных ловушек делают бассейн хорошим объектом для реализации проектов долгосрочного хранения углекислого газа в сверхкритическом состоянии - при температуре свыше 31,1°С и давлении свыше 7,38 МПа (рис. 1а). Минимальная

пороговая глубина для закачки CO_2 в сверхкритическом состоянии при геотермическом градиенте 30°С/км и температуре дневной поверхности 10°С составляет около 800 м [6]. Для проектов CCS минимальная глубина может быть менее 800 м и пластовое давление менее 7,0 МПа, только если CO_2 закачивается в надежно экранированные угольные пласты.

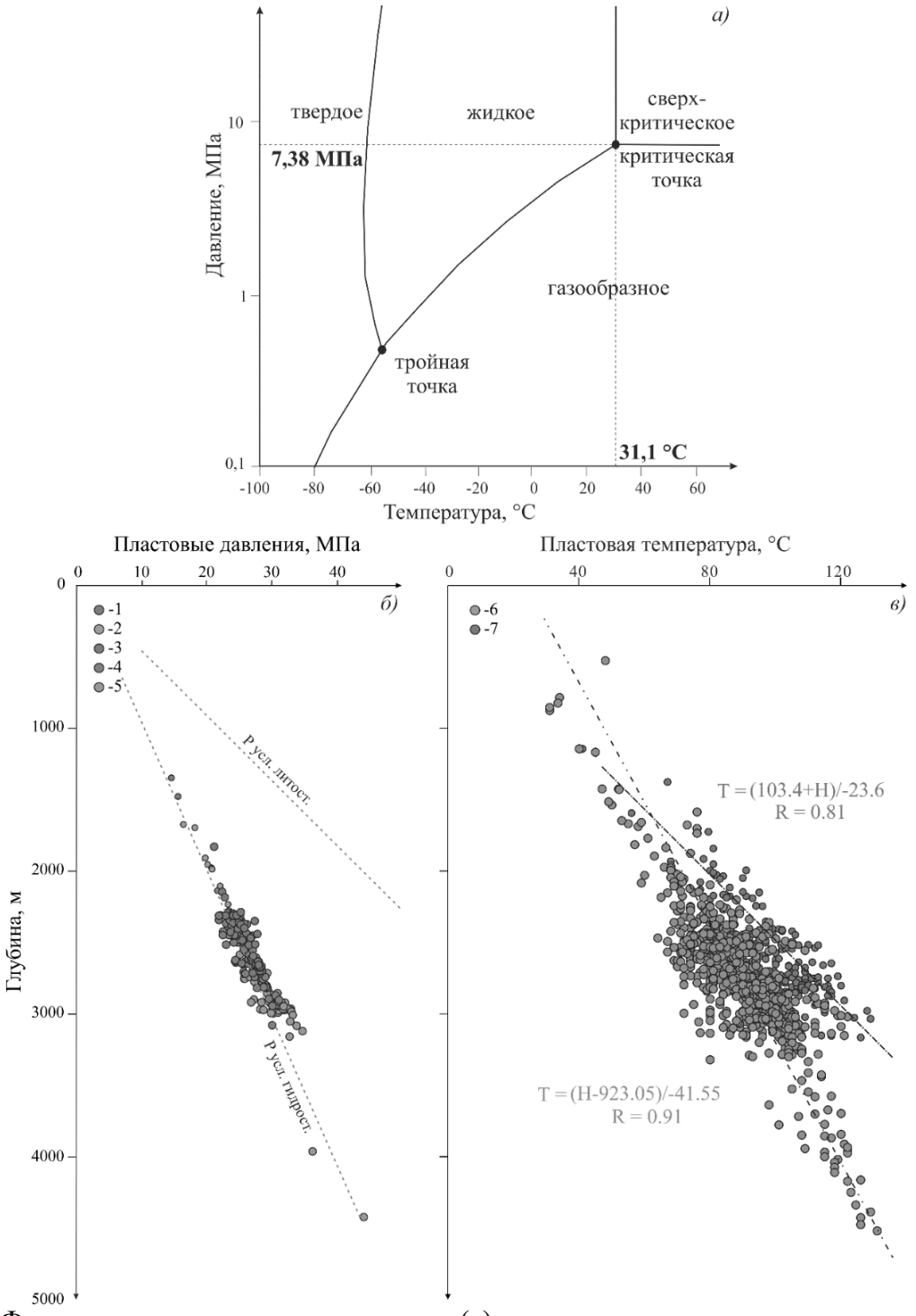


Рис. 1. Фазовая диаграмма углекислого газа (а) и зависимости пластовых давлений (б) и температур (в) с глубиной в пределах северо-запада Новосибирской области. Условные обозначения: Водоносные комплексы: 1 – апт-альб-сеноманский; 2 – неокомский; 3 – верхнеюрский, 4 – нижне-среднеюрский, 5 – доюрский; Замеры пластовых температур структур изучаемого региона с величиной геотермического градиента (°С/100м): 6 – 2,4-3,6, 7 – 3,6-4,6.

Зоны повышенных и аномально высоких пластовых давлений не могут рассматриваться в качестве перспективных, зоны с пониженным давлением лучше всего подходят для геологического удержания и хранения CO_2. Основной гидродинамической особенностью исследуемого региона является отсутствие аномально высоких пластовых давлений.

На базе структурных построений, выполненных в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, геотермического районирования по величине среднего геотермического градиента выполненного ранее [7] (рис. 1б) были созданы сеточные модели (Grid) распределения пластовых температур по кровлям нефтегазоносных комплексов (НГК): 1) доюрский, 2) юрский, 3) нижнемеловой (кровля алымского горизонта), 4) верхнемеловой (кровля сеноманских отложений).

Так, в верхнемеловом НГК (апт-альб-сеноманский комплекс) пластовые температуры колеблются от 5 до 32 °С. В восточной части региона исследования их значения не превышают 20 °С, максимальные температуры установлены на северо-западе территории в осложняющей Колтогоро-Нюрольский желоб Кулан-Игайской впадине (рис. 2а). Для отложений неокома в центральной и северной части пластовые температуры составляют 45-70 °С, снижаясь в юго-восточном направлении к окраине бассейна до 13-45°С (рис. 2б). Распределение пластовых температур в кровле юрских отложений носит аналогичный характер. При этом снижается контрастность геотермических аномалий. Температуры варьируют от 26 до 72 °С на юго-востоке района исследований, растут до 73-104 °С в центральной и западной частях и уменьшаются до 72-84 в северо-западной части (рис. 2в). Для доюрского НГК пластовые температуры изменяются от 30 (на юго-востоке территории в зоне отсутствия юрских отложений) до 142 °С. Анализ геотермических особенностей показал, что зоны повышенных температур протягиваются полосой с юго-запада на северо-восток территории исследования, трассируют контуры отрицательных тектонических структур — Колтогорско-Нюрольского желоба, Нюрольской мегавпадины, Кыштовского наклонного мезопрогиба. Пониженные значения пластовых температур характерны для положительных и промежуточных структурных элементов всех порядков. Пониженные температуры выявлены в пределах Тебисско-Воробьевского и Межовского структурных мысов и Северо-Межовской мегамоноклинали. Самыми низкими температурами характеризуется структура внешнего пояса Западно-Сибирской геосинеклизы – Барабинско-Пихтовая мегамоноклиза.

На основе построений и имеющихся данных в апт-альб-сеноманском комплексе установлено, что пластовые давления изменяются от первых единиц до 9,9 МПа. В целом прослеживается рост значений пластовых давлений в западном направлении. В неокомском водоносном комплексе установлены пластовые давления, изменяющиеся от первых единиц в юго-восточных частях исследуемой территории до 18,5 МПа. Наибольшие значения пластовых давлений установлены в юго-западной и северо-западной частях изучаемого региона в Колтогорско-Нюрольском желобе и Нюрольской мегавпадине, наименьшие – на Верхнешегарском мезовыступе на юго-востоке. В верхнеюрском водоносном комплексе значения пластовых давлений варьируют от 21,2 до 28,5 МПа и увеличиваются с юго-востока (Барабинско-Пихтовская моноклиналь) на северо-запад, к структурам Нюрольской мегавпадины. Наиболее полно гидродинамическими материалами охарактеризован нижне-среднеюрский водоносный комплекс. Замеренные пластовые давления в нем достигают 31,1 МПа. Установлен рост пластовых давлений по мере погружения отложений в северо-западном и западном направлении. Повышенные давления также установлены в Бакчарской мезовпадине. Пластовые давления в доюрских отложениях изменяются в интервалах от 23,4 до 44,2 МПа (см. рис. 1в). В целом характер распределения пластовых давлений в доюрских отложениях схож с вышезалегающим нижне-среднеюрским комплексом. Наибольшие значения установлены в северо-западной части региона, а также в Бакчарской

мезовпадине, а наименьшие – на юго-востоке в пределах структур Барабинско-Пихтовской моноклинали [8]. Таким образом, гидродинамическое поле исследуемого региона характеризуется прямой гидродинамической зональностью и развитием нормальных и повышенных пластовых давлений в доюрских, юрских и меловых водоносных комплексах.

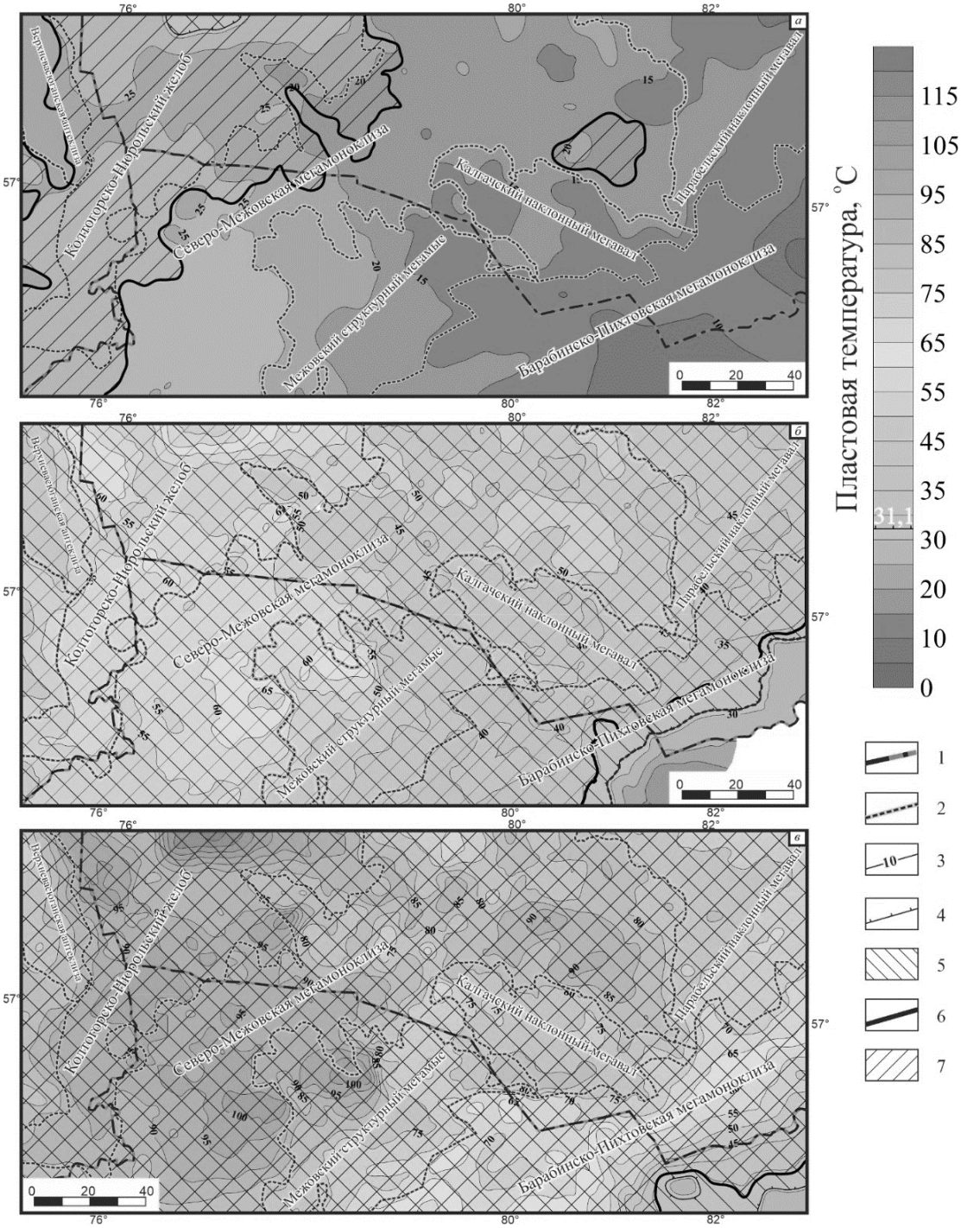


Рис. 2. Карта перспектив размещения углекислого газа в сверхкритическом состоянии в пределах апт-альб-сеноманского (а) и неокомского (б) гидрогеологических комплексов на северо-западе Новосибирской области. Условные обозначения: 1 – административные границы, 2 – границы основных тектонических элементов; 3 – изотермы, °С, 4 – изотерма 31,1°С; 5 – зоны температур выше 31,1°С; 6 – изобара 7,38 МПа, 7 – зоны давлений выше 7,38 МПа.

Комплекс выполненных исследований позволил закартировать в пределах территории исследования (основных гидрогеологических комплексов) области, благоприятные для размещения углекислого газа в сверхкритическом состоянии (рис. 2а,б,в). Установлено, что наименьшие перспективы для размещения углекислого газа следует связывать с верхними частями разреза апт-альб-сеноманского водоносного комплекса. В его пределах выявлен только участок в Кулан-Игайской впадине на северо-западе исследуемой территории. Ниже по разрезу, с ростом пластовых температур и давлений, в кровле неокомского водоносного комплекса закартирована большая область с благоприятными для размещения CO_2 в сверхкритическом состоянии условиями, охватывающая практически всю территорию исследования, за исключением небольшой части Барабинско-Пихтовой мегамоноклизы на юго-востоке, где пластовые температуры и давления не соответствуют необходимым. Ниже по разрезу во всем регионе, за исключением юго-восточных районов, устанавливается режим недр, благоприятный для размещения CO_2 в сверхкритическом состоянии. Таким образом, в пределах верхнеюрского, нижне-среднеюрского и доюрского комплексов практически повсеместно существуют благоприятные термобарические условия для размещения углекислого газа в сверхкритическом состоянии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014 и Новосибирского государственного университета по программе Приоритет-2030.

Список литературы

1. Новиков, Д.А. Региональный прогноз перспектив захоронения углекислого газа на территории Российской Федерации / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, И.И. Юрчик, Я.В. Садыкова, А.С. Деркачев, А.В. Черных, А.А. Максимова, С.В. Головин, Н.Г. Главнов, Е.А. // Нефтяное хозяйство. – 2022. – №3. – С.36-42.

2. Новиков, Д.А. Оптимальный комплекс критериев зонального прогноза перспектив захоронения углекислого газа в геологических формациях / Д.А. Новиков, Я.В. Фомина, И.И. Юрчик, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, С.В. Головин // Экология и промышленность России. – 2023. – Т. 27 (4). – С.44-49.

3. Tang, Y. A review of CO_2 sequestration projects and application in China / Y. Tang, R. Yang, X. Bian // The Scientific World Journal. – 2014. – №381854.

4. Aminu, M.D. A review of developments in carbon dioxide storage / M.D. Aminu, S.A. Nabavi, C.A. Rochelle, V. Manovic // Applied Energy. – 2017. – V. 208. – PP. 1389-1419.

5. Shukla, R. A review of studies on CO_2 sequestration and caprock integrity / R. Shukla, P. Ranjith, A. Haque, X. Choi // Fuel. – 2010. – V. 89(10). – PP. 2651–2664.

6. Zahid, U. CO_2 geological storage: A review on present and future prospects / U. Zahid, Y. Lim, J. Jung, C. Han // Korean Journal of Chemical Engineering. – 2011. – V.28. – PP. 674–685.

7. Новиков, Д.А. О геотермической зональности нефтегазоносных отложений северо-западных районов Новосибирской области / Д.А. Новиков, С.В. Рыжкова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2018. – Т. 5 (131). – С. 69-76.

8. Новиков, Д.А. Гидродинамические особенности нефтегазоносных отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных, С.В. Рыжкова // Георесурсы. – 2019. – Т. 21 (4). – С. 85-94.

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ УРИНСКОГО ТЕРМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА

Чернявский М.К.[1], Плюснин А.М.[1], Жамбалова Д.И.[1], Чередова Т.В. [1]
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт им.Н.Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия, mitchel1977@mail.ru, plyusnin@ginst.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования Уринского термального источника, расположенного в Баргузинском районе Республики Бурятия. Источник является ярким представителем азотных терм в пределах Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Его разгрузка происходит на стыке Голондинского и Икатского хребтов. В статье представлены особенности геолого-географического строения территории, окружающей место выхода и гидрогеологические условия разгрузки. Приведены новые данные о макро- и микрокомпонентном составе воды. По химическому составу воды источника относятся к хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатным натриевым с высоким содержанием кремниевой кислоты и с минерализацией менее 1 г/л. С помощью кремниевого геотермометра рассчитаны максимальная температуры воды и глубина формирования гидротерм, которые составляют 131ºС и 5,2км. Дана характеристика современного состояния и перспективы использования источника.

***Ключевые слова**: термальные источники, рекреационный потенциал, химический состав воды, кремниевый геотермометр, разломы.*

Abstract. The article presents the study results of the Urinski thermal spring, located in Barguzinskii district of the Republic of Buryatia. This spring is classic representative of nitrogen thermal waters the Baikal Rift zone (BRZ) in the Eastern Baikal region, it belongs to the Baikal arch neogene-quaternary uplift. The geological and geographical structure features of the surrounding territory and the hydrogeological conditions of water discharging are presented. New data on the macro- and microcomponent composition of water is shown. According to its chemical composition water belongs to the chloride-hydrocarbonate-sulfate sodium type with a mineralization less than 1 g/l. Using a silicon geothermometer, the water springs temperatures at the formation depth were calculated and the depths of hydrothermal formation were estimated. They are 131°C and 5,2 km. The current state characteristics and prospects for using the spring for medical and recreational purposes are given.

***Key words:** thermal springs, recreational potential, chemical composition of water, silicon geothermometer, faults.*

Байкальская природная территория чрезвычайно насыщенна различными гидроминеральными ресурсами, здесь происходит разгрузка разнообразных по температуре, химическому и газовому составу трещинно-жильных вод. Одной из наиболее интересных территорий с множеством термальных источников является Баргузинская долина, где на довольно небольшой территории происходит разгрузка десятков термальных источников.

Баргузинская долина находится в Северном Прибайкалье восточнее оз. Байкал и протягивается субпараллельно его северной части более чем на 200 км при максимальной ширине 34 км. С северо-запада она ограничена Баргузинским хребтом, с юго-востока – Икатским. Впадина входит в бассейн р. Баргузин, берущей свое начало в пределах северо-западных отрогов Южно-Муйского хребта. Поверхность котловины колеблется в интервале 450-900м. Территория впадины перекрыта кайнозойкими отложениями. Согласноо тектоническому районированию данная территория относится к Хамардабан-баргузинской системе выступов (Баргузинский выступ; плутонические дуги активных континентальных окраин) [1]. Тепловой поток равен 50-75 мВт/м^2, что соответствует тепловому потоку на территории практически всей Баргузинской долины (за исключением ее северной части, где он гораздо выше) и прилегающей территории [2].

Выходы известных термальных источников находятся как в бортах долины, так и внутренней части окаймляющих хребтов. Большая часть известных выходов приурочена к Икатскому хребту. Во внутренней части и у подножия хребта разгружаются пять источников азотных термальных вод – Сеюйский, Гаргинский, Инский, Алгинский и Гусихинский и один источник – Уринский, находится на границе Икатского и

Голондинского хребта. Ресурсы и химический состав воды этих источников определяются геолого-гидрогеологическими условиями, сложившимися за длительный период развития этой территории.

Икатский хребет представляет собой крупную орографическую единицу общей протяженностью свыше 350 км. Он ограничивает Баргузинскую впадину с юго-востока. Икатский хребет сложен преимущественно метаморфическими сланцами и гранитами.

Голондинский хребет находится в средней части восточного побережья оз.Байкал и протягивается более чем на 100 км. с юго-запада на северо-восток от среднего течения реки Турка до верховьев Ямбуя и Икатского хребта. Голондинский и Икатский хребты вместе с прибрежными поднятиями – Катковской горной грядой и хребтом Черная Грива образуют низкогорносреднегорную преимущественно горно-таежную ландшафтную структуру, вытянутую в северо-восточном направлении от оз.Байкал. Около 80% территории занято горно-таежными и около 10 % горно-тундровыми геосистемами. Территория Икатского и Голондинского хребтов относится к Байкальской гидроминеральной области азотных и метановых терм. Участок входит в Байкало-Витимскую гидрогеологическую складчатую провинцию и Байкальскую подпровинцию, Икатско-Муйский гидрогеологический массив. На данной территории формируются разнообразные по составу, температуре и минерализации воды. Питание этих вод осуществляется в основном за счет атмосферных осадков.

Одним из наиболее интересных, но при этом мало изученных источников является Уринский источник (N 53°26'44,3" E 110°07'06,0"), который находится в бассейне р. Уро по левому берегу рч.Левое Уро, в 1,3 км от его устья, в 25-28 км. юго-восточнее деревни Большое Уро. Заезд до поселка Большое Уро по лесной лесовозной дороге, затем 4 км по лесу вдоль ручья. Выход термальной воды связан с пересечением субширотного разлома северо-восточного направления, относящегося к Урино-Асынской системе разломов с предполагаемым слабоактивным разломом северного простирания [3]. Уринский источник находится в пределах Асыно-Уринской рудной зоны, для которой характерно редкометальное оруденение с ореолами олова, молибдена, вольфрама.

Вмещающими породами трещинно-жильных вод, питающих источник служат среднезернистые и порфировидные биотитовые граниты и граносиениты второй фазы($\gamma\text{Ɛ}_2Pt_3br$) и третьей фазы (γ_3Pt_3br) Баргузинского комплекса. В южной части зоны питания источника находятся раннекембрийские породы мэлдэлгенской свиты (Cm_1ml), карбонатные конгломераты, биотитовые, биотитово-роговообманковые, кремнисто-хлоритовые, эпидотово-хлоритовые сланцы, песчаники с прослоями и линзами известняков и кислых эффузивов. Источник разгружается в пределах распространения мелкозернистых лейкократовых биотитовых гранитов третьей фазы витимканского комплекса (γ_3Pz_1vt). Долины рек и впадин сложены современными четвертичными аллювиальными отложениями: валуны, галечники, пески, суглинки (Q_{IV}) [4]. Наличие морских кембрийских образований является основной особенностью пород Икатского хребта в районе выхода источника, которые придают уникальный геохимический облик термальным водам (рис. 1).

Источник разгружается в долине ручья, в 2 км севернее слияния рч. Левое Уро и Лиственичного. Долина ориентирована с юга на север и имеет V-образный поперечный профиль. Выходы находятся в пределах небольшой (примерно 250 на 100 м) долины, между глыбами биотитовых гранитов. Высота выходов от 973 м в северной части долины до 1003 м (относительно уровня моря) на юге. Здесь находится несколько довольно крупных выходов и более десятка мелких с различной температурой. Дебит точно подсчитать не представляется возможным, т.к. часть выходов перекрыта каменистой россыпью. Примерный суммарный дебит источника составляет около 1 л/сек. Источники формируют рассеянные выходы с дебитом отдельных потоков порядка сотых или десятых литра в секунду. Часть выходов приурочена к коренным породам, часть мелких выходов, расположенных на склоне перекрыта делювиально-пролювиальными отло-

жениями, температура воды в них порядка 25-30°С. Воронки вымывания отсутствуют, видимых выходов газа нет. Вод в центральной части долины и непосредственно у ручья имеет температуру 64-70,3°С. Вода является маломинерализованной с минерализацией 0,386 г/л, $pH8{,}5$. Содержание кремниевой кислоты 176,7 мг/дм^3. Газовый состав преимущественно азотный.

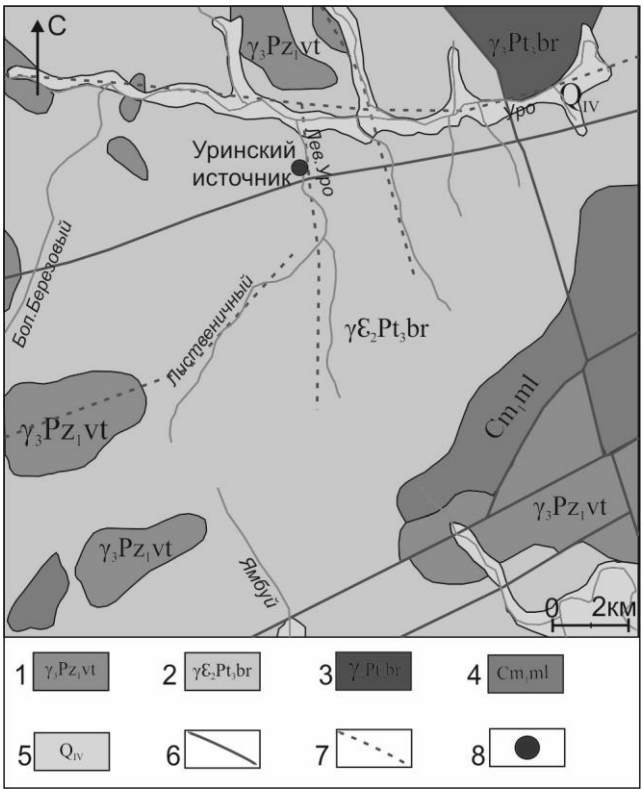


Рис.1. Геологическое строение района расположения Уринского источника азотных термальных вод: 1- граниты третьей фазы витимканского комплекса; 2- граниты и граносиениты второй фазы($\gamma\varepsilon_2Pt_3br$) и 3- третьей фазы ($\gamma_3Pt_3br$) Баргузинского комплекса; 4- раннекембрийские породы Мэлдэлгенской свиты (Cm_1ml); 5- современные четвертичные аллювиальные отложения (Q_{IV}); 6- разломы установленные; 7- разломы предполагаемые; 8- термальный источник.

В горячей воде присутствуют бактериальные маты, на камнях наблюдаются обильные солевые отложения. Вода хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатная натриевая с высоким содержанием кремниевой кислоты. Формула Курлова имеет следующий вид:

$$M0{,}39\frac{SO_4\,42HCO_3\,39Cl8}{Na96}\,pH8{,}5T70{,}3$$

В микроэлементном составе отмечено высокое содержание лития, рубидия, фосфора, бора, вольфрама, молибдена, мышьяка (Таб.1). Они вероятнее всего связаны с геохимическими особенностями вмещающих пород, в которых формируются гидротермы. Определяющее влияние на их концентрирование в растворе оказывает время взаимодействия воды с горной породой и геохимический облик вмещающих пород. Содержание радона неизвестно, но можно предполагать, что оно достаточно высокое, как и на других источниках Икатского хребта. Согласно нашим данным, на Алгинском источнике содержание радона 60,6 эман, на Гаргинском 19,1.

Согласно классификации И.С. Ломоносова [5] источник относится к Аллинскому (Белокурихинскому типу) гидрокарбонатно-сульфатно натриевых терм. Для терм такого типа характерна низкая минерализация - 0,2-0,6 г/л, с широким диапазоном колебаний содержания сульфатов и гидрокарбонатов, pH 7-8,5. Газы терм по составу также

относятся исключительно к азотным. Выходы на поверхность приурочены к рыхлым образованьям различного генезиса, перекрывающим коренные породы. Часто источники расположены вблизи уреза воды рек. В Баргузинском Прибайкалье к этому типу относятся Аллинский, Змеиный, Толстихинский, Уринский и Большереченские источники. Многочисленные термы аллинского типа встречаются на Кавказе, Памире, Тянь-Шане, Дальнем Востоке, Камчатке, в Болгарии, Корее.

Таблица1. Химический состав воды Уринского источника

Макрососта (мг /дм.куб.)								
Название источника	K+Na	Ca	Mg	HCO_3	SO_4	Cl	F	H_4SiO_4
Уринский	89,4	3,01	3,02	76,27	64,1	20,57	7,92	176,75
Микрокомпонентный состав (мкг/дм.куб.) по данным ICP-MS								
Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	V
0,19	1,39	6,64	0,43	0,96	7,23	0,12	0,69	2,95
Li	Rb	Cs	Be	Sr	Ba	U	P	Ti
135,92	32,79	9,77	0,11	297,93	36,14	0,21	130,3	0,38
Al	Ga	W	Mo	Se	B	As	Sb	Ge
33,44	5,36	85,2	58,38	0,01	196,51	5,22	0,51	3,3

Считается, что при быстром подъеме термальных вод к земной поверхности содержание кремниевой кислоты остается неизменным. Так как растворимость кварца зависит от температуры, то она соответствует максимальной температуре, существующей на максимальной глубине проникновения термальных вод (t_h). Зная содержание кремниевой кислоты, можно вычислить температуру гидротерм (°С) по формуле Ильина [6]. Для низкотемпературных малодебитных гидротерм она имеет следующий вид:

$Tsio_2 = [1051,1/(4.655-lgsio_2)] – 273,15$

Значения температур, полученные с помощью кремниевого геохимического термометра, соответствуют глубинам формирования основной части термальных вод, которые определяют их химический облик и тепловые характеристики.

Таким образом, переведя содержание H_4SiO_4 в SiO_2, и произведя расчеты, получаем следующее значение температуры воды на глубине максимальной глубине погружения в 131 °С, при максимальной температуре на выходе в 70 °С. Зная глубинную температуру (t_h) и величину регионального геотермического градиента *grad t*=25 °С можно рассчитать глубину формирования по формуле $h=t_h/grad\ t$ [7]. Соответственно для Уринского источника глубина формирования равна примерно 5,2км, что довольно много для источника в пределах Баргузинского Прибайкалья.

Данные по кремнию получены в лаборатории гидрогеологии и геоэкологии ГИН СО РАН. Температура измерялась на месте непосредственно в месте выхода наиболее высокотемпературного источника.

Значения, полученные с помощью геохимического геотермометра, соответствуют глубинам формирования основной доли термальных вод, которые определяют химический облик и тепловые характеристики гидротерм [7]. Установлено, что температуры термальной воды на выходе в 1,5 раза ниже расчетных, это связано с потерями тепла при подъеме воды и с разбавлением холодными близповерхностными водами, которые содержат меньше кремния. Таким образом, вода источника на выходе представляют собой смесь горячих глубинных и холодных близповерхностных вод, что хотя и дает заниженную глубинную температуру, но позволяет довольно точно оценить общую картину.

На источнике есть большое зимовье 4,5Х9 м, построена баня с деревянной ванной, термальная вода одного из крупных выходов по деревянному желобу стекает самотеком в ванну. Сейчас источник практически не используется; изредка его посещают жители близлежащих населенных пунктов.

Уринские термальные источники имеют благоприятное для дальнейшего развития географическое положение – они находятся недалеко от крупных поселков Читкан и Уро (29 и 25км) и в 56 км от районного центра п. Баргузин. Лечение (лечебно-оздоровительный туризм) на источниках возможно совместить с экотуризмом. Источник находится в привлекательном, живописном месте в окружении дикой природы, в горной долине, в лесу, на берегу ручья, т. е. там, где окружающая природа (климатогеографические характеристики) оказывает успокаивающее и оздоравливающее действие. Низкая посещаемость связана с плохой транспортной доступностью, одновременно способствуя сохранению практически в первозданном виде окружающей природы на источнике.

Источник очень интересный, но мало изучен. При проведении дальнейших исследований необходимо провести уточнение границ термальной площади, проведение исследований по уточнению газового состава, макро и микрокомпонентного состава основных выходов, содержанию радона. Ключевыми факторами, привлекающими сюда людей, являются термальная вода комфортной температуры, насыщенная биологически активными элементами, ландшафтно-климатические условия и общая оторванность от цивилизации.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту АААА-А21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока.

Список литературы

1. Схема тектонического районирования России. Масштаб 1:5 000 000, ИМГРЭ, ГЕОКАРТ, Москва, 2001.

2. Байкал. Атлас / РАН. Сибир. отд-ние; Межведомственный науч. совет по программе "Сибирь"; предс. ред. кол. гл. ред. Г.И. Галазий, член-кор. РАН, науч. ред. В.М. Картушин [и др.]. - Москва: Роскартография, 1993. - 1 атл. (160 с.)

3. Лунина О.В. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития /О.В. Лунина, А.С. Гладков, Н.Н. Неведрова ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т земной коры. – Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2009. – 316 с.

4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Западно-Забайкальская. Лист N-48-XI – Москва. Объяснительная записка, 1979. –99с.

5. Ломоносов И.С.Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны / Отв. ред. д-р геол.-минерал. наук, проф. В. Г. Ткачук; АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т земной коры. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1974. - 166 с.

6. Ильин В.А., Кононов В.И., Поляк Б.Г., Козловцева С.В. Оценка глубинных температур с помощью гидрохимических показателей // Геохимия. – 1979. - № 6. - С. 888-901.

7. Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне / В.А.Голубев. - Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2007. - 222 с.

ПРУДЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЗАБАЙКАЛЬЯ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Чечель Л.П.[1], Замана Л.В.[1]
[1]*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН г. Чита, lpchechel@mail.ru*

Аннотация. Изучен химический состав вод прудов хвостохранилищ и их дренажей в районах отработки некоторых молибденовых, полиметаллических и вольфрамовых месторождений, расположенных в Восточном Забайкалье. Показан аномально высокий уровень экологической опасности вод – исследованные водоемы и водотоки в большинстве своем соответствуют обстановке чрезвычайной экологической ситуации и экологического бедствия. Установлено, что наибольшую угрозу поверхностным и подземным водам представляют хвостохранилища оловополиметаллического Шерловогорского и вольфрамового Бом-Горхонского месторождений

Ключевые слова: *воды, хвостохранилища, предельно допустимые концентрации.*

Abstract. The chemical composition of water in the ponds of tailings and their drainage in the areas of development of some molybdenum, polymetallic, and tungsten deposits located in Eastern Transbaikalia has been studied. An anomalously high level of ecological hazard of the water has been shown - the investigated reservoirs and watercourses for the most part correspond to a situation of extreme ecological conditions and ecological disaster. It has been established that the tailings of the tin-polymetallic Sherlovogorsk and tungsten Bom-Gorkhon deposits pose the greatest threat to surface and groundwater.

Key words: *water, tailings, maximum permissible concentrations.*

Отработка рудных месторождений в Восточном Забайкалье привела к появлению на прилегающих к рудникам территориях обширных участков, покрытых отходами горного производства – породными отвалами, горными выработками, хвостохранилищами обогатительных фабрик, которые на протяжении многих десятилетий являются источниками загрязнения окружающей среды. Посредством фильтрации сквозь дамбы и ложе хвостохранилищ в поверхностные и подземные воды поступают различные элементы, многие из которых относятся к первому и второму классам опасности. При этом содержания их могут многократно превышать предельно допустимые концентрации.

Цель данного исследования состояла в оценке вод прудов хвостохранилищ, как потенциального источника загрязнения подземных вод в районах ведения добычных и перерабатывающих работ.

Объекты и методы исследований

На протяжении нескольких лет в период летней межени исследовались воды прудов хвостохранилищ в районах отработки месторождений, расположенных на территории Забайкальского края: в 2014 году – молибденовых Жирекенского и Шахтаминского; в 2013, 2015, 2021 годах – вольфрамовых Спокойнинского и Бом-Горхонского, в 2012, 2013, 2021 годах – полиметаллических Акатуевского, Благодатского, Кадаинского и Шерловогорского. В период проведения гидрогеохимического опробования отрабатывались только два из них – вольфрамовые Бом-Горхонское и Спокойнинское. Для складирования и хранения продуктов переработки руды Спокойнинского месторождения использовалось хвостохранилище Орловского ГОКа, оставшегося от разработки одноименного редкометалльного месторождения. На прочих рудных объектах добыча руды не велась. Переработка ее, как на закрытых, так и действующих рудниках осуществлялась на местных обогатительных фабриках, отходы складировались на местах.

Вольфрамовые месторождения тяготеют к участкам развития песчано-сланцевых отложений протерозойского, палеозойского и мезозойского возрастов, прорванных мезозойскими гранитоидными интрузиями [4]. Для руд жильного кварц-гюбнерит-сульфидного Бом-Горхонского месторождения характерно повышенное содержание

сульфидов. Главными рудными минералами на Бом-Горхоне являются пирит, гюбнерит, молибденит, сфалерит, на Спокойнинском месторождении – вольфрамит, берилл, бисмутит, танталониобаты, касситерит. Молибденовые Шахтаминское и Жирекенское месторождения локализованы в гранитоидах мезозойского и каменноугольного возраста [4]. Вмещающие породы штокверкового медно-молибденового Жирекенского месторождения характеризуются повышенной щелочностью, главные рудные минералы – молибденит и халькопирит. Жильное Шахтаминское месторождение относятся к молибденит-галенит-сфалеритовой рудной формации. Наиболее распространенные рудные минералы – молибденит, пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, антимонит, арсенопирит. Шерловогорское оловополиметаллическое месторождение приурочено к одноименному гранитному массиву [4]. Рудные тела месторождения относятся к штокверковому и жильному типам. Основные рудные минералы – касситерит, пирит, арсенопирит, галенит, сфалерит. Акатуевское, Благодатское и Кадаинское свинцово-цинковые месторождения относятся к рудной формации галенит-сфалерит-карбонатно-кварцевой метасоматических залежей и карбонатных пород нижнепалеозойского возраста [1, 4]. Рудные тела месторождений, представленные пластообразными залежами, штоками и линзами, залегают среди карбонатных пород. В составе жильных минералов большую роль играют различные карбонаты – доломит, анкерит, кальцит. Среди типов полиметаллических руд преобладают пирит-галенит-сфалеритовый (Благодатское месторождение) и галенит-сфалеритовый (Кадаинское и Акатуевское месторождения).

Всего за период исследований было отобрано 30 водных проб. Химико-аналитические исследования проводились общепринятыми методами в Институте природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (г. Чита). Основные катионы и металлы определялись атомно-адсорбционным методом на спектрофотометре SOLAAR M6. Дополнительно выполнялся анализ методом ICP-MS в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск) на приборе ELEMENT 2.

Результаты исследования

Малое количество и рассеянный характер сульфидной минерализации в рудах Спокойнинского вольфрамового месторождения определяют слабощелочную и нейтральную реакцию вод пруда-накопителя хвостохранилища, а также дренажного водоема под его нижней дамбой (табл. 1 – ОР-1, ОР-2). В течение всего периода наблюдений эти воды имели преимущественно SO_4-HCO_3 Na-Ca состав и минерализацию менее 1 г/л [6, 8]. Нейтральная и слабощелочная реакция вод определяют в них аномально высокие концентрации элементов-анионогенов – вольфрама и урана. Повышенные содержания свойственны также Fe, Mn, Sr и Li. В водах пруда хвостохранилища и дренажного водоема под его нижней дамбой (табл. 1) было зафиксировано превышение над ПДК [6] содержаний элементов 1, 2 и 3 классов опасности в единицы-десятки раз (табл. 1, рис. 1 – Кпдк).

Воды прудов-накопителей Бом-Горхонского и Шерловогорского хвостохранилищ наиболее полно соответствуют геохимическому типу кислых сульфатно-металлоносных вод, формирующихся в зоне техногенеза и на других сульфидсодержащих месторождениях Восточного Забайкалья [8]. Им присущи минимальные значения pH, сульфатный и фторидно-сульфатный анионный состав с ведущими катионами Ca и Mg и максимальной минерализацией [2] (табл. 1– БГ-1, БГ-2, ШГ). Эти же воды характеризуются наиболее высокими из всех исследованных техногенных водоемов концентрациями микроэлементов, в том числе тяжелых металлов, превышения которых над ПДК в отдельных случаях достигают тысяч и десятков тысяч единиц. Так, в водах пруда-отстойника и дренажа под замыкающей дамбой Бом-Горхонского хвостохранилища (табл. 1 – БГ-1, БГ-2) отмечено превышение над ПДК содержаний элементов 1, 2 (Cd, F, Be, U, Ni, Li, Pb), а также 3 и 4 классов опасности (Al, Fe, Mn, SO_4, Ti, Zn, Cu) (рис. 1). Превышение над ПДК содержаний элементов в водах пруда Шерловогорского хвостохранилища (табл. 1 – ШГ) зафиксировано в наибольшей степени

для элементов 1 и 2 классов опасности – Cd и Be, а также для элементов 3 класса опасности – Mn, Al и Zn (рис. 1).

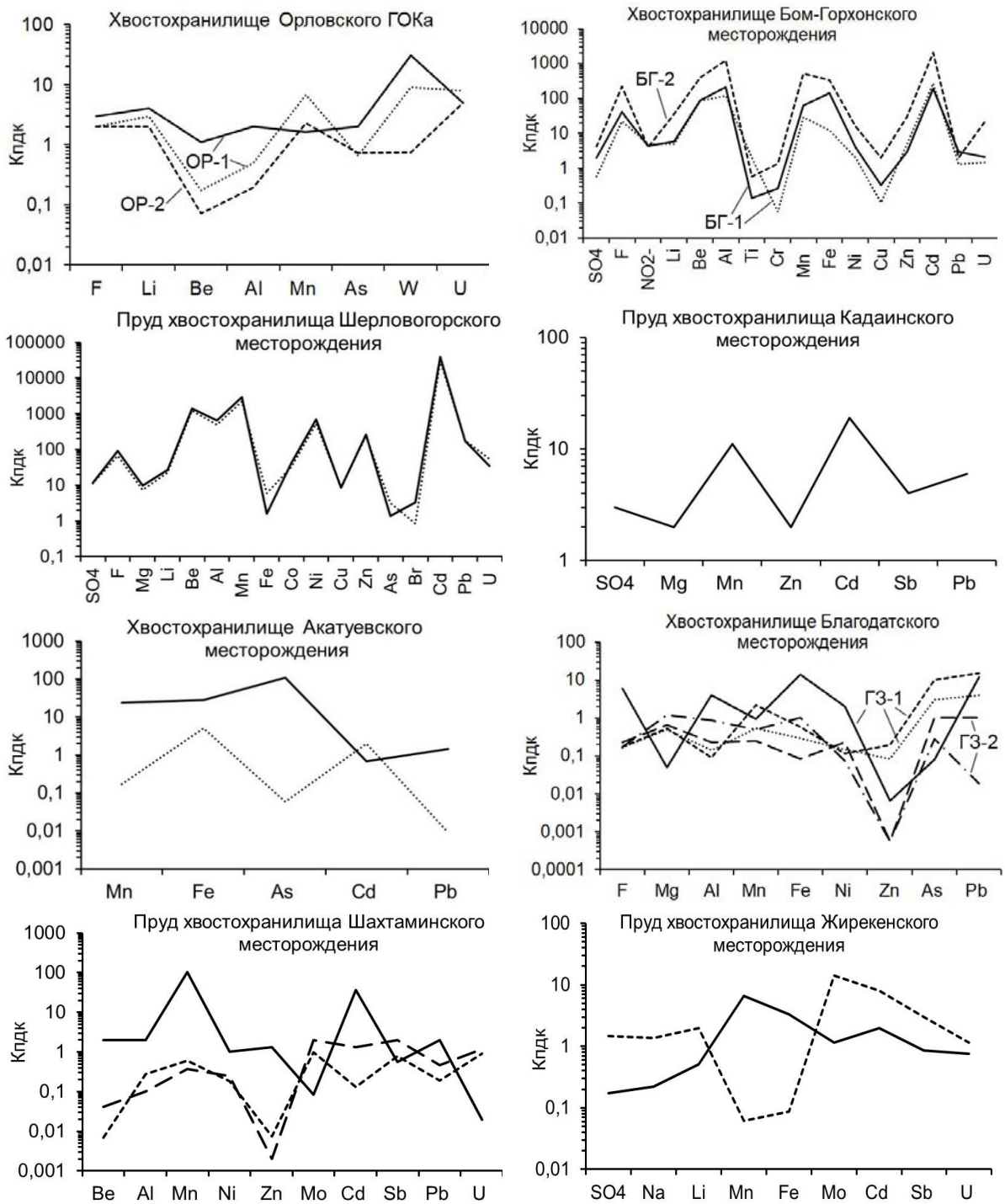


Рис. 1. Распределение концентраций элементов, выраженных в единицах ПДК [5].

К сульфатному магниево-кальциевому типу относятся и воды пруда хвостохранилища Кадаинского полиметаллического месторождения [7]. Однако, несмотря на сульфидный минеральный состав руд, им свойственна слабощелочная реакция, что объясняется нейтрализующим действием карбонатов вмещающих оруденение горных пород. По величине минерализации воды относятся к типу солоноватых (табл. 1 – СБ). Из числа микрокомпонентов аномальными концентрациями выделяются Mn, Zn и Sr. В водах пруда отмечено превышение над ПДК содержаний

элементов второго (Cd, Sb, Pb), а также третьего и четвертого классов опасности (Mn, SO_4, Mg, Zn).

Локализация сульфидных руд Акатуевского и Благодатского полиметаллических месторождений в карбонатных породах способствует нейтрализации кислотности формирующихся в этих условиях вод. Как следствие, воды из линейной разгрузки под нижней дамбой хвостохранилища Акатуевского (табл. 1 – АК) и ручья в хвостохранилище Благодатского (табл. 1 – ГЗ-1, ГЗ-2) месторождений характеризуются нейтральной и слабощелочной реакцией, HCO_3-SO_4 и SO_4-HCO_3 Mg-Ca составом и минерализацией 0,4-1,0 г/л [7]. Этим водам присущи аномально высокие концентрации As, Al, Fe, Mn, Zn и других элементов. Наибольшее превышение над ПДК содержаний элементов 1 и 2 классов опасности отмечалось для As и Pb, 3 класса опасности – для Fe и Mn (рис. 1).

Преимущественно ультрапресные, нейтральные и слабощелочные, SO_4 и HCO_3-SO_4 Mg-Ca типа воды формируются в хвостохранилище Шахтаминского месторождения [6] (табл.1 – ШХ). Воды пруда хвостохранилища Жирекенского ГОКа обладают слабощелочной реакцией, повышенной минерализацией, SO_4-HCO_3 и SO_4 анионным составом, ведущие катионы Ca и Na [6] (табл. 1– ЖР). Миллиграммовых и близких к ним значений в водах хвостохранилищ молибденовых месторождений достигают концентрации Zn, Mn, Sr, Mo и Fe. В водах пруда хвостохранилища Шахтаминского месторождения отмечено превышение над ПДК содержаний элементов 1, 2 и 3 классов опасности (рис.1). Превышение над ПДК в водах Жирекенского хвостохранилища зафиксировано для содержаний элементов 1, 2, 3 и 4 классов опасности.

Заключение

Представленные данные показывают аномально высокий уровень экологической опасности рассматриваемых вод, которые согласно критериям оценки степени химического загрязнения поверхностных вод [3] в большинстве своем соответствуют обстановке чрезвычайной экологической ситуации и экологического бедствия. Наибольшую угрозу поверхностным и подземным водам представляют хвостохранилища Шерловогорского и Бом-Горхонского месторождений. Озабоченность вызывают также расположение некоторых объектов в непосредственной близости к населенным пунктам Новый Акатуй, Шерловая Гора, Вершино-Шахтаминский и другим.

Работа подготовлена в рамках выполнения Государственного задания № FUFR-2021-0006.

Список литературы

1. Геология и закономерности размещения эндогенных месторождений Забайкалья / Д.И. Горжевский, Н. А. Фогельман, Е. А. Алекторова и др. – М.: Недра, 1970. – 232 с.

2. Замана, Л. В., Чечель, Л. П. Геохимия дренажных вод горнорудных объектов вольфрамового месторождения Бом-Горхон (Забайкалье) / Л. В. Замана, Л. П. Чечель // Химия в интересах устойчивого развития. – 2014. – Т. 22 (3). – С. 267–273.

3. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. – М.: Мин-во охраны окружающей среды России, 1992. – 55 с.

4. Месторождения Забайкалья / под ред. акад. Н. П. Лавёрова (в 2 кн.). – М.: Геоинформмарк, 1995. – Т. 1. – Кн. 1. – 192 с.

5. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М.: Минздрав РФ, 2021. – 496 с.

6, Чечель, Л. П. Эколого-гидрогеохимические последствия отработки вольфрамовых и молибденовых месторождений Восточного Забайкалья / Л. П. Чечель // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328 (6). – С. 52–63.

7. Чечель, Л. П. Геохимические типы вод хвостохранилищ свинцово-цинковых месторождений Восточного Забайкалья / Л. П. Чечель, Л. В. Замана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330 (4). – С. 17–25.

8. Chechel, L. P. Formation of waters of tungsten-ore areas under the influence of natural and anthropogenic factors (Eastern Transbaikalia, Russia) / L. P. Chechel, L. V. Zamana, V. A. Abramova // Applied Geochemistry. – 2023. – V. 154, 105687.

Таблица 1. Минимальные–максимальные значения параметров химического состава вод.

Параметр	ОР-1	ОР-2	БГ-1	БГ-2	ШГ	СБ	АК	ГЗ-1	ГЗ-2	ШХ	ЖР	*ПДК, мг/л
pH	7,77-7,96	7,53	3,16-4,7	3,04	3,03-3,9	7,8	7,25-7,35	7,5-8,26	8,3	5,7-8,37	7,64-7,76	6-9
Eh. мВ	98-172	174	–	–	295-427	262	-92-17,1	159-293	151-255	190-253	29-104	–
HCO_3^-, мг/л	162,3-166,8	238,2	3.66	0	0	73,2	241-263	122-216	273-448	1,22-65-3	70,9-243	–
SO_4^{2-}	54,5-96,6	134,1	288-776	2100	5563-5880	1513	478-519	51-111,3	138-107,5	65,7-114-8	86,4-743,4	500
Cl^-	9,83-13,2	13,8	1,4-2.2	2,8	26,8-31,5	3,7	1,6-2,8	2,2-5,4	1,8-2	0,62-3,37	3,52-42	–
F^-	2,48-3,15	2,41	26,2-47,7	262	79,2-109,3	0,72	0,49-0,79	0,2-6,9	0,21-0,27	0,11-0,85	0,36-0,84	1,2
Ca^{2+}	31,3-42,4	63,9	85,6-139	821	607-764,2	459,2	155-189,5	39,4-69,3	73,6-86,8	32,7-34,7	75,7-126	–
Mg^{2+}	9,26-13,2	15,7	19,6-19,9	11,4	372-493,6	112,5	42,9-50	2,5-26,2	33,1-58,9	6,17-7,91	11,3-16	50
Na^+	28,8-35,4	50,3	3,59-6,66	13,1	172,3-192,7	16,2	8,89-12,8	4,67-42,8	6,47-7,04	4,88-5,41	44,7-271	200
K^+	12,3-14,2	6,09	0,97-2,33	3,59	12,5-19,1	5,73	1,42-4,49	0,91-4,74	0,52-0,67	0,77-1,75	4,65-18,9	–
Сумма ионов	321-503	614	434-989,3	3214	6990-9065	2188	458-1013	382-420	710,6	163-185,1	470-1280	1000
Li, мкг/л	79-113	61,7	135-174	1062	686-800,4	29	11,9	7,3	10,1	0,21-8,5	15-46	0,03
Be	0,03-0,21	0,01	17-18	80	241-276,6	0,003	0,016	0,009-0,015	0,017	0,001-0,35	0,016-0,02	0,0002
Al	82,9-468	38,2	24181-40970	239627	98787-130941	14,2	19-45,5	18-781,3	46-174	20-337	8,9-25	0,2
Ti	0,49-1,5	0,88	14,2-174	58	0,72-2,25	0,27	0,63	0,25-0,46	3,33	0,91-1,99	1,06-1,11	0,1
Cr	0,09-0,34	0,09	2,79-13,1	70	1-2,81	0,64	0,15-0,27	0,39-4,95	0,43	2,5-3,18	2,74-2,79	0,05
Mn	165-680,5	34,8	2449-6192	52541	222862-295814	1106	17,1-2361	54-220	24,4-49	38-10294	6,1-656	0,1

Fe	34,1-181	152	3596-42746	100312	476,2-1814	87	1558-8435	88-4055	24,6-269	122-179	26-994	0,3
Co	0,35-0,59	0,16	14,8-65	384	3167-4032	3,61	0,35-1,05	0,4-15,4	0,24-8,45	0,1-4,52	0,03-0,12	0,1
Ni	2,1-5,35	1,31	49-70	310	10571-13988	11,8	2,1-4,6	2,28-38,5	1,46-4,6	3,68-20	0,96-3,88	0,02
Cu	1,42-2,6	0,78	102-332	1802	8348-9123	3,51	2-4,68	5,3-13,8	0,5-1,05	6,6-117	3,56-4,15	1,0
Zn	4,29-5,18	3,01	13515-24922	151028	1313382-1162005	7846	201,7-425	32,9-982	2,82	10,3-6538	13,1-19	5,0
As	6,39-18	7,34	0,13-0,44	0,25	13,9-31	7,5	0,59-1097	0,79-99	2,79-9,89	1,16-2,88	5,2-8,5	0,01
Sr	327-355,8	557,4	541-609	2315	975,3-1069	2526	530-1148	44-241	369	208-379	1196-1832	7,0
Mo	29-44,8	39	0,32-0,74	1,3	5,2-19,5	2,21	5,9	0,002-0,004	0,01	5,9-110	81-965	0,07
Cd	0,34-0,45	0,29	192-270	2034	30959-38916	19	0,68-1,77	0,059-0,78	0,002	0,13-37	1,69-7,9	0,001
Sb	0,64-0,75	0,27	0,032-0,095	0,036	1,71-1,84	19	0,91	0,21-0,62	н.о.	2,82-7,4	4,31-14,2	0,005
W	448-1544	37,7	0,82-7,9	4,09	3,68-8,52	0,013	0,21	0,034-0,1	0,006	0,04-0,22	0,69-2,58	0,05
Pb	0,8-2,1	0,76	13,3-26	19	1700-1791	57	14,4	42-150	0,19-8,74	1,9-19	0,27-0,32	0,01
U	71-114,7	73	22-32	321	515-809	0,45	1,01	0,77-0,88	1,62	0,3-18	11,4-17	0,015

*Примечание: ОР-1 – пруд хвостохранилища Орловского ГОКа; ОР-2 – дренажный водоем под нижней дамбой хвостохранилища Орловского ГОКа; БГ-1 – пруд хвостохранилища Бом-Горхонского вольфрамового месторождения; БГ-2 – ручей Зун-Кильки нда под нижней дамбой хвостохранилища Бом-Горхонского вольфрамового месторождения; ШГ – пруд хвостохранилища Шерловогорского полиметаллического месторождения; СБ - пруд хвостохранилища Кадаинского полиметаллического месторождения; АК - линейная разгрузка под нижней дамбой хвостохранилища Акатуевского полиметаллического месторождения; ГЗ-1 – ручей в хвостохранилище Благодатского полиметаллического месторождения; ГЗ-2 – ручей М. Зерентуй под нижней дамбой хвостохранилища Благодатского полиметаллического месторождения; ШХ - пруд хвостохранилища Шахтаминского молибденового месторождения; ЖР - пруд хвостохранилища Жирекенского молибденового месторождения; «–» – данные отсутствуют; н.о. – концентрация ниже предела определения метода; * – СанПиН 1.2.3685-21.*

РОЛЬ ТЕХНОГЕНЕЗА В ФОРМИРОВАНИИ РЕЖИМА НАДМЕРЗЛОТНЫХ ВОД

Шепелёв В.В., Павлова Н.А.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, napavlova@mpi.ysn.ru

Аннотация. Приведен анализ результатов многолетних наблюдений за режимом надмерзлотных и межмерзлотных вод на экспериментальных площадках в г. Якутске. Рассмотрены особенности изменчивости уровня и химического состава надмерзлотных вод сезонноталого слоя в течение года и многолетнем цикле. Изучены техногенные факторы и естественные процессы, вызывающие формирование и миграцию надмерзлотно-межмерзлотных криопэгов в слое годовых теплооборотов.

Ключевые слова: *надмерзлотные воды сезонноталого слоя, криопэги, уровенный режим, химический состав*

Abstract. The article provides an analysis on the results of annual observations on surpapermafrost intrapermafrost water regimes in experimental sites in Yakutsk. The analysis examines the variations in the level and chemical composition of the suprapermafrost waters in seasonal thaw layer over the course of a yearly and multiyear cycle, as well as a study of the anthropogenic factors and natural processes causing the formation and migration of suprapermafrost- intrapermafrost cryopegs above the depth of zero annual amplitude.

Key words: *Suprapermafrost water of annual thawed layer, cryopeg, level regime, chemical composition*

Наблюдения за режимом надмерзлотных вод на осваиваемых территориях криолитозоны осуществляются пока в весьма ограниченных масштабах, что можно объяснить трудоемкостью подобных работ и неразработанностью методики их проведения в сложных климатических и мерзлотных условиях. В этом отношении безусловный научный, практический и методический интерес представляют многолетние исследования, проведенные Институтом мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН по изучению условий формирования и режима надмерзлотных вод сезонноталого слоя, а также грунтовых над- и межмерзлотных вод, обладающих отрицательной температурой и повышенной минерализацией (криопэгов), на территории г. Якутска и на отдельных сельскохозяйственных объектах Центральной Якутии.

Город Якутск расположен в левобережной расширенной части долины р. Лены, представляющей собой террасированную аккумулятивную равнину шириной 6–8 км. Надпойменные террасы слабо эродированы: абсолютные отметки рельефа изменяются от 85–94 м (высокая пойма) до 98–102 м (вторая надпойменная терраса). Многолетнемерзлые породы мощностью свыше 300 м имеют площадное распространение. Глубина сезонного протаивания пород на территории города изменяется от 0.5 до 4.5 м и зависит в основном от литологического состава отложений, их влажности, засоленности и затененности поверхности.

Четвертичные отложения террас, перекрывающие сплошным чехлом терригенные юрские породы, представлены до глубины 0.5-4.0 м льдистыми супесями, суглинками, нередко заиленными и заторфованными. Ниже залегают мелкозернистые пески с отдельными тонкими прослоями торфа и льда. Пойменные осадки мощностью 4-8 м подстилаются до глубины 17-25 м русловыми средне- и крупнозернистыми песками с включениями гравия и гальки в основании разреза. Надмерзлотные воды сезонноталого слоя распространены повсеместно, но их гидродинамический режим на разных участках имеет свои особенности и зависит от комплекса факторов.

Для изучения роли и особенностей воздействия техногенных факторов на режим надмерзлотных вод деятельного слоя на территории г. Якутска в 1993 г. было оборудовано две экспериментальных площадки и шесть гидрорежимных пунктов в трех административных городских округах [1-3]. На экспериментальных площадках велись наблюдения за изменением уровня и химического состава надмерзлотных вод, температурой, влажностью и солевым составом пород зоны аэрации. Гидрорежимные

пункты представляли собой наблюдательные колодцы, оборудованные под отапливаемыми зданиями, построенными без проветриваемого подполья (частные жилые дома, склады, гаражи и т.д.) Комплекс наблюдений включал измерения уровня надмерзлотных вод с периодичностью не менее трех раз в месяц и отбор проб воды на химический анализ с периодичностью не менее одного раза в месяц.

Как показали результаты исследований, на всех площадках в годовом цикле отмечается однотипность изменения влажности и засоленности пород по вертикальному разрезу зоны аэрации. Максимальное значение этих показателей как в конце зимнего периода, так и в летнее время, а также в начале нового сезонного цикла промерзания грунтов приурочены в основном к интервалу 0,4–0,6 м, в пределах которого залегает слой суглинков. Следовательно, несмотря на то, что в летний период, по сравнению с зимним, изменяется как величина, так и направленность температурного градиента, распределение влажности пород и их засоленности по вертикальному разрезу зоны аэрации имеет одинаковый характер с выраженными максимальными значениями этих показателей в интервале залегания слабоводопроницаемого слоя.

В годовом цикле происходят сезонные изменения засоленности грунтов зоны аэрации: наибольшие значения отмечаются в конце зимнего периода, в летнее время наблюдается снижение засоленности пород, а в начале зимнего периода вновь происходит ее повышение.

Надмерзлотные воды, формируемые в летний период, имеют химический состав, аналогичный составу поровых растворов пород зоны аэрации. Минерализация их, в зависимости от засоленности водовмещающих грунтов, условий водообмена и степени техногенной нагрузки, изменяется от 1,8-2,0 г/л до 15,6–18,2 г/л.

Появление надмерзлотных вод сезонноталого слоя отмечается, как правило, в начале июня. Однако на гидрорежимных пунктах К-2 и К-3 заполнение наблюдательных колодцев талой снеговой водой происходит уже в апреле. В течение летнего периода года положение уровня надмерзлотных вод определяется деградационным характером смещения кровли сезонномерзлых пород, служащих нижним криогенным водоупором для этих вод, а также интенсивностью и продолжительностью выпадающих атмосферных осадков.

В целом за летний период диапазон колебаний уровня надмерзлотных вод деятельного слоя весьма значителен (до 92–107 см) (рис. 1). Месячные изменения уровня этих вод в различных гидрорежимных пунктах варьировали в отдельные годы от 3 до 63 см. С установлением отрицательных средних суточных температур воздуха на всех гидрорежимных пунктах отмечается устойчивый спад уровня надмерзлотных вод, который продолжается до иссушения водоносного слоя.

Химический тип надмерзлотных вод в течение года не претерпевает существенных изменений, хотя величина общей минерализации изменяется весьма существенно. Соотношение между отдельными главными компонентами ионного состава надмерзлотных вод остается одинаковым даже в случаях, когда величина общей минерализации повышается в 1,5–2 раза.

Зависимости между минерализацией надмерзлотных вод и изменениями их уровня за период наблюдений не отмечается. Это можно объяснить различной степенью воздействия техногенных факторов на качественный состав надмерзлотных вод.

Большое влияние на формирование подземных вод, формирующихся в сезонноталом слое, оказывает барражирование поверхностного и надмерзлотного стока дорогами и подземными коммуникациями [4]. Так, на одной из экспериментальных площадок в г. Якутске были пробурены две скважины по разные стороны грунтовой дороги, секущей ложбину стока. Скважина 3/11 расположена перед барражом, скважина 1/11 – за дорогой. Для изучения динамики надмерзлотных вод СТС, скважины оборудованы фильтрами в интервале 0.5–2.5 м.

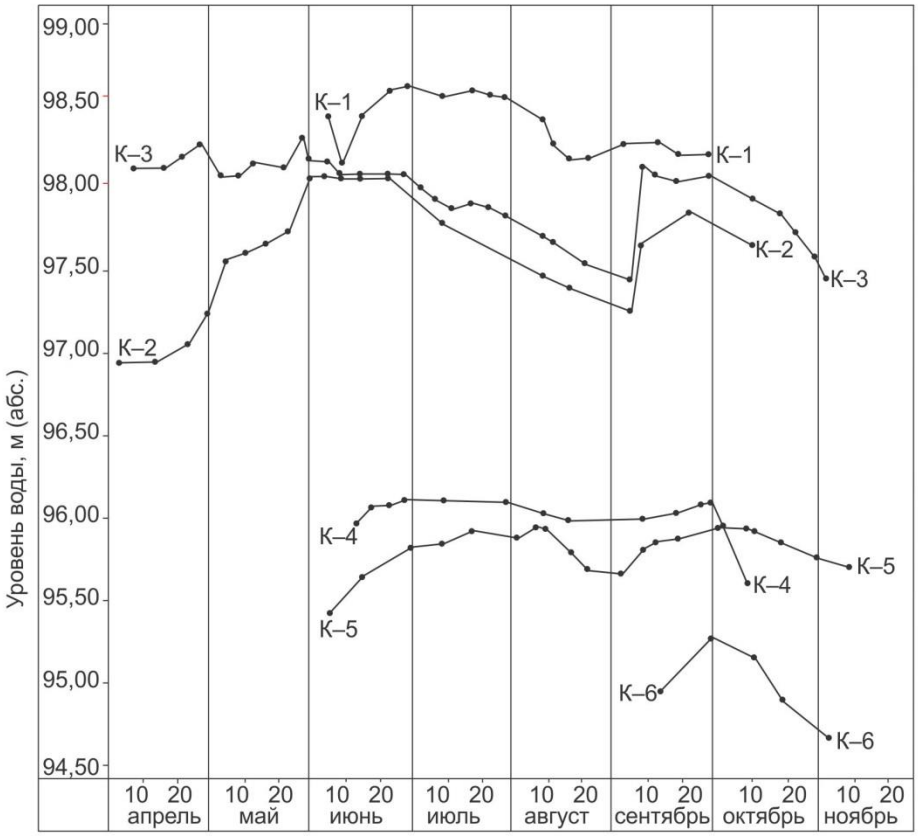


Рис. 1. Изменение уровня надмерзлотных вод по гидрорежимным пунктам в годовом цикле.

По данным наблюдений, формирование вод СТС происходит в июне, с началом протаивания пород. Поверхностные воды, стекающие с водосборной площади и накапливающие в заболоченной низине перед дорогой (скв. 3/11), задерживают прогревание грунтов сезонноталого слоя. В конце лета глубина протаивания пород здесь составляет 0.8–1.2 м, уровень надмерзлотных вод залегает на глубине 0.10–0.15 м от поверхности земли.

На участке скв. 1/11 мощность сезонноталого слоя в сентябре равна 1.5–1.6 м, породы обводнены с глубины 0.27–0.30 м. Промерзание протаявшего слоя пород на обоих участках происходит к концу ноября-декабрю, о чем свидетельствует отсутствие воды в скважинах. Не смотря на короткий период существования надмерзлотных вод СТС, концентрация растворенных солей в них значительна (2.9–5.8 г/л). Причем большее накопление компонентов минерализации в надмерзлотных водах и вмещающих их грунтах происходит выше места барражирования стока (рис. 2).

На участках засоленных грунтов при концентрировании солей, имеющих низкие температуры начала кристаллизации, в зимний период могут сохраняться криопэги. В г. Якутске линзы криопэгов разной мощности и конфигурации часто вскрывают скважинами на участках сноса старой деревянной застройки, в замкнутых низинах и озерных котловинах, а также на участках, прилегающих к дорогам и засыпанным ложбинам стока. В слое годовых колебаний температуры горных пород (до глубины 20 м) на некоторых участках были выявлены двух- и даже трехъярусные криопэги, разделенные многолетнемерзлыми перемычками. Изучение особенностей формирования и динамики таких над- и межмерзлотных криопэгов при воздействии различных техногенных факторов на территории г. Якутска проводятся с 1971 г. [5-9].

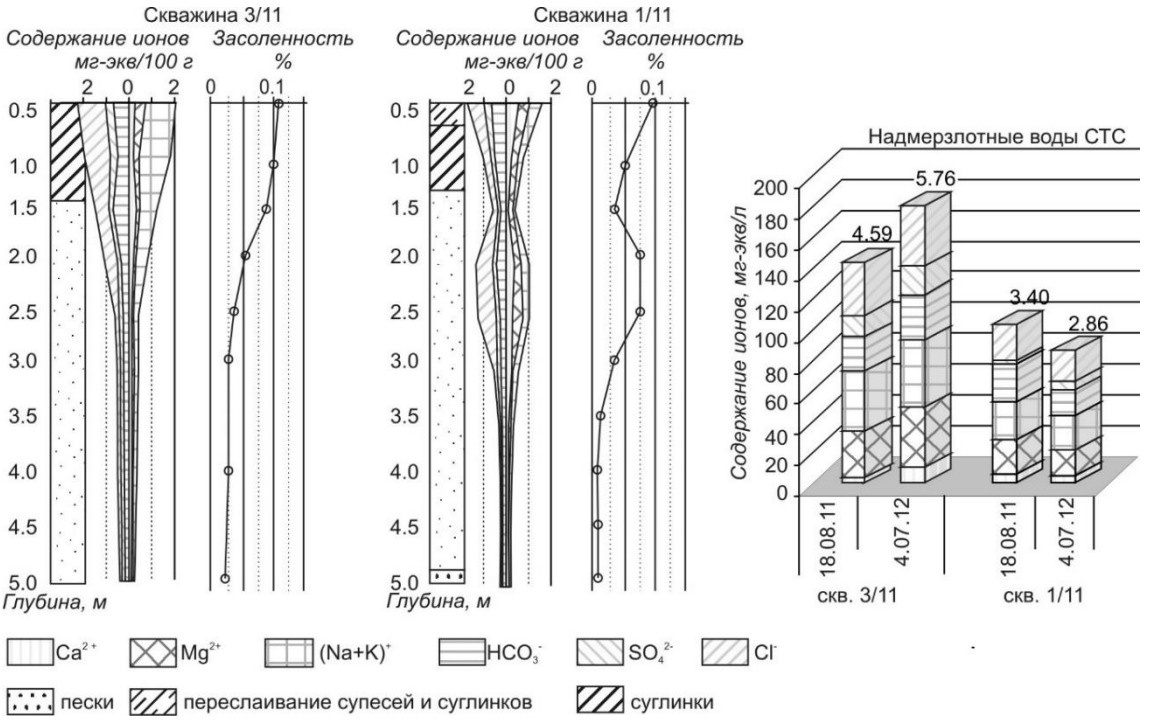


Рис. 2 Изменение химического состава водной вытяжки пород и надмерзлотных вод на участке барражирования стока.

Формирование подобной ярусности связано с многолетней динамикой линз криопэгов [2, 7]. Эти отрицательно-температурные минерализованные грунтовые воды неравновесны со льдом, содержащимся в подстилающих и окружающих их дисперсных мерзлых породах, поэтому за счет процесса концентрационной диффузии переводят его в жидкую фазу, смещаясь вниз по разрезу. В наиболее суровые зимы верхняя часть мигрирующей вглубь линзы криопэгов может перейти в многолетнемерзлое состояние. Именно таким образом образуется второй ярус криопэгов. В результате промерзания сверху водосодержащих пород этого яруса повышается минерализация остаточного объема линзы криопэгов и возникает криогенный гидростатический напор, что ускоряет дальнейшее смещение криопэгов второго яруса вниз по разрезу и по площади. На участках с высокими отрицательными температурами миграция криопэгов может происходить до подошвы слоя годовых теплооборотов.

Проведенные исследования режима над- и межмерзлотных криопэгов на территории г. Якутска показали, что характер изменения их уровня в течение года в целом аналогичен внутригодовой динамике надмерзлотных грунтовых вод в естественных условиях. Даже в случаях существования многоярусных линз криопэгов, их уровенный режим в годовом цикле однотипен и определяется в основном сезонной изменчивостью температурных условий приземного воздуха (рис. 3.). Весной с переходом средних суточных температур воздуха через 0 °С (конец апреля - начало мая) отмечается повышение уровня криопэгов, залегающих на различных глубинах, которое продолжается до конца теплого сезона года. При переходе средних суточных температур воздуха в сторону отрицательных значений (конец сентября – начало октября) начинается понижение их уровня, продолжающееся в течение всего зимнего периода. Различаются лишь годовые амплитуды колебания уровня криопэгов отдельных ярусов. Наименьшая амплитуда присуща криопэгам нижнего (третьего) яруса, а наибольшая свойственна верхнему (первому) их ярусу. Величина минерализации криопэгов имеет более сложную динамику в годовом цикле, но в целом изменяется в противофазе с колебаниями их уровня.

На участках многоярусного залегания криопэгов установленное однообразие их химического состава и синхронность изменения уровней свидетельствует о гидравлической связи подземных вод, залегающих в слое годовых теплооборотов. В условиях современного потепления климата происходит улучшение этой связи, что отражается в тенденции выравнивания абсолютных отметок уровня воды в скважинах и небольшого уменьшения минерализации криопэгов нижнего яруса вслед за надмерзлотными водами.

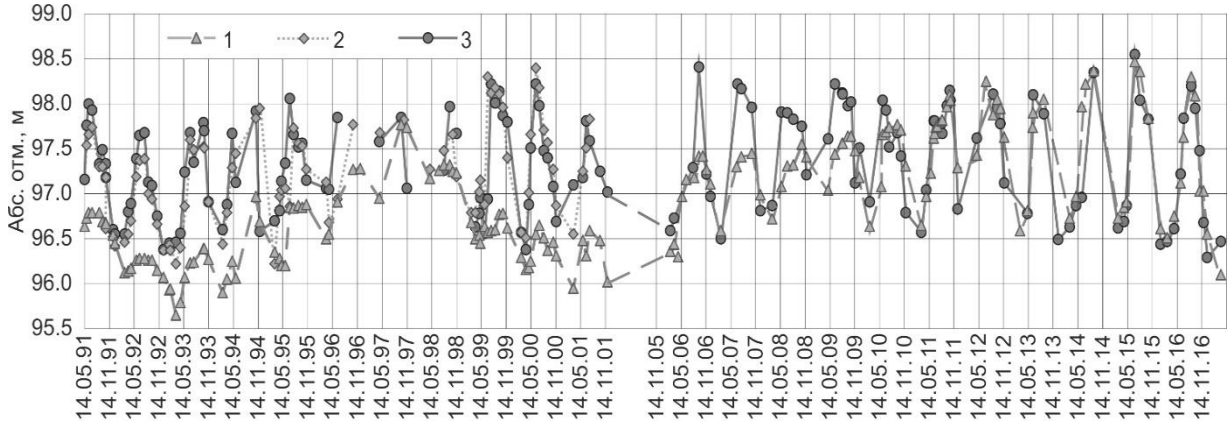


Рис. 3. Изменение уровня криопэгов различных ярусов в многолетнем цикле: 1 – первый ярус (интервал 2 – 6 м), 2 – второй ярус (интервал 7 – 8 м), 3 – третий ярус (м).

Таким образом, несмотря на локализованный характер воздействия техногенных факторов, они вызывают существенные изменения уровенного и гидрохимического режима надмерзлотных вод, как в течение года, так и в многолетнем разрезе. Это указывает на необходимость учета роли техногенных факторов при проведении инженерно-геокриологических изысканий, а также при разработке рекомендаций и конкретных мероприятий по борьбе с подтоплением надмерзлотными водами осваиваемых территорий криолитозоны.

Список литературы

1. Шепелёв, В.В. Геокриологические условия формирования и классификация надмерзлотных вод / В.В Шепелёв // Формирование подземных вод криолитозоны. – Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1992. – С. 3-14.

2. Шепелёв, В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. / В.В Шепелёв. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. – 169 с.

3. Санникова, А.В. Изучение особенностей режима надмерзлотных вод на урбанизированных территориях криолитозоны (на примере г. Якутска) / А.В. Санникова // Материалы научной конференции «Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов». – Иркутск: Институт географии СО РАН, 2005. – С. 139-140.

4. Павлова. Н.А. Оценка техногенного влияния на обводненность и гидрохимическую обстановку г. Якутска / Н.А. Павлова, М.В. Данзанова, С.И. Сериков // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2014. №3. – С. 207-214

5. Анисимова, Н.П. Формирование криопэгов на участке антропогенного загрязнения // Н.П. Анисимова, О.П. Жигалова, С.Н. Кузнецов // Мерзлотно-гидрогеологические исследования зоны свободного водообмена. – М.: Наука. 1989. – С. 98-106.

6. Анисимова Н.П. Режимные исследования надмерзлотных таликов в окрестностях Якутска / Н.П. Анисимова // Криолитозона и подземные воды Сибири. Ч.2. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 1996. – С. 3-16.

7. Анисимова, Н.П. Особенности формирования криопэгов в слое годовых теплооборотов на территории Якутска / Н.П. Анисимова, Н.А. Павлова // Криосфера Земли. 2002. №.4 (т. VI). – С. 63-69.

8. Анисимова, Н.П., Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / Н.П. Анисимова, Н.А. Павлова. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. – 189 с.

9. Павлова, Н.А. Межгодовая изменчивость химического состава техногенных криопэгов на территории города Якутска / Н.А. Павлова, М.В. Данзанова // Криосфера Земли, 2018, №6 (т. XXII). – С. 26-34.

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ ХАПХАЛЬСКОГО УЩЕЛЬЯ

Яндола Н.И. [1,2], Черных А.В.[1]
[1]*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, n.yandola@g.nsu.ru*
[2]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

Аннотация. В настоящей работе обобщены первые данные по изучению геохимических особенностей Хапхальского ущелья, расположенного на южном берегу Крымского полуострова. Установлено, что воды пресные с величиной общей минерализации от 263 до 451 мг/дм^3, имеют гидрокарбонатный кальциевый состав, слабощелочные (pH от 7.4 до 8.6) с окислительной геохимической обстановкой (Eh от +151.8 до +193.4). На основе сравнительного анализа с действующими нормативными документами установлено, что содержания основных макро- и микрокомпонентов в подземных водах не превышают предельно допустимых концентраций, а сами воды относятся к высшей категории качества.

Ключевые слова: *гидрогеохимический мониторинг, Хапхальское ущелье, водопад Джур-Джур, южный берег Крымского полуострова.*

Abstract. The present work summarizes the first data on the study of geochemical features of the Khapkhal Gorge, located on the southern coast of the Crimean Peninsula. It is established that the waters are fresh with the value of total mineralization from 263 to 451 mg/dm^3, have calcium hydrocarbonate composition, slightly alkaline (pH from 7.4 to 8.6) with oxidizing geochemical environment (Eh from +151.8 to +193.4). On the basis of comparative analysis with the current normative documents it was established that the content of the main macro- and microcomponents in groundwater in general does not exceed the maximum permissible concentrations, and the waters themselves belong to the highest quality category.

Key words: *hydrogeochemical monitoring, Khapkhal Gorge, Djur-Djur waterfall, southern coast of the Crimean Peninsula.*

Изучение процессов формирования состава природных вод в пределах горно-складчатых сооружений является одним из важнейших вопросов в современной гидрогеохимии, поскольку отражает его в современных областях питания гидрогеологических структур. Объекты Хапхальского ущелья уникальны с этой точки зрения. Еще в советские годы планировалось построить Солнечногорское водохранилище, которое бы обеспечивало Алушту и близлежащие населенные пункты пресной водой из реки Улу-Узень Восточный с самым полноводным крымским водопадом – Джур-Джур, что в переводе с тюркского значит «вода-вода». Проект так и не был закончен, но в связи с развитием туристической инфраструктуры он вновь приобрел большую актуальность. В настоящее время воды Хапхальского ущелья (река Улу-Узень Восточный) используются для водоснабжения населения некоторых населенных пунктов южного берега Крымского полуострова: сёла Солнечногорское, Малореченское и Рыбачье. Поэтому необходимо следить за качеством и состоянием вод как в основном русле, так и в области питания подземных вод.

В настоящей работе приведены результаты изучения природных вод Хапхальского ущелья, расположенного на южном берегу Крымского полуострова. Исследования продолжают нашу серию работ по изучению геохимических типов природных вод Крыма [1-9]. Было отобрано 26 проб природных вод из 14 объектов в пределах Хапхальского ущелья и в его окрестностях (рис. 1) в течение четырех полевых сезонов – в 2019, 2020, 2021 и 2022 годах. Непосредственно на месте отбора проб происходило измерение значений pH, Eh, температуры, содержания растворенного O_2 и HCO_3^- при помощи мультипараметрового измерителя pH/ОВП/проводимости Hanna HI98195 и оксиметра Hanna HI98198. Лабораторное изучение химического состава проводилось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.

Название химического типа воды дано в соответствии с формулой М.Г. Курлова (более 10 %-экв) по оттеночному принципу от меньшего к большему.

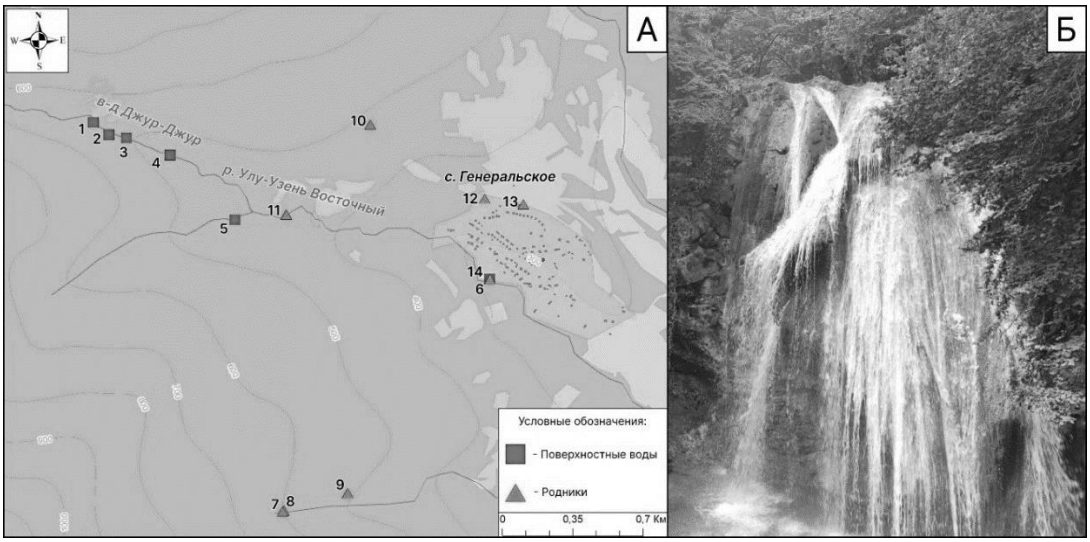


Рис. 1. Местоположение изученных объектов (А) и общий вид водопада Джур-Джур (Б). 1-4: Верхняя, средняя, нижняя ванны и основной каскад в-да Джур-Джур соответственно, 5 – Ручей к западу от в-да, 6 – Река Улу-Узень, 7 – Купель рядом с часовней, 8 – Часовня Св. Анастасии, Родники: 9 – Ай-Андрий, 10 – Орешник №519, 11 – У входа на Джур-Джур, 12 – Орешняк, 13 – Бах-Кяр, 14 – Джан-Чокрак.

Речные воды Улу-Узень Восточного пресные с минерализацией от 263 до 382 мг/дм^3 (рис. 2), гидрокарбонатные кальциевые, температура воды составляет от 9.8 до 23ºС. Концентрации основных ионов не превышают (мг/дм^3): HCO_3^- 225, SO_4^{2-} 18.6, Cl^- 8.5, Ca^{2+} 82, Mg^{2+} 8.5, Na^+ 6.3, K^+ 0.68. Повышенными значениями минерализации отличаются ручей к западу от водопада Джур-Джур и река Улу-Узень в селе Генеральском. По водородному показателю воды слабощелочные (pH от 8.14 до 8.56 (в среднем 8.38)) с окислительной геохимической обстановкой (Eh +193 мВ) и содержанием $O_{2раств.}$ 8 мг/дм^3. Содержание кремния составляет от 1.66 до 3.44 мг/дм^3.

Подземные воды (родники) пресные с минерализацией от 263 до 451 мг/дм^3, гидрокарбонатные кальциевые, температура воды составляет от 10.7 до 26.81ºС. Концентрации основных ионов не превышают (мг/дм^3): HCO_3^- 304, SO_4^{2-} 28, Cl^- 10.5, Ca^{2+} 90, Mg^{2+} 13.4, Na^+ 7.3, K^+ 0.75. По водородному показателю воды слабощелочные (pH от 7.35 до 7.93 (в среднем 7.6)) с окислительной геохимической обстановкой (Eh +194.4 мВ) и содержанием $O_{2раств.}$ 8 мг/дм^3. Содержание кремния составляет от 2.31 до 4.28 мг/дм^3. Также стоит отметить более высокие, чем в поверхностных водах, содержания Ca.

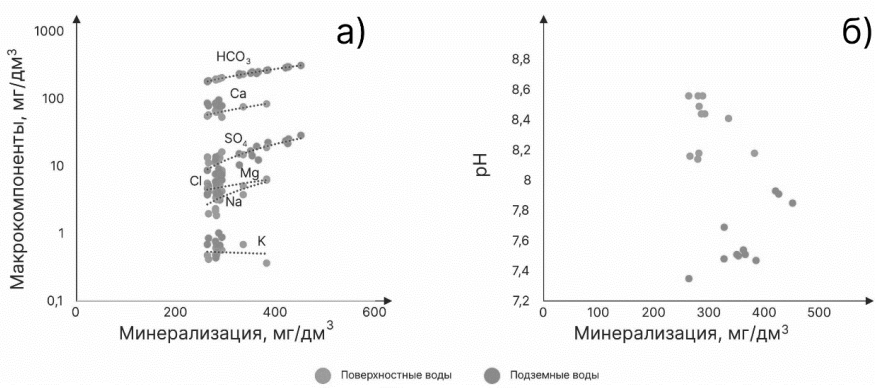


Рис. 2. Графики зависимости состава (а) и pH (б) вод от минерализации.

Для оценки качества подземных вод для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения был рассчитан набор общепринятых в мировой практике параметров (табл. 1): PS – потенциальная соленость; SAR – коэффициент адсорбции натрия; SP – эквивалент-процентное содержание катионов натрия; RSC – остаток карбоната натрия; RSBC – остаток бикарбоната натрия; MAR – коэффициент адсорбции магния; KR – коэффициент Келли; PI – индекс водопроницаемости; CR – коэффициент коррозии [10-16].

Таблица 1. Параметры качества подземных вод

№ на рис. 1	Год отбора	pH	Eh, мВ	M	SMI	PS	SAR	SP	RSC	RSBC	MAR	KR	PI	CR
1	2019	8,6	172,6	262,9	0,22	0,2	0,2	6,5	-0,2	0,3	14,4	0,5	58	0,1
1	2020	8,4	191,2	292,2	0,26	0,2	0,2	5,9	0,0	0,7	21,2	0,8	58	0,1
1	2021	8,2	212,1	288,0	0,24	0,2	0,2	4,7	-0,3	0,2	11,9	0,5	54	0,1
1	2022	8,6	219,9	265,3	0,18	0,2	0,1	3,1	-0,1	0,2	10,7	0,4	57	0,1
2	2020	8,4	186,3	283,6	0,22	0,2	0,1	3,9	-0,3	0,0	9,6	0,4	53	0,1
2	2021	8,4	161,9	286,0	0,25	0,2	0,2	4,9	-0,3	0,0	8,3	0,3	54	0,1
2	2022	8,2	225,2	281,2	0,20	0,2	0,1	2,8	-0,3	0,1	10,9	0,4	53	0,1
3	2020	8,1	236,2	280,7	0,21	0,2	0,1	3,8	-0,3	0,0	8,3	0,3	53	0,1
3	2021	8,4	176,8	282,0	0,24	0,2	0,2	4,3	-0,3	0,1	11,0	0,4	53	0,1
3	2022	8,5	189,6	279,3	0,18	0,2	0,1	3,2	-0,3	-0,1	5,5	0,2	53	0,1
4	2020	8,6	173,6	303,4	0,25	0,3	0,2	4,3	-0,3	0,0	8,9	0,4	52	0,1
4	2021	8,5	176,6	280,0	0,26	0,3	0,2	4,8	-0,3	0,0	9,6	0,4	54	0,1
5	2021	8,4	177,7	335,0	0,30	0,3	0,2	4,5	-0,4	0,1	10,0	0,5	50	0,1
6	2019	8,2	196,0	382,0	0,48	0,4	0,3	5,9	-0,3	0,2	10,9	0,6	48	0,1
7	2019	7,7	174,2	327,2	0,33	0,3	0,2	4,7	-0,1	0,1	6,5	0,3	52	0,1
8	2019	7,5	176,6	361,9	0,49	0,4	0,3	7,6	-0,5	0,0	11,5	0,6	49	0,1
9	2019	7,5	223,3	365,4	0,41	0,4	0,2	4,2	-0,4	-0,1	6,8	0,4	47	0,1
9	2021	7,5	151,8	353,0	0,32	0,3	0,2	5,1	-0,2	0,2	9,7	0,5	50	0,1
10	2021	7,9	177,0	451,0	0,49	0,5	0,3	6,1	-0,4	0,4	13,6	0,8	45	0,1
11	2021	7,9	200,4	350,0	0,30	0,3	0,2	4,3	-0,4	0,0	9,7	0,5	48	0,1
11	2022	7,5	193,6	326,9	0,23	0,2	0,2	3,8	-0,4	0,0	8,4	0,4	50	0,1
12	2020	7,9	156,2	426,0	0,49	0,5	0,2	5,2	-0,4	0,6	19,3	1,1	45	0,1
13	2019	7,5	265,3	420,3	0,55	0,6	0,2	4,9	-0,5	0,2	12,6	0,7	45	0,1
14	2019	7,5	182,5	263,3	0,27	0,2	0,2	6,0	-0,3	0,2	15,7	0,6	56	0,1
14	2020	7,4	245,0	424,5	0,47	0,4	0,2	4,9	-0,3	0,8	21,2	1,2	45	0,1
14	2022	7,4	187,0	384,8	0,31	0,3	0,2	4,4	-0,3	0,1	8,1	0,4	47	0,1

Примечание: красным цветом обозначены значения, превышающие ПДК (для KR = 1,0).

SAR оценивает риск защелачивания. Превышение концентраций натрия над суммой кальция и магния препятствует проникновению необходимого объема воды в почву при орошении сельскохозяйственных культур. SAR рассчитывается как: SAR=Na+/((Ca^{2+} + Mg^{2+})1/2/2) (все концентрации даны в мг-экв/$дм^3$). Согласно Л.А. Ричардсу (Richards L.A.), чем ниже это значение, тем лучше качество подземных вод для орошения и ниже вероятность защелачивания почв. SP – процент-эквивалентное содержание натрия. Натрий вступает в реакцию с почвой, что приводит к обмену Na и вытеснению Ca и Mg из последних. Проницаемость таких почв уменьшается, что приводит к ухудшению циркуляции воздуха и воды. Классификация, основанная на данном критерии, говорит о том, что подземные воды с содержанием Na менее 20 %-экв обладают наивысшим качеством. При содержании Na более 60-80 %-экв подземные воды непригодны для питьевых и мелиорационных целей. На основе MAR (коэффициенте

адсорбции магния), рассчитываемому по формуле: MAR=(Mg^{2+})×100/(Ca^{2+}+Mg^{2+}) (все концентрации даны в мг-экв/дм^3), можно оценивать влияние вод при орошении на почвенный покров, а также их питьевые качества. При MAR>50 воды считаются неудовлетворительными по качеству. KR, или коэффициент Келли, описывает отношение Na/(Ca+Mg), которое также показывает степень пригодности подземных вод для питьевых и мелиорационных нужд. При значении этого отношения менее 1 принято считать, что подземные воды имеют отличное качество. PI – индекс водопроницаемости, рассчитывается по формуле PI=((Na^++HCO^{3-})×100)/(Ca^{2+}+Mg^{2+}+Na^+). Проницаемость почв снижается при протекании процессов континентального засоления. Данный коэффициент показывает риск засоления. Согласно классификации Л.Д. Донина (Doneen L.D.), подземные воды по величине PI можно разделить на три типа: 1) PI>75 – наивысшего качества; 2) PI от 75 до 25 –удовлетворительного качества и 3) PI<25 – низкого качества. Коррозионная активность подземных вод по отношению к водопроводным системам оценивается с помощью коэффициента коррозии (CR), вычисляемого по формуле: CR=[Cl^-/35.5+2×(SO_4^{2-}/96)]/2×((HCO_3-+CO_3^{2-})/100). Подземные воды считаются допустимого качества при величине CR меньше 1. Значения более 1 показывают высокую коррозионную активность подземных вод при транспортировке для труб. PS (потенциальная соленость) один из коэффициентов оценивающих пригодность вод для мелиоративных нужд и рассчитывается по формуле PS=Cl^-+1/2×SO_4^{2-}. Накопление высокорастворимых солей в почвах говорит о протекании процессов континентального засоления в условиях аридного и семиаридного климата. Низкие значения этого коэффициента указывают на высокое качество подземных вод. RSC – следующий коэффициент, отвечающий за качество подземных вод для мелиоративных целей, рассчитывается по формуле: RSC=[HCO_3+CO_3]-[Ca+Mg] [21]. Коэффициент характеризует остаточное содержание карбоната натрия в водах. По его величине выделяется три группы подземных вод: до 1,25 – отличного качества, 1,25-2,5 – удовлетворительного и более 2,5 – низкого. Остаток бикарбоната натрия (RSBC) рассчитывается по формуле: [HCO_3-Ca]. Согласно USDA, при его значениях до 1.25 подземные воды принято считать отличного качества, 1.25-2.5 – удовлетворительного и более 2.5 – низкого. В международной научной литературе для оценки процессов внедрения морских вод в эксплуатируемые водоносные горизонты часто применяется индекс SMI (индекс смешения с морской водой). Он рассчитывается по формуле: SMI=a×(CNa/TNa)+b×(CCl/TCl)+c×(CMg/TMg)+d×(CSO_4/TSO_4), где a, b, c, d – относительные степени концентраций Na^+, Cl^-, Mg^{2+} и SO_4^{2-}, которые равны: a=0.31; b=0.04; c=0.57; d=0.08 соответственно. C – концентрация элементов в подземных водах в мг/дм^3, а T – фоновые значения концентраций этих элементов в исследуемом объекте на региональном уровне. При SMI более единицы считается, что подземные воды смешиваются с морскими и происходит засоление водоносных горизонтов.

Выполненные исследования показали, что природные воды Хапхальского ущелья пресные с величиной общей минерализации от 263 до 451 мг/дм^3, имеют гидрокарбонатный кальциевый состав, слабощелочные (pH от 7.4 до 8.6) с окислительной геохимической обстановкой (Eh от +151.8 до +193.4). На основе сравнительного анализа с действующими нормативными документами (СанПиН, ГОСТ, ГН и WHO) [17-19] установлено, что содержания основных макро- и микрокомпонентов в подземных водах в целом не превышают предельно допустимых концентраций (ПДК). Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что воды всех опробованных объектов могут использоваться для целей питьевого и хозяйственного водоснабжения и относятся к высшей категории качества. Чтобы сохранить уникальное качество вод этого региона, необходимо регулярно проводить мониторинг их состояния и проводить профилактические мероприятия против загрязнения и ухудшения состояния окружающей среды, что связано с большой популярностью этого объекта у туристов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта № 24-27-20031 Российского научного фонда и Правительства Севастополя.

Список литературы

1. Максимова А.А., Новиков Д.А., Хващевская А.А., Коростелев М.Ю. Геохимия природных вод урочища Кастрополь (Южный берег Крымского полуострова) // Устойчивое развитие горных территорий – том 14 – № 3 – С. 391-400 – 2022

2. Новиков Д.А., Черных А.В., Хващевская А.А., Максимова А.А., Деркачев А.С., Дульцев Ф.Ф., Ничкова Л.А., Сигора Г.А., Хоменко Т.Ю., Яхин Т.А. Токсичные элементы в природных водах Севастопольской городской агломерации: распределение, фон, аномалии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – том 333 – № 4 – С. 79-92 – 2022

3. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Пыряев А.Н., Хващевская А.А., Ничкова Л.А., Сигора Г.А., Яхин Т.А. Новые изотопно-гидрогеохимические данные по составу природных вод Байдарской долины (крымский полуостров) // Геология и геофизика. – 2021. – Том 62. – № 12. – С.1705-1726.

4. Новиков Д.А., Корнеева Т.В., Копылова Ю.Г., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Хващевская А.А. Первые данные о распределении урана и тория в природных водах Байдарской долины (Крымский полуостров) // Химия в интересах устойчивого развития – том 29 – № 4 – С. 461-471 – 2021

5. Хващевская А.А., Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Сметанина И.В., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Роль системы "вода - порода" в процессах формирования состава природных вод Севастопольской городской агломерации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – том 332 – № 1 – С. 118-128 – 2021

6. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Хващевская А.А. Геохимические типы природных вод Байдарской долины (Крымский полуостров) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН – № 17 – С. 401-405 – 2020

7. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Оценка качества подземных вод верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова для целей питьевого и сельскохозяйственного водоснабжения // Экология и промышленность России. – 2019. – Том 23. – № 4. – С.52-57

8. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Новый взгляд на гидрогеологические условия города федерального значения Севастополь // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Том 330. – № 8. – С.105-122

9. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Особенности гидрогеологоии верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – 2018. – Том 4 (70). – № 4. – С. 268-288

10. Bashir E., Huda S.N., Naseem S., Hamza S., Kaleem M. Geochemistry and quality parameters of dug and tube well water of Khipro, District Sanghar, Sindh, Pakistan// Appl Water Sci. – 2017. – №7. – PP. 1645–1655

11. Irrigation water quality / Camberato J. USA: Turfgrass Program, Clemson University. – 2011. – 10 p.

12. Irrigation water quality criteria / Bauder T.A., Waskom R.M., Sutherland P.L, Davis J.G. USA: Colorado State University Extension Report. – 2013. – 306 p.

13. Ganiyu S. A., Badmus B. S., Olurin O. T., Ojekunle Z. O. Evaluation of seasonal variation of water quality using multivariate statistical analysis and irrigation parameter indices in Ajakanga area, Ibadan, Nigeria // Appl Water Sci. – 2018. – №8 (35). – 15 p.

14. Gulgundi M. S., Shetty A. Groundwater quality assessment of urban Bengaluru using multivariate statistical techniques // Appl Water Sci. – 2018. – №8 (43). – 15p.

15. Kaur T., Bhardwaj R., Arora S. Assessment of groundwater quality for drinking and irrigation purposes using hydrochemical studies in Malwa region, southwestern part of Punjab, India // Appl Water Sci. – 2017. – №7. – PP. 3301–3316.

16. Khan T.A., Abbasi M.A. Synthesis of parameters used to check the suitability of water for irrigation purposes // Int J Environ Sci. – 2013. – №3 (6). – PP. 2031–2038.

17. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/573500115

18. ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200003120

19. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий (с изменениями на 26 июня 2021 года) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/573536177.

VII. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ, ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШАХТНЫХ ВОД

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШАНУЧ (КАМЧАТСКИЙ КРАЙ)

Вах Е.А.[1], Ветошкина А.В.[1], Горобейко Е.В[1].
[1] Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Adasea@mail.ru.

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены вопросы геологического и гидрогеологического строения месторождения. Изучен минералогический состав рудоносных пород. Получены данные по содержанию токсичных элементов в болоте, подземных и поверхностных водах, формирующихся в зоне гипергенеза сульфидных руд месторождения Шануч, Камчатский край. Выявлены высокие концентрации, в рудничных водах и болоте, таких элементов как Ni (от 46362–77058 мкг/л), Fe (4097–10140), Mn (1965–5662), Co (567 до 1187), Al (27,88–512,4), Sr (283,8–495,8), Cu (1,97–117,8), Zn (40,98–166), U (0,36–24,18), а также REY+Sc (1,7–46,9).
Ключевые слова: *месторождение Шануч, Камчатский край, гидрогеохимия.*

Abstract. This article discusses issues of the geological and hydrogeological structure of the field. The mineralogical composition of ore-bearing rocks has been studied. Data were obtained on the content of toxic elements in the swamp, groundwater and surface waters formed in the hypergenesis zone of sulfide ores of the Shanuch deposit, Kamchatka kray. High concentrations of such elements as Ni (46362–77058 ppb), Fe (4097–10140), Mn (1965–5662), Co (567 to 1187), Al (27. 88–512.4), Sr (283.8–495.8), Cu (1.97–117.8), Zn (40.98–166), U (0.36–24.18), and also REY+Sc (1.7–46.9).
Key words: *Shanuch deposit, Kamchatka kray, hydrogeochemistry.*

Оценка состояния природно-техногенных экосистем Дальнего Востока России и анализ характера трансформации водной среды, является одной из наиболее значимых проблем горнорудных районов Дальнего Востока России [2]. Обоснованием постановки исследований является то, что горнорудная промышленность традиционно занимает ведущее положение как один из наиболее мощных источников трансформации окружающей среды. В качестве территории исследования выбран Камчатский край, с различными уровнями и длительностью техногенного воздействия на гидросферу. Данный регион, в силу определенной географической специфики, практически до начала XXI века, не был затронут горнорудной промышленностью, и только в последние годы на этой территории начали разрабатывать коренные месторождения золота и никеля. В этом плане сопоставление состояния различных сред, с возможным уровнем воздействия горнодобывающей промышленности, несомненно, крайне важно для понимания динамики развития трансформации территории в исследуемых районах.

Основой минерально-сырьевой базы никеля в Камчатском крае являются богатые сульфидные кобальт-медно-никелевые руды разрабатываемого Шанучского месторождения, которое наряду с другими рудопроявлениями никеля в пределах Камчатского срединного массива связано с интрузиями норит-кортландитовой формации или формации роговообманковых базитов [3].

Недропользователем месторождения «Шануч» является – ЗАО НПК «Геотехнология». Месторождение расположено в юго-западной части территории

Быстринского муниципального района Камчатского края, в 280 км на северо-запад от краевого центра - г. Петропавловск-Камчатского.

В геологическом плане на месторождении распространены кристаллические сланцы камчатской серии и гнейсовидные граниты кольского комплекса. Магматические породы представлены штоками и дайками дукукского базит-гипербазитового комплекса эоценового возраста. С одним из пучков таких субвертикально ориентированных даек пространственно сопряжена медно-никелевая минерализация. Рудное тело имеет в вертикальном разрезе линзообразную форму с раздувом в центральной части. Сульфидные Cu-Ni руды месторождения Шануч имеют простой минеральный состав [5]. Основными минералами руд являются (по степени распространенности): пирротин, пирит, виоларит, петландит и халькопирит. Остальные рудные минералы имеют незначительное распространение и относятся к числу второстепенных и редких минеральных соединений. Представлены (по частоте встречаемости): сульфотеллуридами и теллуридами висмута, герсдорфитом, сфалеритом, галенитом, молибденитом, никелином, самородным висмутом, сурьмяно-висмутовыми сульфосолями свинца. Благороднометальная минерализация в сульфидных рудах проявлена весьма незначительно. В рудах выявлены агрегаты самородного золота и минеральных соединений элементов платиновой группы. Основными никельсодержащими минералами руд являются: ранний пирротин-I (содержание Ni от 1.2 до 5.5 %, среднее – 2.3 %, 69 анализов); ранний пирит-I (содержание Ni от 0 до 9.4 %, среднее – 3.4 %, 48 анализов); пентландит (содержание Ni от 36.9 до 39.3 %, среднее – 38.5 %, 28 анализов); виоларит (содержание Ni от 25.3 до 34.3 %, среднее – 30.0 %, 56 анализов); герсдорфит (содержание Ni от 14.5 до 39.4 %, среднее – 26.9 %, 56 анализов); пирротин-II (по петландиту, содержание Ni от 5.7 до 15.2 %, среднее – 13.2 %, 13 анализов); пирит-II (поствиоларитовый, содержание Ni от 9.6 до 15.5 %, среднее – 13.2 %, 6 анализов). Самым часто встречаемым из основных минералов никеля в рудах месторождения является виоларит, который по степени распространенности в изученных образцах в большинстве случаев превосходит пентландит. Он представлен пористыми субмикроскопическими ксеноморфными агрегатами, находящимися часто в тесных срастаниях с пентландитом, пирротином и пиритом.

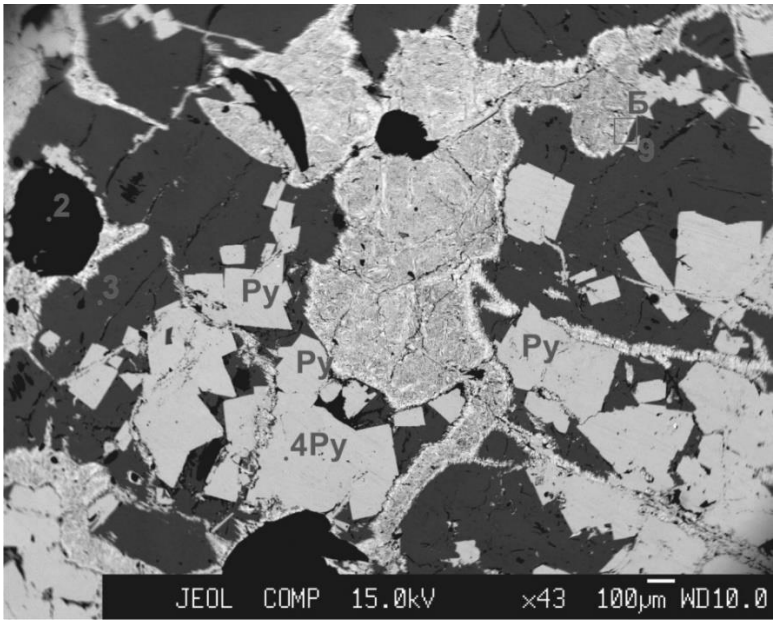


Рис. 1. Форма выделений виоларита (темного) в агрегатах пирита (по трещинам) и гидроокислов Fe (черное). Здесь и далее – снимки в отраженных электронах выполненных на приборе JXA-8100.

В гидрогеологическом отношении в районе исследования широко распространены трещинные, трещинно-грунтовые безнапорные, реже пластово-трещинные воды, обладающие слабыми местными напорами. Основное питание подземные водотоки получают за счет инфильтрации и таяния снежников. На месторождении отмечен водоносный горизонт элювиально-делювиальных отложений [4].

Гидрогеохимические системы, формирующиеся в пределах горнодобывающих территорий, существенно отличаются от естественных. В наибольшей степени эти отличия проявляются в районах месторождений с сопутствующим сульфидным оруденением [1]. По химическому составу грунтовые воды, отобранные внутри подземной выработки, вскрытые на площадке четвертичных отложений: гидрокарбонатно-сульфатные натриево-магниево-кальциевые и гидрокарбонатные кальциево-магниевые. По минерализации отобранные воды относятся к пресным, сумма солей варьирует от 340 до 1222 мг/л. Минимальную минерализацию показали пробы из скважины №330, максимальную – выход вод из верхнего горизонта. Показатели pH вод колеблются от 5,2 до 7,7. Содержание Si изменяется в пределах 4,2 – 9,3 мг/л. По микроэлементному составу, собранные в районе исследования пробы воды, наиболее сильно (на десятки, тысячи и даже на десятки тысяч порядков) различаются от фоновых значений в воде р. Шануч, по содержанию: Ni (от 1042–127778 мкг/л), Fe (247,4–11000), Mn (75,2–6883), Sr (331,1–1814,6), Co (12 до 1753), Al (11,1–701), Cu (0,53–196), Zn (1,38–153,3), Ba (12,84–80,85), Li (13,86–63,37), Rb (3,98–33,56), U (0,24–31,86), Cs (0,24–8,21), а также по всем REY+Sc (0,28–76.1.). Максимальные концентрации большинства перечисленных микроэлементов обнаружены в пробах вод, отобранных внутри подземных выработок, выходе из верхнего горизонта.

Рудничные воды, отобранные на выходе из штольни, по составу: сульфатные, магниево-кальциево-натриевые, с общей минерализацией от 700 до 998 мг/л. Показатели pH вод колеблются от 5,11 до 7,28. Содержание Si варьируется 3,76 – 6,17 мг/л. характеризуются высокими концентрациями рудных элементов, максимальные содержания которых в растворенной форме достигает: Ni (от 46362–77058 мкг/л), Fe (4097–10140), Mn (1965–5662), Sr (283,8–495,8), Co (567 до 1187), Al (27,88–512,4), Cu (1,97–117,8), Zn (40,98–166), Ba (17,57–34,69), Li (17,64–36,86), Rb (19,04–32,84), U (0,36–24,18), Cs (2,73–4,41), Se (1,50–3,23), а также REY+Sc (1,7–46,9).

Для выявления превышений, был проанализирован макро- и микро- состав по основным рекам изучаемого района, незатронутых процессом техногенной деятельности. Они берут свое начало вблизи главного водораздела Срединного хребта с вершин, покрытых снежниками и местами ледниками, принадлежат бассейну Охотского моря. Месторождение располагается в верхней части бассейна реки Ича и находится большей частью на водосборе ее правобережного притока - р. Шануч. Пробы вод, отобранные в районе реки Ича и Шануч, показали низкие значения минерализации от 33,3 до 55,5 мг/л (ультрапресные). По составу главных компонентов воды гидрокарбонатно-кальциево-натриевые и гидрокарбонатно-кальциево-магниевые. В составе микроэлементов самые высокие показатели в таких водах: Ni (от 10,25–105,6 мкг/л), Fe (126,1–251,8), Mn (2,62–9,08), Sr (10,46–47,28), Co (0,21 до 1,41), Al (16,18–32,81), Cu (2,14–3,11), Zn (0,95–3,42), Ba (1,15–5,61), Li (0,8–1,1), Rb (0,82–2,18), Cr (0,21–1,41), а также по всем REY+Sc (0,08–0,09). По остальным микроэлементам все значения ниже 1 мкг/л. По содержанию РЗЭ показатели существенно ниже мирового фона по рекам [6].

Внизу исследуемой территории находится Шануческое болото, которое примыкает к подножью горы Тхонжа в зоне воздействия горно-добычного участка. Площадь болота составляет 0,92 км^2. Питание болота происходит за счет стекающих с горы ручьев, в том числе временных, и за счет шахтных вод. С севера болото ограничено руч. Саматкин, левым притоком р. Шануч. Болото низинного типа, является проточным, в него

разгружается несколько мелких, преимущественно временных, ручьев, стекающих с северо-западного склона горы Верхняя Тхонжа, в том числе с территории горно-добычного участка. Воды ручьев впадают в Шануческое болото и после фильтрации через торфяник попадают в руч. Саматкин и далее в реку Шануч. По химическому составу воды - кислые (pH 4,07-4,7), сульфатные кальциево-магниевые. С общей минерализацией - 1020-1213 мг/л. Сток взвешенных веществ на болоте, формируется из транзитных, переносимых со всего водосбора, и местных отложений, аллювиальных и эоловых наносов. Также обнаружены высокие концентрации рудных элементов, что типично для таких вод: Ni (от 76910–98359 мкг/л), Fe (5799–6910), Mn (5151–7990), Sr (318,5–413,9), Co (1184–1602), Al (526,6–1909), Cu (120–286,2), Zn (104,3–145,7), Ba (24,18–48,64), Li (28,21–56,18), Rb (24,47–30,40), U (10,21–26,00), Cs (4,43–5,33), Se (1,93–3,35), а также по всем REY+Sc (47,2–48,8).

Таким образом, полученные данные позволяют получить первые представления об объекте исследования, для дальнейших комплексных работ. Обнаруженные высокие показатели по микроэлементам в рудничных водах и болоте, в будущем могут рассматриваться в виде потенциального перспективного минерального сырья для промышленной добычи.

Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00304 «Влияние современного техногенеза на поведение РЗЭ в системе «вода-порода-донные отложения» на примере Cu-Ni месторождения Шануч (Камчатка)», https://rscf.ru/project/24-27-00304/.

Список литературы

1. Абрамова, В. А. Гидрогеохимия хвостохранилищ редкометалльных месторождений Восточного Забайкалья / В. А. Абрамова, Л. В. Замана, С. В. Борзенко // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева, Томск, 16–21 октября 2023 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. – С. 217-220.

2. Вах Е.А. Геохимия редкоземельных элементов в природных и техногенных водах юга Дальнего Востока России. - Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2014. - 168 с.

3. Новаков Р.М. Перспективы никеленосности плутонических мафит-ультрамафитовых формаций Камчатки. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2018. – 23 с.

4. Оценка воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду при реализации проекта отработка месторождения Шануч с учетом вовлечения дополнительных запасов. 824.19-1-ОВОС-1-ОВОС.Т1/ Иргиридмет. – Иркутск, 2020. – С. 197.

5. Степанов В.А. Минералы благородных и редких металлов в рудах Шануческого медно-никелевого месторождения (Камчатка) / В. А. Степанов, В. И. Гвоздев, Ю. П. Трухин [и др.] // Записки Российского минералогического общества. – 2010. – Т. 139, № 2. – С. 43-58.

6. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. Trace elements in rivers waters // Treasure on Geochemistry. V5. Amsterdam: Elsevier Pergamon. – 2004. – V. 5. – P.225-272.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СНИЖЕНИЯ ТЕХНОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПОДЗЕМНУЮ ГИДРОСФЕРУ

Вашестюк Ю.В.
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, vashestyuk_yv@istu.edu

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются основные виды техногенного воздействия на подземную гидросферу в результате горнопромышленного производства. Эта проблема особенно актуальна в современном мире вследствие чрезмерного использования водных ресурсов в горнопромышленном комплексе. Проблемы загрязнения подземных вод в горнопромышленном производстве, несомненно, актуальны, а также доказывает, что с этой проблемой не просто можно и нужно бороться, а жизненно важно. Повышение эффективности природоохранных мероприятий приводит к развитию и совершенствованию методов борьбы с загрязнением.
Ключевые слова: *подземные воды, водоснабжение, горнопромышленный, загрязнение*

Abstract. In this paper discusses the main types of anthropogenic impact on the underground hydrosphere as a result of mining. This problem is especially relevant in the modern world due to the excessive use of water resources in the mining industry. The problems of groundwater pollution in mining are undoubtedly relevant, and also proves that this problem is not just possible and necessary to deal with, but vital. Increasing the effectiveness of environmental protection measures leads to the development and improvement of pollution control methods.
Keywords: *groundwater, water supply, mining, pollution*

Горнопромышленный комплекс в настоящее время достаточно развит, но даже в современном мире технологий существуют проблемы, решение которых насчитывает не одно десятилетие. Загрязнение водного бассейна наносит ощутимый вред экосистеме Земли, и приводят к негативным социальным и экономическим последствиям.

Объекты горнодобывающей промышленности в значительной степени влияют на глубокие горизонты геологической среды, вызывая перераспределение напряжений в земной коре, изменение гидродинамических и гидрогеохимических параметров подземных вод [3, 5].

В.Н. Мосинец и М.В. Грязнов показали отрицательное влияние горнодобывающих предприятий на многие компоненты геологической среды. Изменения земной коры происходят как в процессе добычи полезного ископаемого, так и в результате процессов-следствий. При извлечении твердых ископаемых осуществляется комплекс горнотехнических мероприятий, которые приводят к изменению геологических, геоморфологических, гидрогеологических, гидрологических и метеорологических условий как в районе добычи, так и на смежных площадях. Наиболее характерные виды воздействия горнодобывающих предприятий на геологическую среду: 1) отчуждение площадей для размещения горнодобывающих предприятий, их комплексов, сопровождающих и вспомогательных сооружений; 2) нарушение естественных ландшафтов; 3) нарушение естественных свойств геологической среды за счет истощения запасов подземных вод, нарушения условий взаимосвязи поверхностных и подземных вод; 4) нарушение естественных свойств геологической среды за счет изменения геофизических полей (гравитационного, электрического, магнитного, температурного и др.); 5) сумма нарушений, последствиями которых являются заметные или существенные осложнения при производстве горных работ [2].

Техногенные факторы разнообразны и масштаб их воздействия на подземные воды неизмеримо выше, чем природных:

- эксплуатационный водоотбор, карьерный и шахтный водоотлив формируют воронки депрессии естественного уровня подземных вод, которые вызывают изменение направления их движения; формирование техногенной зоны аэрации горных пород; рудничные и шахтные воды представляют собой техногенные рассолы, которые

благодаря окислению сульфидных материалов характеризуются РН – 3-4, превышающих ПДК содержанием тяжелых металлов в десятки раз;

- эксплуатация газовых и нефтяных месторождений сопровождается извлечением из эксплуатационных скважин газа, нефти и рассолов совместно, что приводит к необходимости захоронения нефтепромысловых сточных вод, формируя зоны повышенного давления в пластах-коллекторах что провоцирует, перетоки рассолов в вышезалегающие водоносные горизонты с пресными подземными водами;

- шахтно-рудничная добыча полезных ископаемых сопровождается накоплением горной массы в виде солеотвалов и терриконов, представляющих реальную угрозу загрязнения пресных подземных вод путем растворения атмосферными осадками выщелачиваемых сульфидных минералов и солей из горной массы и их фильтрацией в водоносные горизонты;

- дражная и карьерная добыча полезных ископаемых сопровождаются формированием карьеров глубиной от десятков до сотен метров с оползанием стенок карьеров и обвалами, нарушением режима грунтовых вод; дражные полигоны изменяют морфологию поймы и русла рек, загрязняя поверхностные воды, отрицательно влияют на биосферу.

Системы водообеспечения большинства горнопромышленных предприятий основные водопотребительные процессы базируются полностью или в значительной мере на оборотной системе водоснабжения (система водного хозяйства предприятий, промышленных узлов производственных комплексов, обеспечивающая возврат всех жидких отходов после соответствующей обработки для повторного использования или переработки на вторичное сырье), на пополнение которой чаще всего используют шахтные, дренажные и карьерные воды. Для водообеспечения предприятий применяется централизованная система водообеспечения из поверхностных или подземных источников воды.

Горное производство оказывает негативное воздействие на водный режим. Разработка угольных месторождений сопровождается осушением пород, понижением уровня подземных вод и снижением их напора. В результате происходит формирование депрессионных воронок. Их размеры зависят от гидрогеологических условий, а также глубины ведения горных работ. Влияние горных работ на речной сток определяется величиной сокращения поступления подземных вод в реку за счет шахтного или карьерного водоотлива, увеличения питания реки по тем же причинам и уменьшения запасов подземных вод. Ликвидация шахт негативно влияет на гидрогеологическую обстановку. Прекращение водоотлива из ликвидируемых шахт неизбежно приводит к восстановлению первоначального уровня подземных вод со значительными изменениями их химического состава и кислотности (щелочности), увеличению механической загрязненности и изменению физических свойств воды. Одним из самых неблагоприятных исследований затопления шахт является возможность загрязнения подземных вод, используемых как источники водоснабжения. Это значительно ужесточает вопрос водоснабжения.

На подземные воды действует: осушение месторождений полезных ископаемых, сброс сточных и дренажных вод, что приводит к уменьшению подземных и поверхностных вод, нарушению гидрогеологического и гидрологического режимов водного бассейна [4].

Воздействие на подземную гидросферу на поисково-разведочной стадии эксплуатации месторождений углеводородов носит локальный характер. Изменение водного режима грунтовых вод связано лишь с изменением поверхностных условий питания водоносных горизонтов, что может привести к снижению уровней грунтовых вод на отдельных участках, либо, наоборот, к их подтоплению при подъеме этих вод в зоне аэрации. Так же, как и для поверхностных вод, выявить техногенный источник колебаний уровня грунтовых вод чрезвычайно трудно. Для этого необходимо проведение

специальных долговременных и зачастую дорогостоящих исследований. Однако визуально нарушение режима подземных вод при строительстве линейных сооружений (временных дорог, ЛЭП и др.), площадок различного назначения и других сооружений фиксируется в зимнее время, по появлению новых наледей. Эти формы криогенеза косвенно свидетельствуют о том, что нарушены естественные процессы дренажа массива горных пород: питания, движения и разгрузки грунтовых вод.

В районах развития многолетнемерзлых грунтов процессы техногенного характера, связанные с деятельностью подземных вод (над и межмерзлотных по классификации Н.И. Толстихина), могут проявляться в следующих формах и процессах:

- морозного пучения под фундаментами и основаниями зданий и сооружений;
- солифлюкционных процессов выноса грунтов по склонам при оттаивании, которые сопровождаются понижениями и просадками поверхностей;
- морозного растрескивания и жильного льдообразования, термокарста с последующими деформациями поверхности;
- гидроэрозионных процессов, связанных с выходом подземных вод на поверхность, и др.

Загрязнение подземных (грунтовых) вод происходит преимущественно от локализованных источников (по аналогии с поверхностными) за счет инфильтрации тех же видов загрязнителей в подземные горизонты. В процессе проведения геофизических исследований (сейсморазведочных работ) бурится несколько мелких скважин, в которые закладываются взрывчатые вещества для проведения взрывных работ. Масса закладываемых зарядов составляет 20 кг и более, а на поверхности земли, как правило, - до 5 кг и более. Заряды закладываются на глубину 30-80 м с целью локализации ударной волны и получения интенсивного отражающего сигнала.

Обычно сейсмопрофили назначаются вдоль линии поперечного разреза месторождения, что требует строительства дорог для перемещения оборудования по линиям разведки. Такая сеть может быть достаточно детальной, что приводит к воздействию на приповерхностные воды зоны аэрации и частично на условия питания грунтовых вод.

Защита водных объектов от негативного воздействия угледобывающих предприятий осуществляется комплексом мероприятий, специального, локального и восстановительного характера. К мероприятиям общего характера относятся:

- очистка сбрасываемых в поверхностные водотоки рудничных вод до норм предельно-допустимых концентраций;
- широкое использование рудничных вод после необходимой водоподготовки для технических целей;
- предупреждение инфильтрации загрязненных вод путем размещения промплощадок и технических водоемов на естественно и искусственно экранируемых (глинистыми слоями пород) территориях.

Проекты угледобывающих предприятий должны предусматривать выполнение комплекса требований, связанных с предотвращением или ограничением вредного воздействия горных работ и работ горнообогатительного цикла на подземные воды, а именно:

- схемы горных работ, дренажа и водоотлива должны отвечать требованиям минимального вовлечения в дренажный водооборот комплексов, используемых для водоснабжения, или глубинных высокоминерализованных вод;
- должны исключать или ограничивать (допустимыми пределами) поступление в водоносные пласты загрязненных вод из поверхностных источников техногенного характера, а также через горные выработки и скважины; - схемы отвода, сброса и утилизации дренажных (шахтных) вод должны обеспечивать сокращение до минимума бесполезных потерь извлекаемых подземных вод, с одной стороны, и предотвращение

загрязнения ими подземных и поверхностных вод, с другой. Это позволяет осуществлять их сброс в водоносные пласты, без ощутимого дополнительного загрязнения;

- система оперативного контроля за изменениями режима подземных вод под влиянием горного производства должна вводиться к началу функционирования данного производства.

Среди мероприятий по защите горных выработок от водопритоков необходимо особо выделить водонепроницаемые завесы, обеспечивающие максимальную охрану подземных вод от истощения. Однако использование завес обычно оказывается экономически оправданным лишь в неглубоко залегающих водоносных комплексах.

Шахтные воды оказывают на природную среду, в том числе и на подземные воды отрицательное воздействие. По химическому составу они отличаются от подземных вод. В горных выработках в результате взаимодействия с разрушенными горными породами, рудничной атмосферой по пути движения к водосборникам они достигают высокой минерализации, в 2-3 раза и более превосходящей минерализацию исходной подземной воды [1].

Закрытие шахты, прекращение водоотлива шахтных вод из горных выработок приводит к затоплению шахты, что обусловливает повышение уровня подземных вод на площади шахтного поля и прилегающей к ней территории, т.е. к техногенному подтоплению территории.

На площади техногенного подтопления может возникнуть развитие и активизация неблагоприятных инженерно-геологических процессов и явлений: карста, суффозии, фильтрационного выпора, оползней, оседания поверхности земли, просадка и набухание грунтов, загрязнение подземных вод, проявления их агрессивности по отношению к материалам подземных конструкций, изменение сейсмичности территории, ее заболачивание, засоление почв и др.

В настоящее время при закрытии шахт не всегда уделяется должное внимание мероприятиям по защите окружающей среды от загрязнения шахтными водами, не учитывается неблагоприятное воздействие изменения уровня подземных вод на инженерно-геологические процессы и явления на площади техногенного подтопления.

С целью уменьшения влияния шахтных вод на окружающую среду в проектах на закрытие шахт, необходимо предусматривать следующие мероприятия:

- изоляция шахтных вод отдельных горизонтов путем установления водопроницаемых перемычек в горных выработках;
- установление водопроницаемых перемычек в стволах;
- отвод шахтных вод или их части из закрываемой шахты в горные выработки действующей шахты и разработка мероприятий по их водоотливу;
- в случае необходимости, разработка технологии водоотлива шахтных вод из закрываемой шахты.

В случае невозможности выполнения рекомендуемых мероприятий или их неэффективности по горно-геологическим или экономическим причинам в проекте на закрытие шахты должны быть даны следующие прогнозы:

- изменение уровня подземных вод в связи с закрытием шахты, определены потенциально затопляемые территории;
- химического состава и агрессивных свойств подземных вод;
- неблагоприятных инженерно-геологических процессов и явлений для подтопляемой площади и мероприятия по защите окружающей среды от воздействия подтопления.

Проект на закрытие шахты в случае техногенного подтопления территории должен предусматривать создание сети стационарных пунктов гидрогеологических наблюдений (наблюдательных скважин и пунктов наблюдений), расположенных определенным образом с учетом природных и техногенных условий.

Для предотвращения загрязнения гидроресурсов необходимо решить комплексную задачу:

- создавать безотходные и безводные технологии с системой оборотного водоснабжения;
- проводить очистку сточных вод предприятия;
- закачивать сточные воды в глубокие водоносные горизонты;
- использовать поверхностные воды в производстве с предварительной их очисткой и обеззараживанием.

В результате мониторинга системы водопотребления и водоотведения на горных предприятиях и специфики гидрогеологической сети района для улучшения качества гидроресурсов предложены следующие научно-технические рекомендации, направленные на снижение техногенного влияния горного производства на водные ресурсы: внедрить повсеместно в технологию очистки сточных вод ультрафиолетовое обеззараживание и биохимическую очистку на водосбросах.

Разработанные для больших объемов сточных вод инновационные технологии позволили решить следующие экологические задачи: - обеззараживание очищенной воды ультрафиолетовым излучением; - удаление биогенных элементов до уровня современных нормативов; - экологически безопасная переработка и утилизация осадка сточных вод в биотопливо вместо его почвенной утилизации; - устранение эмиссии дурнопахнущих веществ в атмосферу (в т.ч. сероводорода, меркаптанов, аммиака).

Повышение эффективности природоохранных мероприятий приводит к развитию и совершенствованию методов борьбы с загрязнением, что является необходимым в подземной гидросфере. В связи с возникающим вопросом о защите гидроресурсов в горнодобывающих регионах, где развита промышленность, существует низкий уровень защищенности подземных вод от техногенного загрязнения, а также загрязнения подземных и поверхностных вод, связанные с неэффективной очисткой сточных вод предприятий, существует необходимость в комплексном мониторинге, совершенствовании процессов водоотбора и восполнения подземных вод. Исследования, проведенные с учетом специфики гидрогеологической сети района, показали несовершенство системы водопотребления и водоотведения на горных предприятиях, которые оказывают негативное воздействие на гидроресурсы. На основании исследований предложены научно-технические рекомендации, направленные на снижение воздействия техногенного характера на водные ресурсы.

Список литературы

1. Куликова А.А., Сергеева Ю.А., Овчинникова Т.И., Хабарова Е.И. Формирование шахтных вод и анализ способов их очистки // Горный информационно-аналитический бюллетень. № 7, 2020, С. 135-145.

2. Методика разработки поисковых прогнозов изменения геологической среды. М., Изд-во МГУ, 1988.

3. Мироненко В.А., Румыниин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах (опыт гидрогеологических исследований). Л., 1980.

4. Мосинец В. Н., Грязнов М. В. Горные работы и окружающая среда. М., 1978.

5. Плотников Н. И., Краевский С. Гидрогеологические аспекты охраны окружающей среды. М., 1983.

ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ КАРЬЕРНЫХ ВЫЕМОК УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

Гончар Н.В.[1], Антонова И.А.[2], Гуман О.М.[2]
[1] - АО «Русская медная компания», г. Екатеринбург, info@rcc-group.ru
[2] - ООО «Уралгеопроект», г. Екатеринбург, guman2007@mail.ru

Аннотация: Сложность прогноза состава подземной воды при рекультивации карьерных выемок обусловлена региональными особенностями территорий их нахождения; историей их существования; многообразием процессов, протекающих в них; способами рекультивации; составом закладочного материала. В работе приведены примеры состава воды в затопленных карьерах строительных материалов и медно-колчеданного месторождения, подземной воды при рекультивации строительными песками и закладочным материалом.

Ключевые слова: *Состав подземной воды и воды при затоплении карьерных выемок, рекультивация с использованием техногенно-минеральных образований, прогноз качества подземных вод.*

Abstract: The complexity of predicting the composition of groundwater during the reclamation of quarry excavations is due to the regional characteristics of the territories where they are located; the history of their existence; the variety of processes occurring in them; methods of reclamation; the composition of the laying material. The paper provides examples of the composition of water in flooded quarries of building materials and a copper-pyrite deposit, groundwater during reclamation with construction sands and laying material.

Keywords. *Composition of groundwater and water in case of flooding of quarries, reclamation using technogenic mineral formations, forecast of groundwater quality.*

Прогноз качества подземных вод при рекультивации карьерных выемок (качественный или количественный) выполняется методом аналогий, экстраполяции, экспериментальными или расчетными методами, основанными на детерминированных или стохастических моделях. В ходе рекультивации типичными являются процессы смешения, растворения (осаждения), окисления, молекулярной диффузии, капиллярного всасывания, выщелачивания, сорбции, ионного обмена, реакции комплексообразования, биодеградации, деструкции и некоторые другие, которые можно рассматривать в перспективе как процессы «*самоочищения*» [7].

Выполнить прогноз качества подземных вод на этапе рекультивации карьерных выемок достаточно сложно, т.к. **Уральский регион можно отнести к сложным**, с точки зрения экологии, территориям. Это обусловлено геологическим строением региона [6]; гидрогеологическими условиями [1]; сменой ландшафтных зон с севера (тундра, лесотундра) на юг (степи, полупустыни) и от подножий гор к их вершинам; разнообразием климатических зон (от зон с избыточным увлажнением к зонам с недостатком влаги); историей освоения региона; региональной отраслевой структурой экономики, сформировавшейся в результате «последовательного развития горнодобывающих, перерабатывающих и машиностроительных производств, приуроченных к рудным узлам и районам» [3]; наличием техногенно-минеральных месторождений [8]; отсутствием планомерных работ по рекультивации нарушенных земель. Все вышеперечисленные особенности определяют экологическую обстановку на освоенных территориях Урала.

Кроме региональных закономерностей формирования состава подземной воды большую роль играет **история существования самого карьера**, начиная с окончания процесса добычи и до настоящего времени. Примеры использования отработанных карьерных выработок и историй их существования.

1. На территории Дегтярского рудного поля на западном склоне г. Лабаз до конца 80-х годов для производства закладочного материала в шахты Дегтярского рудоуправления разрабатывался глиняный карьер протяженностью до 1000 м при ширине 95-185 м и глубиной 7-10 м. Позднее в пределах этого же участка отрабатывались запасы «железной шляпы» Дегтярского месторождения, карьер увеличился до 1500 м в

длину, до 240 м в ширину, до 47 м в глубину. На месте карьера ранее находилась шахта «Большевик», участок относится к зоне с затухающими процессами сдвижения горных масс, которые привели к образованию и развитию оползневых процессов по склону горы Лабаз, усиливающихся за счет талых и ливневых стоков. Шахтные воды заполнили карьерную выемку. Далее началась рекультивация с формированием внутренних отвалов, позднее появились несанкционированные навалы строительных и промышленных отходов. В местах насыпей дно карьера преимущественно сухое, в южной пониженной части разгружается подземная кислая вода (pH до 2-3) [5].

2. На территории месторождения Яман-Касы состав воды в карьере формируется не только за счет подземного стока и атмосферных осадков, но и за счет отвалов данного месторождения и склада забалансовых руд, расположенных выше по рельефу, сток с территории которых направляется в карьерную выемку.

3. Южный карьер Шувакишского месторождения кирпичных глин в Екатеринбурге. Окончание отработки 70-е годы 20 века. Исследуемая территория представляет собой бесхозный карьер площадью 15 га. Изначально сухой карьер (попадал в зону депрессионной воронки Шувакишского водозабора) был застроен капитальными гаражами, но после снижения эксплуатационной нагрузки Шувакишского водозабора и его остановки в 2002 г., произошло затопление карьера с одновременным формированием несанкционированной свалки.

Исходный состав подземной воды формируется в карьере в зависимости от вида минеральных ресурсов: топливные, рудные, нерудные, с детализацией по видам топлива, составом руд и сырья.

Важным моментом является выбор способа рекультивации: с использованием отходов производства, строительных отходов, вскрышных пород, с затоплением подземной водой, с использованием рекультивационного материала с одновременным затоплением подземной водой.

При рекультивации нарушенных земель возникает проблема поиска рекультивационного материала, способного не только восстановить нарушенный рельеф, но и не ухудшить экологическую ситуацию из-за своих физико-механических свойств и химического состава. Огромные объемы карьеров, зон обрушения требуют и огромных масс грунтов. Преимущество использования техногенных минеральных образований для рекультивации нарушенных земель состоит в том, что объем этих образований значительный, они имеют более или менее однородный состав, как правило, известен и их минеральный состав, в будущем, имея скопления этих образований на локальных участках при появлении соответствующих технологий, можно рассматривать эти скопления как техногенные месторождения [9].

1. Состав воды в карьерных выемках после добычи строительных материалов г.˚Екатеринбурга сформировался в результате их затопления [10]. Затопление карьерных выемок и появление искусственных водоемов происходит преимущественно за счет подземных вод и атмосферных осадков. Водоемы небольших карьеров строительных материалов характеризуются новообразованными экосистемами пресноводных водоемов с формированием донных отложений. В накапливающихся донных отложениях современных водоемов в глинистой составляющей преобладают монтмориллонит, реже – каолинит и иллит. Аналогичные образования характерны и для техногенных водоемов. В процессе гидролиза в осадок выпадают гидроксиды железа (pH выпадения 3,8-4,5), алюминия (pH выпадения 4,1-5,0), которые обладают высокой сорбционной способностью для других металлов (Cu, Zn, Co, Ni, Pb, Cd и др.).

Обработка результатов опробования техногенных водоемов территории г. Екатеринбурга показала, что состав макро- и микрокомпонентов вод весьма разнообразен. В целом они характеризуются пестротой химического состава. По преобладающим анионам и катионам, их количественному соотношению воды, в основном, пресные, гидрокарбонатные и смешанные, единичные пробы – хлоридные,

сульфатные; по катионному – смешанные, единичные пробы – магниевые, кальциевые (рис. 1).

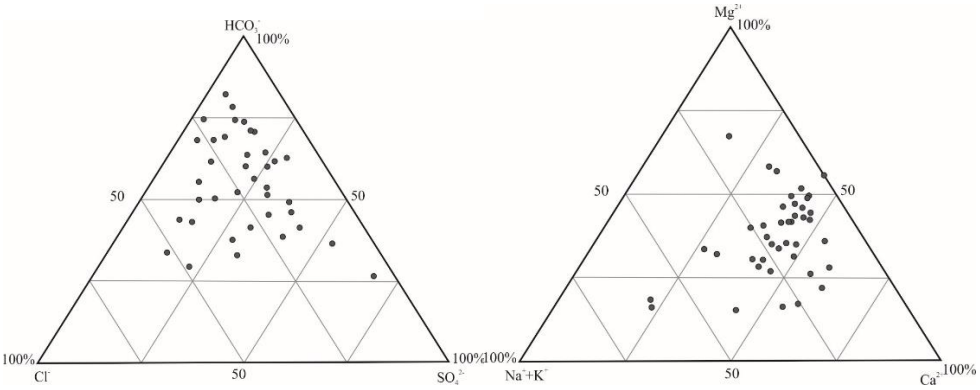


Рис. 1. Химический состав вод техногенных водоемов г. Екатеринбурга

Результаты гидрохимического опробования техногенных водоемов территории г. Екатеринбурга показали, что воды с повышенной минерализацией, увеличением в их составе сульфатов, хлоридов, приурочены к заболоченным участкам, на которых часто наблюдаются несанкционированные свалки строительного, бытового мусора, либо к промышленным зонам.

С целью выявления источников загрязнения вод в зимних условиях выполнено сопряженное опробование снежного, ледового покровов и воды техногенных водоемов г. Екатеринбурга. На основе полученных данных были получены следующие закономерности: увеличение с глубиной значений органолептических показателей, таких как водородный показатель pH, количество гумуса, окисляемости, минерализации, общей жесткости; увеличение с глубиной количества взвешенных веществ; изменения в макрокомпонентном составе – увеличение с глубиной содержаний Cl, SO_4, Na, уменьшение Mg; увеличение с глубиной средневзвешенного значения Fe, Pb, Mn и Ni, уменьшение Cr; постоянные концентрации для всех сред Sb и P; концентрации остальных элементов с глубиной уменьшаются. По макрокомпонентному составу, минерализации, количеству взвешенных веществ пробы водоема, отобранные зимой, не отличаются от проб, отобранных ранее в летний период. Содержание гумуса, концентрации Fe и Pb в летних пробах превышает в два раза значения зимних проб, значения окисляемости в летних пробах в два раза меньше. Значения концентраций Ni и Cr не зависят от сезонности опробования.

2. Состав подземной воды при рекультивации карьера кирпичных глин строительными песками. На предприятиях металлургической отрасли в связи с особенностями технологии производства огромный процент от первоначального сырья уходит в отходы – шлаки. Учитывая объёмы современного производства металлов, количество производимых металлургических отходов огромно. В прошлом отходы в большинстве случаев не подвергались переработке, и не использовались в качестве строительного сырья, такие отходы чаще всего складировались в отвалы. В настоящее время при переработке отвальных шлаков медеплавильного производства на обогатительной фабрике получают медный концентрат и пески строительные.

По результатам минералогического анализа (С. В. Акулова, кафедра ГПР МПИ УГГУ) в составе песков преобладает фаялит (частично с тонкодисперсными включениями магнетита) – 85-87 %, магнетит – 13-15 %, в виде единичных зерен присутствуют хромшпинелиды, сульфиды, кварц и апатит. Мониторинг подземных вод в скважине, пробуренной в основании массива песка ниже по потоку подземных вод, показал, что состав воды магниево-кальциевый, сульфатно-гидрокарбонатный,

минерализация до 200 мг/л, в повышенных концентрациях обнаружены железо и свинец. Наблюдалось увеличение доли сульфатов от 10 до 50 %-экв/л с 2009 по 2018 г., начиная с 2019 г. в результате освоения территории выше карьера жилой застройкой без канализирования стоков, доля сульфатов уменьшилась до первоначальных значений, но появились хлориды и ионы аммония до 10%-экв/л. Колебания минерализации до 2018 г. составили 150-200 мг/л, после 2018 г. – 170-350 мг/л.

Особую роль в формировании состава подземных вод играет зона сочленения горно-складчатых сооружений Урала и покровный отложений Западно-Сибирской плиты. Сильно метаморфизированные и дислоцированные палеозойские породы этой зоны в виде ступенчатой системы сбросов и уступов погружаются под покров отложений Западно-Сибирской низменности [11].

3. Состав воды в отработанном карьере медно-колчеданного месторождения, которое имеет двухъярусное строение: породы верхнего яруса представлены мергелями, часто алевритовыми с глауконитом, в нижней части песчаниками глауконит-кварцевыми с редкими маломощными прослоями опок, глауконит-кварцевыми, опоками, диатомитами и глауконит-кварцевыми песчаниками с опоковым цементом и глинистым цементом. Нижний ярус, рудоносный, сложен известняками, битуминозными известняками, рассланцованными трещиноватыми порфиритами, сланцами. Рудные тела Султановского месторождения приурочены к нижнему ярусу, залегают преимущественно в порфировых риолитах, их туфах и брекчиях на глубинах от 100 до 300 м.

На площади месторождения развиты два водоносных горизонта: трещинно-пластовые подземные воды мезо-кайнозойских отложений и трещинные воды пород палеозойского возраста, которые гидравлически связаны между собой и имеют практически единое зеркало водной поверхности. Уровни залегают на глубинах от 0,5 до 9,25 м. Направление потока подземных вод в естественных условиях до начала отработки Султановского месторождения южное, по направлению к долине р. Теча.

Подземные воды палеозойского горизонта в районе Султановского месторождения по классификации можно отнести к околонейтральным, сульфатного типа, характерным признаком является преобладание сульфат-ионов среди других анионов и относительно повышенное содержание рудообразующих металлов. Такой химический состав характерен для вод, циркулирующих в рудных телах со слабо развитыми процессами окисления, и особенно характерен для вод, окружающих рудные тела. Это широко распространенный тип для вод, окружающих колчеданные месторождения в условиях полосы неустойчивого увлажнения и провинции аридных областей.

На этапе отработки месторождения подземные воды карьерного водоотлива характеризовались сульфатно-гидрокарбонатным составом с минерализацией 0,42 г/л, нейтральные с pH 6,70; высоких содержаний микроэлементов, превышающих ПДК, не выявлено. Соответственно, химический состав дренажных вод формировался в условиях доминирующего влияния нейтральных-слабощелочных вод палеоген-меловых отложений.

При затоплении карьера происходит уменьшение водообмена через толщу сульфидсодержащих пород. Это приводит к уменьшению сульфатной составляющей в составе карьерных вод, снижению минерализации воды. В результате проведенных исследований подтверждено отсутствие выраженной зоны кислых вод в придонной части затопляемой карьерной выемки, с глубиной наблюдается незначительное увеличение кислотности карьерных вод с pH от 7,70 в приповерхностном слое до 6,90 на глубине 35 м. На фоне уменьшения pH воды с глубиной выявлено увеличение минерализации карьерных вод, содержания в них сульфатов, меди, цинка, никеля, марганца, кадмия, связанных с окислением сульфидсодержащих масс в условиях доступа кислорода и активного водообмена.

Прогнозный расчет изменения химического состава воды, накапливающейся в карьере, выполнен с учетом баланса источников питания карьера. Расчеты выполнены по значению минерализации смешивающихся вод, содержанию в них сульфатов - как основных индикаторов возможных процессов окисления сульфидных минералов в нижней части разреза. Дополнительно выполнен прогноз изменения содержания в воде цинка и марганца, без учета того фактора, что содержание металлов в водах зависит от физико-химических параметров растворов, и возникающих в толще воды процессов комплексообразования, осаждения и пр., что приводит к снижению концентраций металлов в воде. О наличии этих процессов свидетельствует низкие фактические их содержания в пробах воды, отобранных из карьерного озера, относительно расчетных.

Результаты расчета методом смешения приведены на рис. 2.

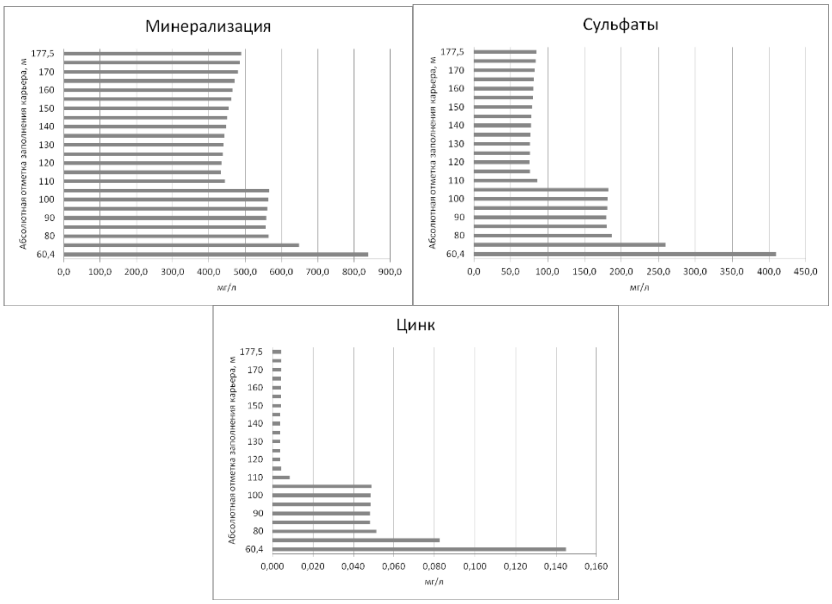


Рис. 2. Прогноз качества воды в карьере Султановкого рудника

Таким образом, в данных природно-технических условиях образованию кислых металлоносных рудных вод и загрязнению палеозойского водоносного горизонта препятствуют следующие факторы: наличие глинистого экрана на дне карьерной выемки, небольшие уклоны естественного потока подземных вод, уменьшение интенсивности водообмена через сульфидсодержащие породы при затоплении карьера, наличие в области питания и стока карбонатных пород, содержащих слабощелочные воды, водообильного палеоген-мелового водоносного горизонта в верхней части гидрогеологического разреза, содержащего слабощелочные воды [2].

Состав воды в Коркинском карьере при ликвидации закладочным материалом, подготовленным на обогатительной фабрике при переработке медно-порфировых руд Томинского месторождения, отличающихся низкими содержаниями сульфидов. Минеральный состав закладочного материала определен методом рентгеноспектрального микроанализа (Демина Л.А., УГГУ), отн. %: пирит – менее 1, карбонат-3, рутил- 1, клинохор-20, альбит- 32, биотит-3, кварц- 40.

Жидкая фаза закладочного материала имеет сульфатно-гидрокарбонатный и гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-натриевый состав, пресная при величине сухого остатка 0,42-0,46 г/л, нейтральная при pH 7,28-8,20. Содержания марганца, кремния, алюминия, меди, цинка, свинца, кадмия, ртути, мышьяка и нефтепродуктов выше предельно допустимых концентрации для воды хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования в жидкой фазе закладочного материала не зафиксированы [4].

Таким образом, рекультивированные карьерные выемки становятся техногенными областями питания для подземных вод. Качество воды после рекультивационных работ зависит от положения выемок в геологических структурах региона, от закладочного материала, от состояния выработок до процесса рекультивации, от наличия других источников воздействия в области питания водоносных горизонтов.

Список литературы

1. Абатурова И. В., Афанасиади Э. И., Грязнов О. Н., Гуман О. М., Дубейковский С. Г., Новиков В. П., Палкин С. В., Парфенова Л. П. Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии при разведке и эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых на Урале // Известия Уральского горного института, 1993. № 2. - С. 189-199.

2. Антонова И. А., Гуман О. М. Гидрогеологические прогнозы затопления открытых горных выработок на этапе ликвидации (на примере Султановского рудника) / Материалы XIII Общероссийской конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» 29.11.2017-01.12.2017, Москва- С.388-394.

3. Вегнер-Козлова Е. О., Гуман О. М. Актуальные вопросы законодательства по рекультивации нарушенных земель//Известия вузов. Горный журнал, 2015. № 4.- С.61-66.

4. Гуман О. М., Антонова И. А., Макаров А. Б. Гончар Н. В. Роль техногенных минеральных образований при рекультивации нарушенных земель в Уральском регионе/ Инженерно-экологические изыскания – нормативно-правовая база, современные методы и оборудование. Материалы Общероссийской научно-практической конференции. М.: ООО «Геомаркетинг». 2023.- С.75-83.

5. Гуман О. М., Антонова И. А., Гончар Н. В. Экологические последствия разработки месторождений меди на Урале / «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы»: Материалы восьмой научно-практической конференции/ под ред. И. И. Косиновой. – Воронеж: Кварта, 2023 г. – С. 127-133.

6. Гуман О. М., Дубейковский С. Г. Инженерно-геологическая типизация железорудных месторождений Урала // Инженерная геология. – 1991. - № 3. – С. 36-42.

7. Гуман О. М., Грязнов О. Н., Антонова И. А., Макаров А. Б., Захаров А. В. Эколого-геологические условия и мониторинг окружающей среды полигонов твердых бытовых отходов Среднего Урала / Научное издание. - Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013.-237с.

8. Гуман О. М., Макаров А. Б., Мусина О. М. Особенности инженерных изысканий при освоении рудных месторождений в Уральском регионе// Известия вузов. Горный журнал, 2012. № 1.- С.134-137.

9. Гуман О. М., Макаров А. Б., Бобров Д. В. Оценка возможности и направления рекультивации нарушенных земель селитебных территорий/ Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы. Материалы четвертой международной научно-практической конференции 30 сентября -2 октября 2015 г.г.Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2015- С. 92-94.

10. Макаров А. Б., Антонова И. А., Гуман О. М., Хасанова Г. Г. Эколого- и гидрохимические особенности современных техногенных водоемов (на примере Уральского региона) /ВЕСТНИК ВГУ. Серия: Геология. -2018. -№ 1- С.148-154.

11. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Смирнов А. Ю., Галицкая И. В., Батрак Г. И. , Лысенко О. В. Пономарев В. С. Формирование гидрогеологических условий Челябинского угольного бассейна на постэксплуатационном этапе/ Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2023, № 2, С. 3–18.

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ПРЕЦИЗИОННОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ТЕХНОГЕННО-НАРУШЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Горбунова Э.М.[1], Иванов А.Г. [1], Караваев А.В. [1,2], Петухова С.М. [1], Федоров А.Ю. [1,2]
[1]*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, emgorbunova@bk.ru*
[2]*АО «Комбинат КМАруда», Губкин*

Аннотация. В статье представлены результаты использования аппаратурно-измерительного комплекса при выполнении прецизионного гидрогеологического мониторинга на территории Коробковского железорудного месторождения Курской магнитной аномалии. Основное внимание уделено анализу причин формирования локальных мини депрессионных воронок на фоне региональных изменений гидрогеодинамической обстановки. Полученные экспериментальные данные могут использоваться для дистанционного контроля за формированием техногенно-нарушенного режима подземных вод и вариациями фильтрационных параметров водонасыщенных коллекторов в квазистационарных условиях при разработке месторождений полезных ископаемых с использованием взрывных технологий.
Ключевые слова: *железорудное месторождение, техногенно-нарушенные условия, прецизионный гидрогеологический мониторинг, динамическое воздействие, фильтрационные параметры*

Abstract. The results of precision hydrogeological monitoring using a measuring complex in the Korobkovsky iron ore deposit of the Kursk Magnetic Anomaly are presented in the article. The focus of this paper is on analysis of local mini depression cones formation patterns considering regional changes in the hydrogeodynamic situation. The obtained experimental data can be used for remote monitoring of the technogenically disturbed groundwater regime formation and the water-saturated reservoirs filtration parameters variations in quasi-steady conditions and during the development of rock deposits using explosive technologies.
Key words: *iron ore deposit, technogenically disturbed conditions, precision hydrogeological monitoring, dynamic impact, filtration parameters*

Интенсивность нарушения режима подземных вод зависит от геолого-структурных, гидрогеологических условий и техногенной нагрузки. Наиболее значимые изменения гидрогеодинамической обстановки установлены в пределах градопромышленных комплексов и разрабатываемых месторождений полезных ископаемых. Общая площадь депрессионной области достигает 33 тыс. км^2 [1]. Максимальные снижения уровня разновозрастных горизонтов и комплексов, например, в Московской области изменяются от 60 до 90 м. В эрозионных окнах – на участках размыва относительных водоупоров изменение соотношений между гидростатическими напорами и частичная их сработка может приводить к усилению процессов нисходящей фильтрации и активизации природно-техногенных процессов.

Развернутая сеть наблюдательных скважин государственной и локальной сетей представляет собой единую систему регулярных наблюдений за гидрогеодинамической обстановкой [2]. Применение современных аппаратурно-измерительных комплексов, работающих в режиме реального времени, обеспечивает переход на новый уровень получения объективной информации по состоянию недр и мониторингу природно-техногенных процессов. Полученные данные могут быть использованы для разработки рекомендаций и принятия своевременных мер по регулированию работы водозаборов и дренажных систем месторождений, расположенных в черте городской застройки.

Район Курской магнитной аномалии (КМА) представляет особый интерес в плане проведения постановочных работ по организации прецизионного гидрогеологического мониторинга за состоянием обводненной толщи рудно-кристаллического массива из-за различных этапов в процессе освоения месторождений. Магнитные аномалии железорудных месторождений КМА выявлены геофизическими методами в период проведения поисково-разведочных работ в 1919-1924 гг. В 1931 г. была начата проходка первой разведочно-эксплуатационной шахты на территории Коробковского

месторождения [3]. В 1936 г. произошла авария на глубине 145 м в межстволовом штреке сечением 2,5х2,5 м из-за вскрытия палеодолины, выполненной обводненными (плывунными) песчано-глинистыми отложениями. Ликвидация прорыва, расположенного на расстоянии 275 м от ствола шахты, была выполнена путем сооружения цементной перемычки из двух вертикальных скважин, пробуренных с поверхности до штрека [4]. В военный период 1941-1945 гг. шахты были затоплены. В 1946 г. работа рудника была продолжена после откачки воды из шахт Коробковского месторождения. Открытая добыча богатых руд Лебединского месторождения проводится с 1959 г. Разработка железорудных залежей месторождений КМА продолжается и в наше время.

Мониторинг гидрогеологических условий шахтного поля Коробковского месторождения КМА выполняется в пунктах режимной сети АО «Комбинат КМАруда» стандартными методами и заключается в периодических измерениях уровня подземных вод в скважинах с использованием электроуровнемеров и водопритоков в горных выработках на разных горизонтах объемным методом, отборе проб воды для контроля химического состава подземных вод. Экспериментальные исследования по оценке возможных изменений фильтрационных свойств водонасыщенных коллекторов в процессе эксплуатации железорудных месторождений КМА проводятся на территории шахтного поля Коробковского месторождения с июля 2019 г. ИДГ РАН [5].

Основная цель выполняемых работ заключается в анализе эффективности использования аппаратурно-измерительных комплексов и программного обеспечения для обработки экспериментальных данных, которые позволяют оперативно отслеживать возможные изменения гидрогеологических условий. Объект исследований – водоносная толща рудно-кристаллического фундамента Коробковского месторождения КМА. Одна из основных задач комплексных наблюдений за гидрогеодинамической обстановкой заключается в организации синхронного мониторинга сейсмических, гидрогеологических и барометрических параметров в пределах разрабатываемого железорудного месторождения.

В состав аппаратурно-измерительного комплекса на поверхности входят трехкомпонентные сейсмоприемники СПВ-3К, датчик атмосферного давления РАА-33Х, прецизионные датчики уровня PR-36XW, установленные в скважинах, вскрывающих трещинно-поровые воды, развитые в песчаных отложениях альб-сеномана нижнего-верхнего мела, и трещинно-пластовые воды, приуроченные к зоне экзогенного выветривания кристаллических пород, архей-протерозойского фундамента [6]. В подземной выработке планируется установка сейсмоприемника СПВ-3К и электромагнитного расходомера ЕМ 470 для стационарных высокоточных наблюдений за водопритоком трещинно-жильных вод, приуроченных к зонам повышенной трещиноватости пород, сопряженным с разломами и литолого-стратиграфическими контактами.

Регистрация сигналов с частотой опроса 200 Гц/канал на поверхности осуществляется 6-канальными станциями REFTEK-130 и Centaur, в подземной выработке – с использованием сейсмостанции и промышленного компьютера. Полученные данные синхронной регистрации сейсмических, гидрогеологических и барометрических параметров систематизированы в единую базу, которая хранится на сервере ИДГ РАН и постоянно обновляется. Предусмотрена следующая последовательность обработки экспериментального материала.

В первую очередь для определения фоновых параметров обводненной части надрудной толщи проводится децимация исходных данных с шагом 5 минут. На основе полученных временных рядов регистрации выполняется оценка амплитуд сезонных вариаций уровней верхнего альб-сеноманского водоносного горизонта и нижнего архей-протерозойского водоносного комплекса, коэффициентов барометрической эффективности и приливной чувствительности.

Использование приливного анализа позволяет контролировать вариации фильтрационных параметров водонасыщенных коллекторов в режиме реального времени без проведения дополнительных дорогостоящих и трудозатратных опытно-фильтрационных работ в скважинах. По результатам оценки фазового сдвига между полусуточными приливными волнами лунного типа M_2, выделенными в объемной деформации пород, теоретически рассчитанной по программе ETERNA 3.0, и вариациях уровня подземных вод, определяется проницаемость и водопроводимость разновозрастных горизонтов.

В полученных рядах данных после фильтрации от влияния атмосферного давления и земных приливов выделяются периоды сезонного питания подземных вод. В отдельных случаях на диаграммах проявляются локальные мини депрессионные воронки, сформированные после проведения промышленных взрывов как в шахте Коробковского месторождения (рис. 1), так и в Лебединском карьере.

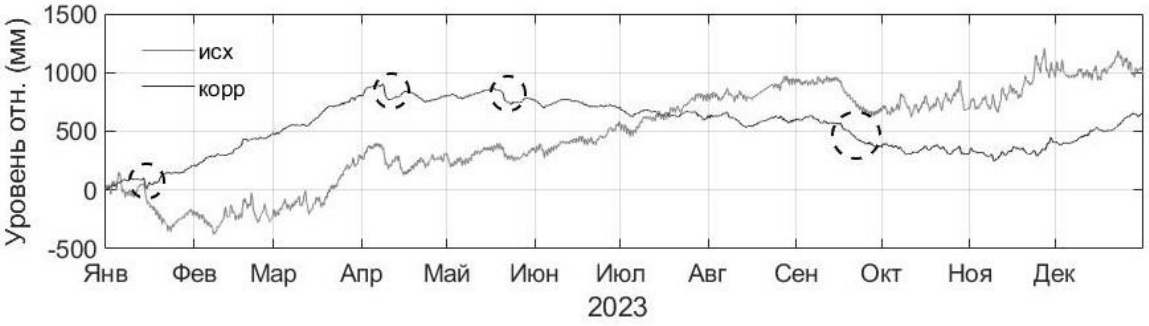


Рис. 1. - Диаграммы вариаций уровня архей-протерозойского водоносного комплекса (исходные данные – серая линия; очищенные от влияния атмосферного давления и земных приливов – черная линия) (пунктирными кружками выделены интервалы постсеймического снижения уровня после промышленных взрывов, проведенных в шахте)

Для оценки влияния промышленных взрывов, производимых в шахте и карьере, формируется выборка интервалов из сейсмических, гидрогеологических и барометрических данных с длиной ряда от 25 до 40 с, соответственно. На основе обработки исходных данных определяются:

- разные времена вступлений сейсмических волн в системе «пласт-скважина» и на поверхности;

- этапы подрывов блоков и камер, которые более отчетливо проявляются в обводненной толще массива по сравнению с сейсмическими данными, зарегистрированными на поверхности;

- амплитудно-частотные характеристики системы «пласт-скважина» при проведении промышленных взрывов на разных эпицентральных расстояниях и направлениях относительно пунктов наблюдений.

Гидрогеологические отклики на прохождение сейсмических волн от промышленных взрывов используются для определения максимальных амплитуд вариаций скорости смещения грунта (рис. 2а) и порового давления (рис. 2б). В ряде случаев прослеживаются постсейсмические эффекты различной продолжительности в виде снижения уровня подземных вод (рис. 2в) исходного и отфильтрованного от влияния атмосферного давления (рис. 2г).

Постсейсмическое снижение уровня преимущественно выделяется при проведении промышленных взрывов в камерах, расположенных ниже по направлению подземного потока относительно пункта наблюдений. Максимальное снижение уровня трещинно-пластовых вод составило 30 см в течение 12 суток. Постсейсмический эффект

в виде кратковременного снижения уровня до 5 см зарегистрирован после проведения промышленных взрывов в Лебединском карьере в течение первого часа. Отмеченные эффекты обусловлены оттоком подземных вод на заполнение зон техногенной и подновленной трещиноватости, сформированной при промышленных взрывах.

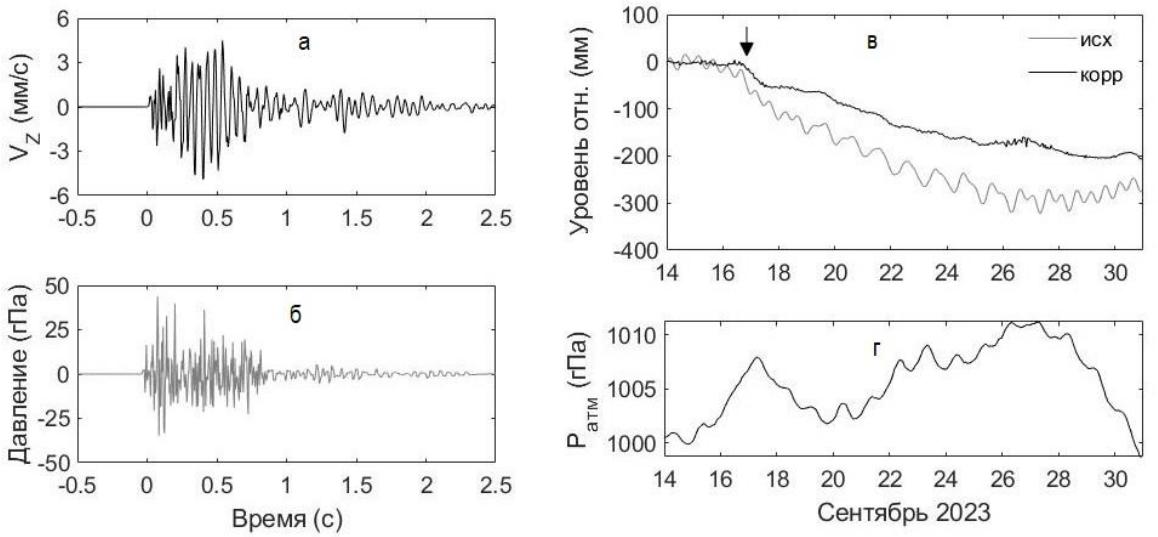


Рис. 2. – Диаграммы косейсмических вариаций скорости смещения грунта (а) и порового давления в системе «пласт-скважина» (б) при промышленном взрыве в шахте 16.09.2023 г. и постсейсмического изменения уровня в период 16-26.04.2023 г. исходного (серая линия) и отфильтрованного от влияния атмосферного давления и земных приливов (черная линия) (в) и вариаций атмосферного давления (г) (стрелкой обозначено время взрыва)

Отмеченные закономерности подтверждают единую фильтрационную структуру разрабатываемых месторождений и свидетельствуют о наличии гидравлической взаимосвязи между трещинно-пластовыми и трещинно-жильными водами. Это определяет необходимость и актуальность организации подземного стационарного пункта наблюдений и проведения высокоточных наблюдений за водопритоком в горную выработку.

Пробные измерения водопритока были проведены при взрывах в шахте 22.07.2023 г. и в Лебединском карьере 25.10.2023 г. и 06.12.2023 г. Изменений водопритока в момент взрыва не отмечено и, вероятно, это связано с низкой точностью использованной модели датчика Холла YF-S201. Прослежен сезонный тренд уменьшения интенсивности водопритока в горную выработку от 0,312 до 0,296 л/с с июля по декабрь 2023 г.

Аналогичные гидрогеологические эффекты в виде снижения уровня подземных вод от первых десятков сантиметров до десятков метров продолжительностью от первых суток до нескольких месяцев и более установлены в ближней зоне землетрясений и при крупномасштабных взрывах, проведенных на различных испытательных полигонах. Интенсивность проявления постсейсмических эффектов в массиве горных пород и в зонах влияния разломов различается [7]. Возможно, отмеченная закономерность также проявится и на микроуровне при выполнении прецизионного гидрогеологического мониторинга в горной выработке процессе разработки железорудных месторождений КМА.

Таким образом, в пределах месторождения на фоне существующей региональной депрессионной воронки могут быть сформированы локальные участки техногенно-нарушенного режима подземных вод, параметры которых определяются не только технологическими циклами, связанными с работой дренажных систем и закачкой пульпы - подземной утилизацией отходов, но и с проведением промышленных взрывов.

Проходка горных выработок и разработка железорудного месторождения с использованием взрывных технологий сопровождается образованием зон техногенной трещиноватости. Подновление гидрогеологически активных зон, сопряженных с разломами, литолого-стратиграфическими контактами, в процессе разработки железорудного месторождения может приводить к изменениям фильтрационной структуры рудного массива. Это определяет целесообразность постановки и проведения прецизионных гидрогеологических наблюдений в горной выработке. Синхронные измерения на поверхности и в шахте позволят оценить гидравлическую взаимосвязь между между трещинно-пластовыми и трещинно-жильными водами.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-27-00469, https://rscf.ru/project/23-27-00469.

Список литературы

1. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Центрального федерального округа за 2021 г. Вып. 27. – М.: ФГБУ «Гидроспецгеология», 2022. – 163 с.

2. Лыгин, А. М. Мониторинг напряженно-деформированного состояния геологической среды в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах в 2007-2014 годах // А. М. Лыгин, С. К. Стажило-Алексеев, И. Н. Кадурин, В. Г. Сибгатулин, А. А. Кабанов – Красноярск: Изд-во «Город», 2015. – 114 с.

3. Железные руды КМА. – М.: Геоинформмарк. – 616 с.

4. Климентов, П. П. Гидрогеология месторождений твердых полезных ископаемых // П. П. Климентов, А. М. Овчинников. – М.: Недра, I часть, 1966. – 199 с.

5. Беседина, А. Н. Отклик водонасыщенного коллектора на прохождение сейсмических волн в ближней зоне массового взрыва шахте // А. Н. Беседина, Э. М. Горбунова, А. А. Остапчук, Д. В. Павлов. Динамические процессы в геосферах. Вып. 11: сб. науч. тр. ИДГ РАН. – М.: Графитекс, 2019. – С. 70–78.

6. Горбунова, Э. М. Постсейсмические эффекты массовых взрывов, выделенные при разработке железорудных месторождений КМА // Э. М. Горбунова, А. Н. Беседина, Н. В. Кабыченко, Н. В., И. В. Батухтин, С. М. Петухова. Динамические процессы в геосферах. – М.: ИДГ РАН, 2022, т. 14, № 1. – С. 51–68 (электронная версия). http://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_51

7. Горбунова, Э. М. Реакция подземных вод на землетрясения и крупномасштабные взрывы // Э. М. Горбунова, Е. А. Виноградов, А. Н. Беседина, Д. В. Гашев. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Изд-во «Горная книга», 2017, № 1. – С. 273–288. http://giab-online.ru/catalog/11855

НАДМЕРЗЛОТНЫЕ ВОДЫ ПОЙМЕННЫХ ТАЛИКОВ Р. ЛЕНЫ В РАЙОНЕ ПОС. КАНГАЛАССЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Горохова Н. Б.
Институт мерзлотоведения им. М.П. Мельникова СО РАН, Якутск, xnb9@mail.ru

Аннотация. Исследование химического состава надмерзлотных вод пойменных таликов в бассейне реки Лены имеет большое практическое значение, поскольку позволяет оценить их пригодность для различных видов хозяйственно-питьевого водоснабжения. По материалам многолетних данных изучен и проанализирован химический состав подземных вод локально-водоносного криогенно-таликового четвертичного – верхнеюрского(Q-J3) и четвертичного-нижнемелового терригенного комплекса (Q-K_1), сформировавшихся под руслом и мелкими протоками р. Лены.
Ключевые слова: *надмерзлотные воды, талик, химический состав.*

Abstract. The study of the chemical composition of suprapermafrost waters of floodplain taliks in the Lena River basin is of great practical importance, since it allows us to assess their suitability for various types of households and drinking water supply. The chemical composition of groundwater of the locally water-bearing cryogenic talik of the Quaternary-Upper Jurassic (Q-J3) and Quaternary-Lower Cretaceous terrigenous complex (Q-K1) formed under the channel and small channels of the Lena River has been studied and analyzed based on long-term data.
Keywords: *supra-permafrost waters, talik, chemical composition*

В последние годы изучение пойменных таликов в долине реки Лены становится все более актуальным. Прежде всего, это связано с увеличением численности населения в этом регионе и стремлением обеспечить его питьевой водой хорошего качества. Целью данного исследования стало изучение химического состава пойменных таликов реки Лены в районе Кангаласского мыса в Центральной Якутии. Для достижения этой цели проведены систематизация и анализ результатов гидрогеохимических исследований подземных вод, развитых под протоками реки Лены.

Рассматриваемая территория расположена в пределах Центрально-Якутской низменности в бассейне среднего течения р. Лена (рис.1). Рельеф представлен поймой и молодыми надпойменными террасами р. Лены, а также средневысотными террасами, сформировавшимися в плейстоценовое время. Река относится к восточносибирскому типу. Она берет свое начало на северо-западном склоне Байкальского хребта и, принимая множество притоков, несет свои воды к морю Лаптевых. Её длина составляет 4400 км, ширина русла в районе исследований составляет 5-7 км. В весеннее половодье значительная часть поймы затопляется, при этом образуется водная поверхность шириной около 10 км. В летние и осенние месяцы наблюдаются несколько паводков, связанных с поступлением надмерзлотных вод из слоя сезонного протаивания и дождевых осадков. Ледообразование на р. Лене происходит в октябре. В зимнюю межень (март-апрель) уровень речных вод находится на отметках 81,7-83,5 м. Его подъем во время весеннего паводка достигает 7–11 м, средняя глубина 3,0 м. Средний годовой сток р. Лены у г. Якутска 7070 $м^3/с$, максимальный 36200 $м^3/с$ [3]. В соответствие с изменениями гидрологической обстановки изменяется и температура воды в реке: зимой и во время весеннего половодья температура речной воды равна 0–1°С, в июне – около 10–12°С, а в июле 15–17°С.

В гидрогеологическом отношении территория исследований приурочена к Якутскому артезианскому бассейну. Большая часть бассейна расположена в зоне сплошного развития многолетнемерзлых пород, только на юге и юго-западе отмечается их прерывистое и островное распространение [1].

Формирование многолетнемерзлых пород (ММП) связано с аномально низкими величинами теплового потока из земных недр и суровыми климатическими условиями на протяжении всего плейстоценового времени, что способствовало интенсивному

охлаждению верхних горизонтов литосферы и глубокому промерзанию пород в пределах всех геоморфологических уровней [1]. Определяющим фактором, влияющим на морфологию нижней границы криолитозоны, является тепловой поток из недр земли, дифференцированный преимущественно региональной геотектонической обстановкой, литологическим и петрографическим составом пород.



Рис.1 Схема исследования района

Формирование многолетнемерзлых пород (ММП) связано с аномально низкими величинами теплового потока из земных недр и суровыми климатическими условиями на протяжении всего плейстоценового времени, что способствовало интенсивному охлаждению верхних горизонтов литосферы и глубокому промерзанию пород в пределах всех геоморфологических уровней [1]. Определяющим фактором, влияющим на морфологию нижней границы криолитозоны, является тепловой поток из недр земли, дифференцированный преимущественно региональной геотектонической обстановкой, литологическим и петрографическим составом пород. В районе пос. Кангалассы мощность ММП меньше мощности чехла бассейна и составляет 200 м [1]. Для левобережья р. Лены характерны температуры ММП от 0 до -4 °С, на некоторых отдельных участках достигают -7 °С. Глубина слоя сезонного протаивания пород не превышает 3 м.

В Центральной Якутии сплошность ММП нарушается участками сквозного подруслового талика, развитого под руслом р. Лена, а также небольшими по площади и глубине таликами под крупными непромерзающими протоками и озерами.

В районе поселка Кангалассы под руслом р. Лены и протоками, в пределах низкой пойменной террасы установлено наличие подруслового талика. Подземные воды приурочены к локально-водоносным криогенно-таликовым комплексам четвертичных-нижнемеловых и четвертичных-верхнеюрских терригенных отложений. Данные

комплексы залегают первыми от поверхности. Вскрытая мощность таликовой зоны изменяется от первых метров до 60-80 м и более.

Питание водоносного комплекса осуществляется в основном за счет речных вод. Незначительная доля питания приходится на инфильтрацию атмосферных осадков, особенно на участках поймы, где отсутствует козырек мерзлых пород. Однако, поскольку объем атмосферных осадков в летнее время несоизмерим с объемом речных вод, а площадь их инфильтрации весьма ограничена, то существенной роли в формировании запасов водоносного комплекса они не играют.

Локально-водоносный криогенно-таликовый четвертичный – верхнеюрский терригенный комплекс (Q-J_3) представляет собой систему двух водоносных горизонтов, отличающихся по литологическому составу и фильтрационным параметрам пород.

Водовмещающие породы верхнего горизонта представлены четвертичными аллювиальными песками с включениями гравия и гальки, нижнего горизонта – верхнеюрскими песчаниками, алевролитами, глинами и аргиллитами. Суммарная мощность обводненных отложений изменяется от 25 м до 100 м. По типу фильтрации, в зависимости от литологического состава вмещающих пород, воды поровые, порово-пластовые и трещинно-пластовые. Уровень подрусловых вод установился на глубинах от 4,05 м до 9,49 м от поверхности земли. При опытных откачках с дебитами 3,05-4,54 л/с (264-393 $м^3$/сут) понижения уровней подземных вод составили 2,92-14,37 м. Удельные дебиты скважин от 0,22 до 0,88 л/с*м. Коэффициент водопроводимости изменялся от 97 м2/сут до 679 $м^2$/сут. По данным гидрохимического опробования, воды данного комплекса по анионному составу – гидрокарбонатные и хлоридно-гидрокарбонатные, по катионам смешанные. Долевое соотношение в анионном составе воды следующее: гидрокарбонат-ионы – 55-82%, хлорид-ионы – 20-44%, В катионном составе содержание ионов натрия составляет 29-97%, кальция 2-46% и магния 1-29%. Воды пресные с минерализацией 0,4-0,91 г/$дм^3$. Реакция водной среды изменяется от нейтральной до слабощелочной (pH составляет 7,2–8,4). По органолептическим показателям вода высокоцветная (цветность выше 20°), однако эта цветность определяется как «кажущаяся». При хранении проб воды происходит окисление двухвалентного железа $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}+e$, затем гидролиз $Fe^{3+}+3OH \rightarrow Fe(OH)_3$ с образованием коричневой мелкодисперсной смеси. Увеличенное значения мутности воды обусловлено слабым разложением органических веществ в условиях низких среднегодовых температур, а также содержанием в них коллоидных соединений железа. Повышение содержаний железа в таликовых водах, возможно, объясняется действием геохимического окислительного (кислородного) барьера, сущность которого заключается в окислительных преобразованиях более растворимых восстановленных соединений в менее растворимые окисленные. Этот барьер действует при смешении бескислородных вод с кислородсодержащими подземными и поверхностными водами. Значение окисляемости превышает норму, установленную для питьевых вод (ПДК 5 мгO_2/$дм^3$) составляет от 5,32 до 29,0 мгO_2/$дм^3$.

По содержанию химических элементов подземные воды соответствуют требованиям вод питьевого качества, кроме элементов, фоновые концентрации которых вследствие природных геохимических процессов приближаются или превосходят ПДК. К таким элементам для подрусловых вод относятся железо (6,3-8,0 мг/$дм^3$ при ПДК 0,3 мг/$дм^3$), марганец (0,48-1,67 мг/$дм^3$ при ПДК 0,1 мг/$дм^3$), литий (0,04-0,11 мг/$дм^3$ при ПДК 0,03 мг/$дм^3$), фтор (2,0 мг/$дм^3$ при ПДК 1,5 мг/$дм^3$), барий (0,1-0,4 мг/$дм^3$ при ПДК 0,1 мг/$дм^3$).

Локально-водоносный криогенно-таликовый четвертичный аллювиальный - нижнемеловой терригенный комплекс (Q-K_1) так же представляет собой систему двух водоносных горизонтов. Верхний приурочен к современным четвертичным аллювиальным отложениям мощностью до 13 м, он сложен аллювиальными крупнозернистыми песками с включениями гальки. Водовмещающие породы нижнего

водоносного горизонта являются нижнемеловые терригенные песчаники мелко-среднезернистые с прослоями глин, алевролита и углей. Вскрытая мощность обводненных отложений изменяется от 2,2 м до 70 м. Тип фильтрации подземных вод в нижнемеловых отложениях – поровый и порово-пластовый. Уровень подрусловых вод в скважинах установился на глубинах 8,05-13,25 м от поверхности земли. Опытные откачки проведены с дебитами 8,0-12,0 л/с (691-1037 $м^3$/сут) при понижениях уровня 3,25-11,71 м, удельные дебиты соответственно 1,47-3,92 л/с*м. Коэффициент водопроводимости изменялся от 72 до 198 $м^2$/сут.

Согласно данным гидрохимического опробования, в анионном составе воды локально-водоносного криогенно-таликового четвертичного аллювиального-нижнемелового терригенного комплекса преобладают ионы гидрокарбоната (80-86 %), в катионном составе на долю натрия приходится 50-60%, кальция – 25-34 %. По значению минерализации (0,5-0,7 г/$дм^3$) воды классифицируются как пресные. По значению водородного показателя (pH=7,2-7,7) воды нейтральные. По органолептическим показателям они не соответствует требованиям, предъявляемым к питьевым водам по содержанию железа (от 0,43 до 1,35 мг/$дм^3$ при ПДК 0,3 мг/$дм^3$), лития (0,08-0,07 мг/$дм^3$ при ПДК 0,03 мг/$дм^3$), окисляемости от 13,5 до 15,6 мгО/$дм^3$ и показателю мутности 8,0-9,3 (ПДК 1,5 мг/л).

Повышенные содержания железа и марганца в подрусловых водах, вероятно, связано с их питанием речными водами, обогащенных этими элементами. Высокое содержание лития и фтора может объясняться разгрузкой в подрусловой талик подмерзлотных вод юрского водоносного комплекса, для которых характерны превышение данных компонентов.

Таким образом, высокие фильтрационные свойства подрусловых отложений являются обоснованием для рассмотрения их в качестве надежного источника водоснабжения населенных пунктов, расположенных на рассматриваемой территории. Вместе с этим, в своем природном виде использование подземных вод локально-водоносного криогенно-таликового современного четвертичного – верхнеюрского терригенного комплекса и локально-водоносного криогенно-таликового современного четвертичного – нижнемелового терригенного комплекса для целей питьевого водоснабжения возможно только после проведения мероприятий по уменьшению содержания нормируемых компонентов ниже предельно-допустимых концентраций, т.е. требуется проведение мероприятий по специальной водоподготовке.

Список литературы

1.Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М., Шепелев В.В., Ломовцева Н.С., Скутин В.И. Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. -137 с.

2.Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири масштаба 1:2 500 000 / гл. редактор Мельников П.И., зам гл. редактора О.Н. Толстихин, составители: Иванова Л.Д., Ломовцева Н.С., Никитина Н.М., Пигузова В.М.). М., ГУГК, 1984.

3.Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н., Кирик О.М., Прокопьев В.П., Андросов И.М., Сахаров А.И. Морфология, деформации, временные изменения русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска. *Геоморфология*. 2016;(3):22-35. https://doi.org/10.15356/0435-4281-2016-3-22-35

РАСЧЁТ ПРОМЕРЗАНИЯ КОТЛОВАНА

Луканов Д.Д.[1], Расторгуев И.А.[2], Пиотровский А.С.[3]
[1]*АО «Институт Гидропроект», Москва, dmitrii_lukanov@mail.ru*
[2]*НИЦ «Курчатовский институт», Москва, stiar@mail.ru*
[3]*АО «Институт Гидропроект», Москва, aspio55@mail.ru*

Аннотация. В данной работе приводятся расчеты промерзания грунтов в котловане промышленного объекта при помощи модуля FreezeThaw75 расширения программного комплекса DHI FEFLOW. Теплофизические характеристики грунтов были получены по результатам калибровочных расчетов по данным пяти скважин, для которых имелись замеры температуры по глубине в течение года. Максимальная глубина промерзания на модели получилась равной 3,1 м. Было получено изменение притока подземных вод в котлован во времени. Также были рассмотрены варианты растепления котлована при помощи электрозондов и закачки солевого раствора.
Ключевые слова: *подземные воды, промерзание, растепление котлована, калибровка, FEFLOW.*

Abstract. This paper provides simulations of soil freezing at the basement of the pit using FreezeThaw75 plugin for the DHI FEFLOW software package. The thermophysical properties of the soils were obtained from the results of calibrations for five wells with annual temperature measurements. The maximum freezing depth in the model was calculated to be 3.1 m. Variable inflow of groundwater into the pit over time was obtained. Options for thawing the pit using electric probes and brine injecting were also considered.
Key words: *groundwater, freezing, thawing of the pit, calibration, FEFLOW*

Разработка котлованов и последующее строительство промышленных объектов в условиях севера могут осложняться промерзанием грунтов, что неприемлемо в основании фундаментов сооружений. В случае промерзания грунтового массива на значительную глубину, его последующее оттаивание естественным образом может привести к образованию массивов нерастепленного, льдистого грунта, наличие которого в основании сооружений недопустимо, поскольку приведет к неравномерным осадкам фундаментов.

Профильная модель фильтрации и теплопереноса участка разработки котлована будущего промышленного объекта в Якутии создана в программном комплексе DHI FEFLOW 7.5. Для расчета промерзания грунта используется модуль FreezeThaw75 [2], расширяющий возможности FEFLOW [4].

Целью данной работы является оценка глубины сезонного промерзания-оттаивания, величин притоков в котлован ГТС, влияния промерзания на величину притока, а также расчет гидродинамического распределения напоров на изучаемой территории.

Калибровочные расчеты проводились на 5 моделях, соответствующих 5 скважинам, для которых имеется достаточное количество замеров температурного режима по глубине от времени и наблюдается стабилизация температуры с глубиной (рис.1 а-д). Длительность замеров около года. Калибровка заключалась в проведении серии прямых расчетов, на основе которых определялось соответствие расчетных температур с измеренными, полученными по данным режимных наблюдений. Расчеты производились в нестационарной постановке на одномерных моделях теплопереноса с вертикальной дискретизацией.

Калибруемыми параметрами были коэффициент теплопроводности λ [Вт/(м*С)], объемная теплоемкость С [МДж/($м^3$*С)] и коэффициенты теплообмена α [Вт/($м^2$*С)] для холодного и теплого периодов.

Калибровка выполнялась при помощи скрипта, реализующего оптимизационный процесс. Пошаговое представление алгоритма показано на рис. 1е.

В качестве поисковой оптимизационной процедуры был алгоритм Нельдера-Мида, основанный на симплекс-методе [3]. Недостатки этого алгоритма в том, что он

может останавливаться на локальных минимумах. Но на проведенных авторами многократных расчётах оптимизационный метод Нельдера-Мида выдавал на выходе близкие или практически единые оптимальные значения параметров.

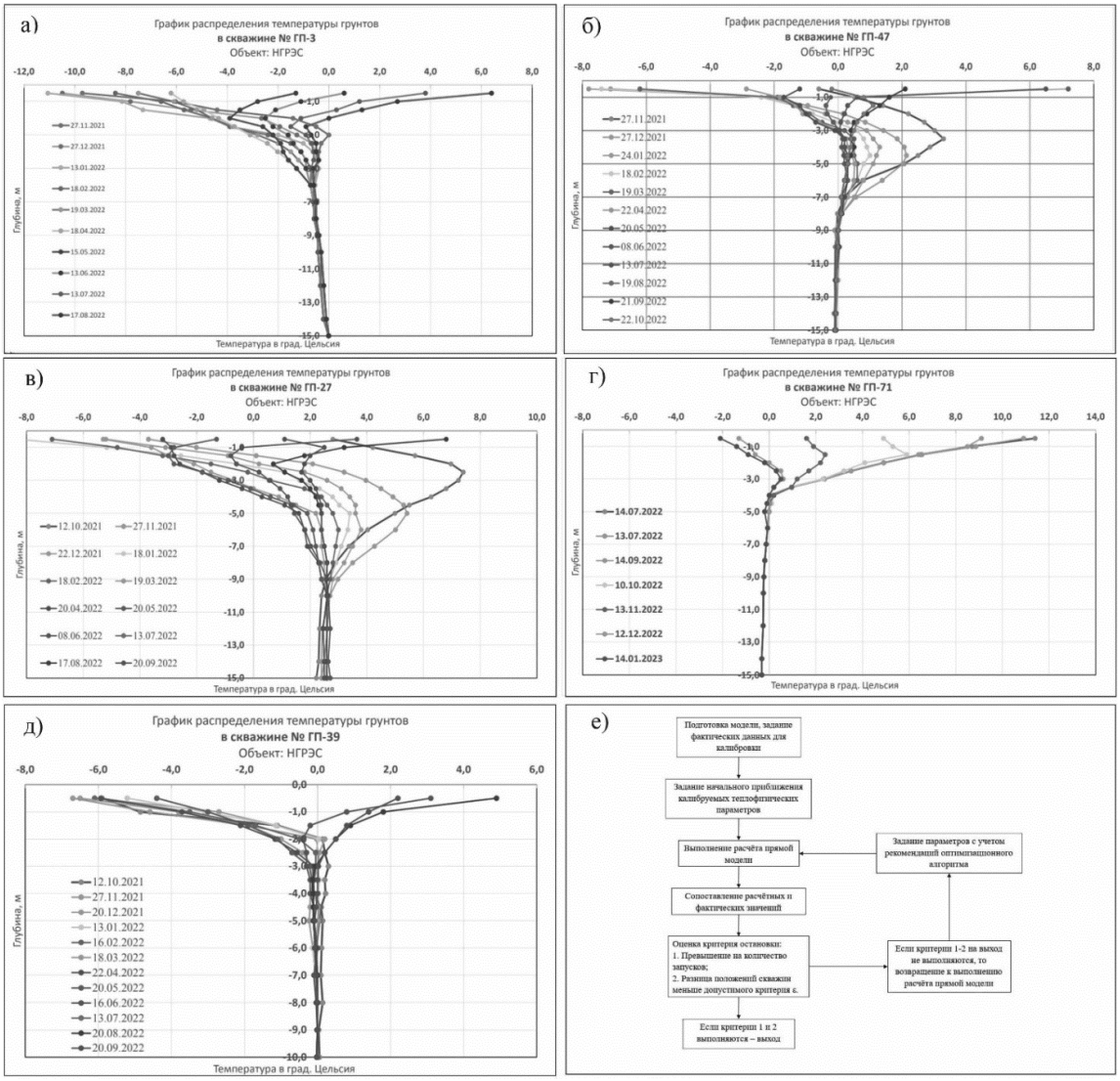


Рис. 1. Графики распределения температур грунтов в скважинах и блок-схема работы алгоритма оптимизационной процедуры

При калибровке в ряде скважин есть отличия более чем на 1 градус по верхним интервалам глубин (до 2-х метров). Для больших глубин отмечается меньшее отклонение и в интервале нулевых амплитуд при калибровке, и по фактическим данным различия не превышают 0.1-0.2 градуса.

Величина коэффициента теплопроводности изменяется в пределах от 1,02 до 2,88 Вт/(м*С), среднее значение составляет 1,96 Вт/(м*С). Значение объемной теплоемкости по результатам калибровки варьируется от 0,83 до 3 МДж/($м^3$*С), со средним значением 2,52 МДж/($м^3$*С).

Коэффициент теплообмена для теплого периода изменяется в пределах от 0,93 до 28,96 Вт/($м^2$*С), среднее значение – 13,13 Вт/($м^2$*С). Для холодного периода величина коэффициента теплообмена изменяется в пределах от 1,41 до 11 Вт/($м^2$*С), при этом среднее значение составляет 4,7 Вт/($м^2$*С).

Полученные данные были использованы для расчетов на профильной модели фильтрации в строительный котлован с учетом теплопереноса и промерзания.

Модель имеет следующие размеры – по вертикали 120 м и 630 м по горизонтали. Расчетная область разбита на 15301 элемент и 8018 узлов.

Граничные условия 1-го рода для расположенных на участке водоемов пресной воды задавались с абсолютными отметками 797,5м и 809 м, соответственно. В котловане задавался водоотлив с условием высачивания на его дно. Фильтрационные свойства приведены в табл. 1 и на рис. 2а.

Таблица 1. Фильтрационные параметры, задаваемые на модели

Номер ИГЭ	Описание	Коэффициент фильтрации, м/сут
1	Дресвяно-щебнистый грунт	2,1
2	Торф	2
3	Супесь	0,36
6	Супесь	0,2
14	Сапролит гранитный	0,5
15	Рухляк гранитный	63,5

Пористость принималась равной 0.3 для всей модели.

На верхней границе модели задавалось ГУ 3 рода для теплопереноса, что позволяет учитывать влияние ветра, снега, солнечной радиации и других факторов. Коэффициенты теплообмена подбирались по калибровке. Температура воздуха корректировалась с учетом влияния солнечной радиации.

Временной период расчета соответствует реальному с 10.2021 по 10.2022 (рис. 2б), данные по среднесуточным температурам взяты с ближайшего метеопоста. В расчете задавался естественный ход температур.

Для аналитического расчета глубины промерзания грунтов была использована формула Кудрявцева [1]. Глубина сезонного промерзания получилась равной 3,2 м.

На начальном этапе принимается, что котлован не промерзлый (рис. 2в), приток в котлован в этот момент равен 119 м^3/сут на 1 пог. м.

Через 60 суток после вскрытия котлована наибольшая глубина промерзания составляет 1,5 м, приток в котлован равен 90 м^3/сут на 1 пог. м.

Через 120 суток после вскрытия котлована наибольшая глубина промерзания составляет 2,6 м (рис. 2г), приток в котлован равен 86 м^3/сут на 1 пог. м. Минимальное значение притока в котлован составляет 82 м^3/сут на 1 пог. м и наблюдается на 100 сутки, что связано с перемерзанием высокопроводящей зоны (ИГЭ-15), вскрытой котлованом.

Через 150 суток после вскрытия котлована достигается максимальная глубина его промерзания – 3 м, которая сохраняется до наступления 180-ых суток, после чего происходит её сокращение. Приток в котлован на 150-ые сутки равен 89 м^3/сут на 1 пог. м, а на 180-ые сутки – 92 м^3/сут на 1 пог. м. Увеличение величины притока связано с оттаиванием ИГЭ-15 у поверхности.

При наступлении 240-ых суток поверхность дна котлована полностью растеплена (рис. 2д), приток воды в котлован составляет 119 м^3/сут на 1 пог. м. Остались промороженные участки на глубине (т. н. перелетки).

По истечении 150 суток (300 сутки расчёта модели) после наступления максимальной мощности глубины промерзания грунта происходит полное оттаивание грунта, наличие перелетков не наблюдается.

Приток в котлован за этот период повышается в пределах от 82 до 119 м^3/сут на 1 пог. м по мере оттаивания грунтов основания (рис. 2е).

В дополнение были рассмотрены два варианта искусственного растепления котлована – при помощи электрозондов и закачки солевого раствора.

В первом варианте расчета каждый электрозонд имеет мощность 0,22 кВт и длину 3 м, общее количество зондов в пределах котлована составляет 85 штук. Прогрев грунта производится с самого начала его вскрытия (0 суток на модели).

При использовании электрозондов практически не происходит промерзания грунтов котлована. Между электрозондами возможно формирование наледей мощностью до 30 см. Поступающий в котлован приток постоянен и равен 119 м^3/сут на 1 пог. м.

В случае растепления грунтов закачкой солевого раствора минерализация последнего принималась равной 5 г/л. Расход закачиваемой воды для 8 закачных скважин составил 40 м^3/сут. Ежедневный расход соли составляет 200 кг. Закачка раствора осуществляется на глубину 6,5-7 м. При таком варианте максимальная глубина промерзания на небольших локальных участках котлована составляет 1.5 м. Также наблюдаются увеличенные значения притока воды в котлован – от 137 до 144 м^3/сут на 1 пог. м.

Финансовые затраты на использование электрозондов составляют при стоимости 1 кВт/ч 5,94 рубля – 2700 рублей в сутки без учета стоимости аренды оборудования. При закачке солевого раствора стоимостью 9000 рублей за тонну затраты в сутки составляют около 1800 рублей без учета стоимости оборудования и капитальных затрат.

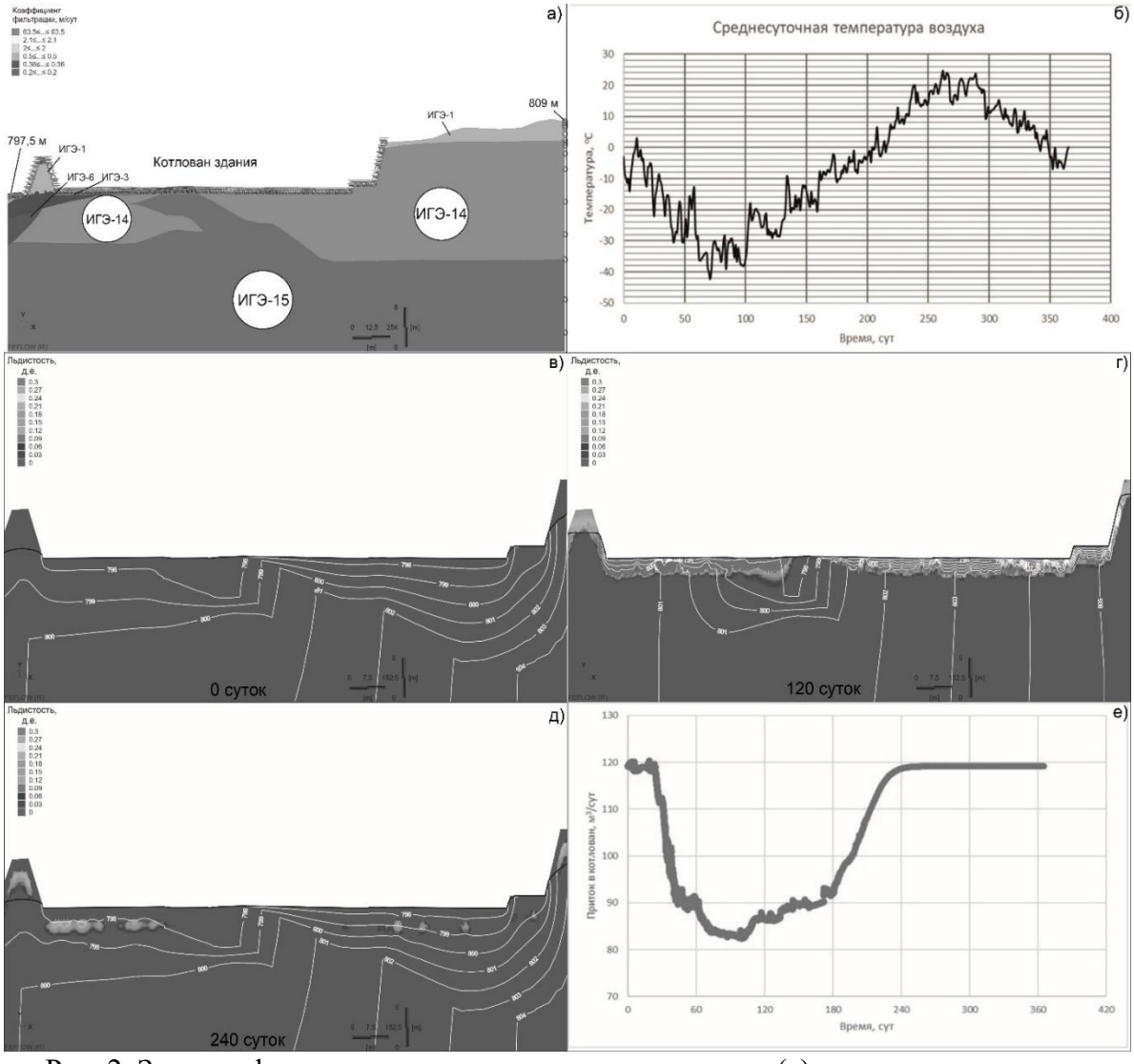


Рис. 2. Задание фильтрационных параметров на модели (а), ход среднесуточных температур воздуха (б), распределение гидроизогипс и областей мерзлого грунта на различные периоды расчета (в) 0 суток, г) 120 суток, д) 240 суток) и изменение величины притока в котлован во времени (е)

Таким образом, по мере промерзания дна котлована уменьшается приток воды. Под дном котлована могут оставаться промороженные участки на глубине, что может отрицательно сказаться на строительстве и эксплуатации промышленных объектов. Финансовые затраты на искусственное растепление электрозондами или закачкой солевого раствора составляют 2700 руб./сутки и 1800 руб/сутки, соответственно, без учета стоимости оборудования.

Список литературы

1. В.А. Кудрявцев Общее мерзлотоведение (геокриология) [текст]: учебник / В.А. Кудрявцев [и др.]; под ред. В.А. Кудрявцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 464 с.

2. Расторгуев, И.А. Модуль THAWFROST для расчёта тепло-массо-переноса в условиях мерзлоты [текст] / Расторгуев И.А., Литвинова И.В., Иост Н.А. [и др.] В сборнике: Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования. труды Всероссийской научной конференции с международным участием. - Москва, 2023. - С. 244-249.

3. Gao, F. Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters / F. Gao, L. Han. // Computational Optimization and Applications. - 2012. - №51. - PP. 259-277.

4. Diersch, H.-J.G. FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media / H.-J.G. Diersch - Springer Science& Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013. PP. 996.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ВОД НА ХОЛБОЛЬДЖИНСКОМ УГОЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ (ГУСИНООЗЕРСКОЕ БУРОУГОЛЬНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ)

Новокрещенных Н.П.[1], Плюснин А.М.[1]
[1]Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, nataliaborisova9696@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрено формирование загрязнения воздушной среды над вскрышными породами и горными выработками Холбольджинского угольного разреза. Показано, что над отходами добычи угля формируется ореол загрязнения атмосферы химическими элементами, относящимися к первой и второй группе токсичности. Концентрация ртути, бериллия, кадмия, свинца в конденсационных водах в несколько раз превышает предельно допустимые концентрации, установленные для вод рыбохозяйственного назначения. Из толщи горных пород вместе с парами воды в атмосферу попадает фосфор, марганец, медь, цинк, алюминий, железо, никель, молибден. Концентрация этих химических элементов в конденсационных водах превышает предельно допустимые концентрации, установленные для вод рыбохозяйственного назначения в десятки и сотни раз. Формирующийся над отходами добычи угля ореол загрязнения атмосферы представляет опасность для водных объектов, растительности, животных и населения проживающего на этой территории.

Ключевые слова: *конденсат, угольный разрез, отходы добычи, микроэлементы, загрязнение атмосферы.*

Abstract. The article examines the formation of air pollution over overburden rocks and mine workings of the Kholboldzhinsky coal mine. It has been shown that a halo of atmospheric pollution with chemical elements belonging to the first and second toxicity groups is formed over coal mining waste. The concentration of mercury, beryllium, cadmium, and lead in condensation waters is several times higher than the maximum permissible concentrations established for fishery waters. From the rock mass, phosphorus, manganese, copper, zinc, aluminum, iron, nickel, and molybdenum enter the atmosphere along with water vapor. The concentration of these chemical elements in condensation waters exceeds the maximum permissible concentrations established for fishery waters by tens and hundreds of times. The halo of air pollution that forms over coal mining waste poses a danger to water bodies, vegetation, animals and the population living in this territory.

Key words: *condensate, coal mine, mining waste, microelements, air pollution*

Введение. Холбольджинский угольный разрез входит в группу Гусиноозерского буроугольного месторождения в Западном Забайкалье, располагающегося на юго-западном замыкании Гусино-Удинской депрессии, на площадях Гусиноозерской и Загустайской котловин, которые разделены небольшим поднятием. Территория разреза представляет собой холмистую местность, постепенно повышающуюся от озера к горным массивам с карьерными выемками глубиной до 125 м и породными отвалами высотой до 50 м.

Основным поверхностным водоемом, важным в хозяйственном отношении, в зоне техногенного влияния является оз. Гусиное. Протяженность береговой линии озера, вдоль которой в водоохранной зоне размещены объекты разреза "Холбольджинский" (участки горных работ с внешними отвалами и подъездной железнодорожный путь), составляет 20 км. На протяжении 4,5 км в прибрежной защитной полосе или на площади, непосредственно примыкающей к ней, расположены отвалы Холбольджинского участка и промплощадка разреза. Опасность этого техногенного объекта состоит в том, что за счет выбросов жидких и твердых аэрозолей от мест складирования вскрышных пород формируется техногенный ореол загрязнения.

Физико-географическая характеристика. Климат района резко континентальный, отличающийся относительной суровостью и малым количеством выпадающих осадков. Общее количество годовых осадков от 230 до 380 мм, из которых наибольшее количество выпадает в июле - августе. Суточное количество осадков иногда достигает 42,9 мм. Толщина снегового покрова не превышает 80 мм. Весенние паводки в пределах разреза почти отсутствуют. Явлений многолетней мерзлоты в районе разреза не отмечено. Глубина сезонного промерзания по данным инженерно-геологических изысканий 2,5–3,5 м.

Геологическое строение. В геологическом строении района принимают участие интрузивные породы кристаллического фундамента, вулканогенные и осадочные образования мезозойской впадины и рыхлые кайнозойские отложения.

Гусиноозерский грабен представляет собой континентальный межгорный прогиб, развившийся по крупным прибортовым разломам домезозойского заложения. Угленосные отложения залегают в ядре этого прогиба пологонаклонно, с общим главным падением на восток-юго-восток, образуя моноклиналь северо-северо-восточного простирания. Моноклиналь образовалась в результате последовательной миграции оси прогиба от запад-северо-западного к восток-юго-восточному борту с максимумом прогиба у последнего. Вся центральная часть Гусиноозерского угольного месторождения особенно его юго-восточный борт, разбита серией нарушений типа сбросов и взбросов.

Угольные пласты, в основном, залегают в селенгинской свите. Свита представлена пресноводно-континентальными отложениями, которые слагают всю центральную часть впадины. Геологический разрез свиты представляет собой чередование песчаников и алевролитов, на которых залегают пласты углистых аргиллитов и бурых углей.

Петрографический состав пород однообразен. Алевролиты и песчаники различаются, как правило, лишь гранулометрически. Состав кластической части представлен кислыми плагиоклазами и калиевым полевым шпатом (25-40%), кварцем (10-30%), биотитом и мусковитом (от 5-8% до 25%), углистым веществом (1-10%). Кроме того, иногда присутствуют обломки эффузивов, метаморфических сланцев и гранитов. Цемент по составу глинистый и глинисто-слюдистый, по типу базальный или пленочно-поровый. В составе селенгинской свиты в Гусиноозерской впадине насчитывается до 35 пластов угля, из которых 16-18 пластов удовлетворяют промышленным кондициям. Угли относятся к разряду высокозрелых бурых гумусовых, умеренной и повышенной зольности.

Второй структурой, с которой связаны пласты угля, является холбольджинская свита, локализованная в пределах одноименного участка в юго-восточном борту Гусиноозерской впадины. Отложения согласно лежат на подстилающих породах селенгинской свиты. В разрезе преобладают светло-серые разнозернистые косослоистые кварц-полевошпатовые песчаники, которые содержат прослои (до 20 м) алевролитов, аргиллитов и пласты бурых углей. Здесь вскрыто и разведано 20 угольных пластов мощностью от 2-3 до 30-53м. Общая мощность свиты до 1000–1200 м (Скобло, 1978, 1996).

Кайнозойские рыхлые образования представлены пролювиально-делювиальными отложениями неоплейстоцена, аллювиально-пролювиальными отложениями неоплейстоцен-голоцена, аллювиальными и аллювиально-озерными отложениями голоцена [3].

Методы исследования. Конденсационные воды опробованы в пределах вскрышных пород и промплощадки. Для исследования химического состава воды, испаряющейся с поверхности пород, использована методика конденсирования ее паров на поверхности полиэтилена. Для этого была изготовлена специальная установка. В ее состав входит корпус, состоящий из четырех гибких пластиковых пластин, герметично соединенных между собой в замкнутый контур, посредством резьбовых соединений, из неметаллических материалов. На корпус сверху натягивается пленочный прозрачный водонепроницаемый материал и фиксируется резиновым жгутом. В центр на пленочный материал помещается груз массой 200–300 г. Под пленкой устанавливается контейнер для сбора конденсата. Контейнер находится под устанавливаемым грузом, но не касается пленочного материала. Контейнер изготовлен из пластика в виде емкости на ножках. Ножки необходимы для того, чтобы контейнер не перекрывал поверхность грунта, с которой осуществляется сбор конденсата. Площадь поверхности, с которой производится сбор конденсата составляет 1 $м^2$.

Сборники конденсата устанавливались в точке наблюдения вечером и снимались утром. Выбранный режим отбора проб был связан с тем, что в районе исследований климат характеризуется резким изменением температуры в течение суток. В летний период разница температуры достигает двадцати и более градусов.

Пески за день прогреваются, заключенная в них вода начинает интенсивно испаряться, но сконденсировать ее сложно, для этого необходимо использовать холодильники. Ночью воздух над песками быстро охлаждается, поэтому испаряющаяся из песков влага хорошо конденсируется на внутренней поверхности полиэтиленовой пленки. Образующиеся капли стекают в контейнер, который расположен под пленкой. Накопившийся в контейнере конденсат сливался в пластиковую посуду и готовился для проведения анализов.

Пробы конденсата фильтровалась через мембранный фильтр с размером пор 0.45 мкм и готовилась для проведения химического анализа. Химический состав вод проанализирован методом индуктивно связанной плазмы [2].

Полученные результаты и обсуждение. В результате отработки территории Холбольджинского угольного разреза (с 1978 по 2000 гг.), осталась нерекультивированной площадь, где более 400 га занимают отвалы вскрышных пород и сформированы техногенные водоемы [3]. Для отбора проб конденсационных вод было установлено 10 установок. В 1 точке отобрать конденсат не удалось (Рис. 1).

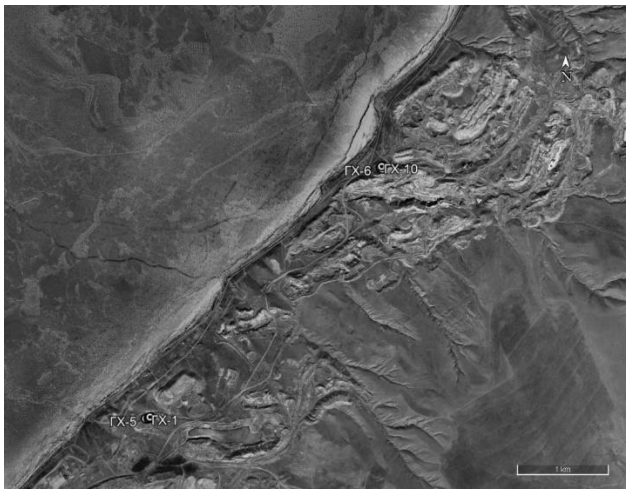


Рис. 1. Схема опробования отходов добычи Холбольджинского угольного разреза.

По химическому составу конденсационные воды имеют минерализацию от 53 до 280 мг/л. Выше предельно-допустимых концентраций, установленных для водоемов рыбохозяйственного назначения, во всех пробах обнаруживаются фосфор, марганец, медь, цинк, ртуть, аллюминий [4]. Концентрации этих элементов достигают сотен мкг/л. В южной части разреза, в районе возможного влияния техногенного водоема на грунтовые воды, выявлено загрязнение бериллием, железом, никелем, молибденом, в единичных пробах кадмием и свинцом (табл. 1) [1].

Таблица 1. Микроэлементный состав конденсационных вод на Холбольджинском угольном разрезе, мкг/дм^3

Эле-мент	ПДК	Номер точки отбора								
		ГХ-2	ГХ-3	ГХ-4	ГХ-5	ГХ-6	ГХ-7	ГХ-8	ГХ-9	ГХ-10
Li	80	5.7	4	4.6	3.9	0.65	0.33	0.66	1.11	0.44
Be	0.3	0,72	0,27	0,36	0,15	0,02	0,007	0,021	0,068	0,005
B	100	14,8	3,3	9,2	9,4	2,4	4	3	2	4,1
Al	40	740	340	460	230	49	21	31	75	17,7
P	50	420	53	250	136	101	73	102	53	59
Ti	60	21	4,8	15,4	8,7	0,99	1,07	1,5	1,13	0,83
V	1	1,46	0,27	0,79	0,48	0,151	0,144	0,2	0,131	0,161
Cr	70	10,6	7,4	9,3	6,5	1,18	0,99	1,55	1,14	1,04
Mn	10	400	400	260	176	32	11	34	96	19
Fe	100	900	270	930	410	45	40	53	59	39
Co	10	4,6	4,1	3,3	2,6	0,52	0,22	0,54	0,94	0,27
Ni	10	17,4	14,3	17,5	12,4	1,84	1,46	1,9	1,89	1,1
Cu	1.0	110	91	188	220	17,8	4,8	12,6	19	13,2
Zn	10	370	360	330	190	29	26	25	51	20
As	50	1.27	0.34	1.35	0.49	0.5	0.65	0.44	0.2	0.38
Br	1350	37	19	35	24	4,8	5,1	4,7	4	3,6
Rb	100	16,4	8,6	15,4	11,5	1,6	1,43	2,2	1,21	1,42
Sr	400	220	42	93	129	22	21	43	23	37
Mo	1,0	1.33	1.35	4	3.7	0.59	0.17	0.21	0.29	0.45
Ag		0,19	0,038	0,14	0,038	0,017	0,02	0,021	0,023	0,016
Cd	5	3,3	5,3	3,3	1,85	0,4	0,21	0,2	0,84	0,21
Sn	112	14,6	0,89	5,2	1,35	0,71	0,43	0,53	0,19	0,22
Cs	1000	0,37	1,07	0,96	0,66	0,061	0,045	0,042	0,096	0,046
Ba	740	12,5	2,5	5,7	4,2	1,51	1,28	1,81	2,5	1,9
W	0.8	1,75	0,7	2,1	1,78	0,19	0,15	0,19	0,21	0,19
Hg	0.01	0,17	0,07	0,14	0,12	0,07	<0,03	<0,03	0,09	0,06
Pb	6.0	15,9	2,8	13,6	3,4	1,34	0,99	2,3	1,12	0,022

Наиболее интенсивное загрязнение токсичными элементами выявлено в районе возможного влияния техногенного водоема на грунтовые воды (пробы ГХ-2 – ГХ-5). Здесь содержание марганца превышает ПДК в 17-40 раз, меди – 11-22 раза, цинка – 19-37 раз.

Заключение. После разработки Холбольджинского угольного разреза осталась техногенно-нарушенная территория с отвалами вскрышных пород и горными выработками, где из толщи горных пород (углей, аргиллитов, песков и т.д), слагающих территорию разреза, к поверхности вместе с парами воды перемещаются токсичные химические элементы. Фактором, определяющим миграцию токсичных элементов к поверхности, является близкое залегание грунтовых вод, содержащих в своем составе растворенные продукты окислительного разложения угля и вмещающих угольные пласты горных пород. По капиллярам происходит подъем минерализованных вод к поверхности и выделение жидких аэрозолей в атмосферу. Вместе с парами воды в атмосферу в больших количествах поступают такие высоко токсичные элементы, как марганец, медь, цинк, ртуть.

Загрязнение атмосферы токсичными элементами оказывает негативное влияние не только на окружающую среду разреза, но также они могут переноситься воздушными потоками за пределы территории и оказывать воздействие на озеро Гусиное и проживающего на этой территории населения.

Работа выполнена в рамках проекта АААА-А21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока и проекта РНФ-Бурятия №313.

Список литературы

1. Новокрещенных Н.П. Влияние отвалов Холбольджинского угольного разреза на состояние подземных вод // Эволюция и современное состояние ландшафтов и биоты Внутренней Азии: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. - Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2021. - С. 86-89/

2. Плюснин А. М., Воронина Ю. С., Украинцев А. В., Чернявский М. К., Перязева Е. Г., Чебыкин Е. П. Загрязнение атмосферы от хранилищ отходов добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд. Геохимия, 2023, том 68, № 12, с. 1295–1311. DOI: 10.31857/S0016752523110092.

3.Плюснин А.М., Чернявский М.К. Технический отчет «Ликвидации последствий отрицательного воздействия добычи угля на окружающую среду Холбольджинского угольного разреза – рекультивация нарушенных земель, защита поверхностных и подземных вод» Гидрогеологические изыскания – Улан-Удэ, 2014. – 93 с.

4. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 "Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения" (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 N 45203)/

ОПЫТ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА

Озерский А.Ю.[1], Иванова Т.П.[2]
[1] АО "Красноярская горно-геологическая компания"
[2] Департамент по недропользованию по Центрально-Сибирскому округу

Аннотация. Рассматривается история оценки и подсчета запасов дренажных вод на месторождениях твердых полезных ископаемых. Приводится обоснование использования дренажных вод для гидравлической разработки россыпных месторождений золота, а также дается прогноз роста добычи золота из россыпей. Описан опыт подсчета запасов дренажных вод на двух месторождениях золота в Центральной Сибири.

***Ключевые слова**: запасы подземных вод, гидрогеология, дренажные воды, месторождения россыпного золота, Центральная Сибирь*

Abstract. The history of assessment and estimation of drainage water reserves in solid mineral deposits is considered. The rationale of the drainage water using for the hydraulic mining of alluvial gold deposits is given, and a forecast for the growth of gold production from alluvial deposits is shown. The experience of the estimation of drainage water reserves at two gold deposits in Central Siberia is described.

***Key words.** groundwater reserves, hydrogeology, drainage waters, alluvial gold deposits, Central Siberia*

Введение. Оценка и подсчет запасов дренажных вод месторождений твердых полезных ископаемых (ТПИ) имеют сравнительно непродолжительную историю. На этапе формирования теории и практики отечественной гидрогеологии и вплоть до 1980-х годов дренажные воды традиционно рассматривались в качестве сточных вод горнодобывающих предприятий. Расчет водопритоков в горные выработки проводился исключительно с целью обоснования выбора технических средств их осушения [3, 4]. Без каких-либо существенных изменений подобная точка зрения на дренажные воды продолжает превалировать и в наши дни [2].

Однако в связи с осушением крупных карьеров все чаще стали возникать проблемы, связанные с нехваткой водных ресурсов для водоснабжения, а также вызванные негативным влиянием крупного водопонижения на окружающую среду. Одними из первых в нашей стране на эти проблемы и на возможность использования дренажных вод для водоснабжения обратили внимание в общенаучном плане В. А. Мироненко, В. Г. Румынин и др. [7], основываясь на результатах исследований в районе Курской магнитной аномалии (КМА).

Впервые нормативные требования к оценке запасов дренажных вод были сформулированы в 1984 году в «Инструкции по изучению и прогнозированию гидрогеологических условий угольных месторождений при геологоразведочных работах», разработанной коллективом ученых «Всесоюзного научно-исследовательского геологоразведочного института угольных месторождений» («ВНИГРИуголь») под руководством и с непосредственным участием Я. И. Зарубинского. В ней была предусмотрена возможность использования шахтных и карьерных вод угольных месторождений и подсчета их эксплуатационных запасов «*в низких категориях (C_2 и C_1)*» [5].

В 1986 году ГКЗ СССР выпустила «Требования к изучению и подсчету эксплуатационных запасов подземных вод, участвующих в обводнении месторождений твердых полезных ископаемых» [10]. В этом документе было подчеркнуто, что «*подземные воды на месторождениях твердых полезных ископаемых… относятся к попутным полезным ископаемым*» и они должны рассматриваться как «*самостоятельные месторождения подземных вод, пространственно совмещенные с месторождениями твердых полезных ископаемых, в обводнении которых они участвуют*». В «Требованиях…» были сформулированы условия отнесения месторождений дренажных вод к группам сложности, определены условия, необходимые

для подсчета запасов, а также было указано, что запасы подземных дренажных вод могут представляться на государственную экспертизу либо совместно с основным полезным ископаемым, либо раздельно от него специальным отчетом.

С позиций требований ГКЗ СССР к возможности использования дренажных вод в 1987 году подошли профессор Н. И. Плотников и И. И. Рогинец, работавший главным гидрогеологом Минцветмета [9]. Исследователи указали, что эксплуатационные запасы подземных вод следует оценивать и учитывать по результатам проведенных на месторождении разведочных гидрогеологических работ, а также по данным эксплуатации подземных вод, то есть карьерного водоотлива, почеркнув при этом необходимость утверждения запасов в ГКЗ (ТКЗ).

Важным шагом для изучения и подсчета запасов дренажных вод было составление, экспертиза (1991 г.) и издание (1992 г.) «Методических рекомендаций по оценке эксплуатационных запасов подземных дренажных вод месторождений твердых полезных ископаемых» [6]. Методические рекомендации были разработаны группой ученых ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО) под научным руководством профессора Л. С. Язвина. Этот документ был одобрен начальником отдела геоэкологии и гидрогеологии Мингео СССР К. И. Сычевым, согласован с ГКЗ СССР и является действующим до настоящего времени.

Если гидрогеологическая расчетная часть «Методических рекомендаций…», составленная Л. С. Язвиным и основанная на законах теории фильтрации, является актуальной в наши дни и может использоваться для расчетов, то организационно-техническая часть документа совершенно не соответствует современным законодательным и подзаконным актам. Это относится к категоризации запасов по изученности, по группам сложности, срокам подсчета запасов, расчетам потребности и другим условиям.

В п. 12 «Требований к составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по подсчету запасов твердых полезных ископаемых», утвержденных приказом Минприроды России от 23.05.2011 г. № 378 к гидрогеологическим материалам записано условие «*достаточности для составления проекта разработки месторождения полезных ископаемых*». К сожалению, «Методические рекомендации…» [6] за прошедшие три десятилетия устарели и совершенно не соответствуют современным требованиям проектирования разработки месторождений ТПИ.

Тем не менее, «Методические рекомендации…» [6] в наши дни используются в тех случаях, когда возникает необходимость технологического использования дренажных вод. Как правило, подсчеты запасов дренажных вод связаны с крупными месторождениями ТПИ в коренных породах, характеризующихся большими величинами притока дренажных вод. При разработке небольших, в том числе россыпных, месторождений необходимость в использовании дренажных вод ранее не возникала.

Обоснование использования дренажных вод для разработки россыпных месторождений. Запасы дренажных вод для россыпных месторождений в предшествующие годы никогда не подсчитывались. Более того, в прежние годы изучению гидрогеологических условий россыпных месторождений золота не уделялось достаточного внимания.

Россыпные месторождения распространены преимущественно в речных долинах, поэтому ресурсы воды, необходимые для гидродобычи, обеспечивались речным стоком, величина которого, в большинстве случаев, удовлетворяла запросам технологии. Использование речного стока для гидродобычи золота по меньшей мере до начала 2000-х годов или одобрялось органами государственной власти, или не встречало с их стороны существенных возражений. Кроме этого, аллювиальный водоносный горизонт, в теле и в основании которого залегает полезное ископаемое, при добыче золота полностью

перерабатывается, поэтому знания о его гидрогеологических условиях ранее априорно признавали ненужными.

Однако последние годы характеризуются ужесточением требований к недропользователям со стороны государства, как в отношении использования речного стока, так и в отношении сбросов в водные объекты. В такой ситуации дренажные воды, извлекаемые из карьеров по добыче россыпного золота, представляют разумную альтернативу использованию речных вод. Количество дренажных вод, откачиваемых из россыпных месторождений, а также их гидрохимические характеристики позволяют использовать их в технологических целях для гидродобычи золота или же для обогащения (промывки) песков. Подземные воды россыпных месторождений золота без сомнения являются попутным полезным ископаемым, которое возможно и необходимо использовать в рамках лицензии на добычу основного полезного ископаемого. Такой подход безусловно способствует охране поверхностных вод, а также уменьшает претензии со стороны природоохранных органов.

После принятия в 2016 году изменений в Закон «О недрах» и совершенствования «заявительного порядка» предоставления участков недр в пользование для целей геологического изучения количество выданных лицензий вида БП (на геологическое изучение) растет в геометрической прогрессии (рис.).

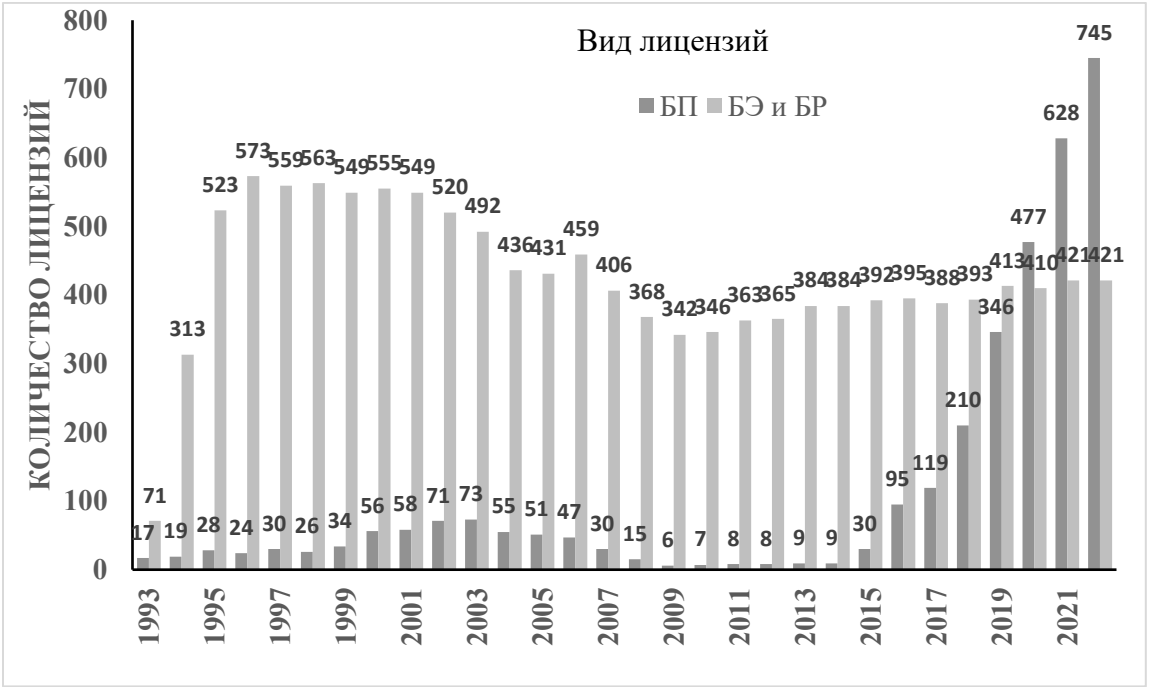


Рис. 1. Количество лицензий, выданных на россыпное золото в Центрально-Сибирском округе

Разумеется, не все огромное количество лицензий на геологическое изучение, выданных на поисково-оценочные работы на россыпное золото, приведет к открытию новых месторождений. Однако, их большое количество дает все основания прогнозировать увеличение числа новых перспективных участков недропользования и рост добычи золота из россыпей. Рост добычи золота из россыпей с неизбежностью столкнется с возрастанием нагрузки по поверхностные водные объекты, что способно вызвать своего рода «цепную реакцию» усиления природоохранных требований и ограничений водного законодательства, при которых использование поверхностных вод для разработки россыпей столкнется с нарастающими ограничениями регулирующих органов. Поэтому переход золотодобычи на применение дренажных вод является единственной альтернативой использованию речных вод.

В соответствии с Законом РФ «О недрах» технологическое водоснабжение добывающего предприятия на базе дренажных вод потребует подсчета и государственной экспертизы их запасов. В свою очередь возникает необходимость гидрогеологического изучения россыпных месторождений, причем не столько на площади самой золотоносной россыпи, сколько на участках формирования притоков в будущие карьеры. При этом преимущественно должны изучаться геофильтрационные параметры аллювиального горизонта, а также сопротивление донных отложений в руслах рек и руслоотводных каналов. Особенности изучения должны учитывать нестационарные условия фильтрации подземных вод к карьерам, так как в Сибири карьеры работают в летнюю половину года, а в течение второй (зимней) половины года происходит восполнение подземных вод. Разумеется, выполнение гидрогеологических исследований при геологическом изучении и разведке россыпей несколько повысит стоимость геологоразведочных работ, но, по экспертным оценкам, этот рост вряд ли превысит 10 %.

Опыт оценки запасов дренажных вод россыпных месторождений. В соответствии с изложенными принципами в АО "Красноярскгеология" в 2020-2022 гг. были выполнены гидрогеологические исследования на двух собственных лицензионных участках в составе геологической разведки основного полезного ископаемого. Участки расположены в различных физико-географических условиях, на расстоянии около 1000 км друг от друга. Первый участок, Верхнеудоронгский, находится в Заангарской части Енисейского кряжа. Второй участок, получивший название «Главстановская группа россыпей» расположен в низкогорье Кузнецкого Алатау (табл.). Обе россыпи сложены четвертичными аллювиальными гравийно-галечными отложениями с песчаным, а иногда – с алевропелитовым заполнителем. Речные долины обрамлены коренными метаморфическими образованиями высокой степени литификации, имеющими незначительную проницаемость.

Таблица. Основные гидрогеологические показатели двух месторождений россыпного золота

Показатели, единицы измерения	Участки работ	
	Верхнеудоронгский	Главстановский
Географическое положение	*Енисейский кряж*	*Кузнецкий Алатау*
Бассейн реки	*Ангара (Енисей)*	*Чулым (Обь)*
Основной водоток (река)	*Удоронга*	*Правая Сарала*
Средний расход реки на участке, $м^3/с$	*1,3*	*1,9*
Средняя мощность водоносного горизонта, м	*3,5*	*7,1*
Средний статический уровень, м	*0,4*	*1,9*
Средний коэффициент фильтрации, м/сут	*9,4*	*74,7*
Средняя водопроводимость, $м^2/сут$	*32,7*	*434,3*
Средняя минерализация, $мг/дм^3$	*123*	*90*
Химический тип подземных вод	*HCO_3–Fe,Ca*	*HCO_3–Mg,Ca*
Средний приток подземных вод в карьеры, $м^3/сут$ ($м^3/час$)	*4080 (170)*	*4440 (185)*
Утвержденные запасы дренажных вод по категории C_1, $м^3/сут$	*2241*	*4300*

Гидрогеологические исследования проводились при геологической разведке россыпного золота и включали в себя стандартный набор методов, используемых на месторождениях ТПИ. В состав работ вошли: бурение гидрогеологических скважин,

опытно-фильтрационные работы, гидрометрия на водотоках и расчеты их основных гидрологических характеристик, гидрохимические опробование, лабораторные работы и камеральная обработка материалов.

Проведенные гидрогеологические работы позволили определить основные гидрогеологические параметры и, используя их, выполнить гидрогеологические расчеты водопритоков и запасов дренажных вод. В итоге Территориальной комиссией по запасам полезных ископаемых Центрсибнедра (ТКЗ) были одновременно рассмотрены и утверждены запасы основного полезного ископаемого, а также запасы участков технических подземных вод для технологического водоснабжения по категории C_1. Также Комиссией было рекомендовано в проекте разработки месторождений золота предусмотреть опытно-промышленную разработку (ОПР) дренажных подземных вод.

Подсчеты величин водопритоков и запасов дренажных подземных вод показали, что гидрогеологические условия обоих месторождений золота и участков технических подземных вод являются простыми. Это подтверждается несложными горно-геологическими условиями месторождений золота, а также величинами водопритоков, не превышающими 200 $м^3$/час, отсутствием необходимости в специальных осушительных мероприятиях [1]. С осушением карьеров легко справляется внутрикарьерный водоотлив из зумпфов. Эти же обстоятельства определяют отнесение участков технических подземных вод к первой группе с простыми условиями [6].

При общем положительном результате государственной экспертизы при ее проведении возникли вопросы и проблемы [8], для разрешения которых необходима корректировка действующих «Методических рекомендаций…» [6] или разработка и принятие нового методического документа.

Список литературы

1. Временная инструкция по гидрогеологическому и инженерно-геологическому обслуживанию горно-эксплуатационных работ на месторождениях твердых полезных ископаемых [Текст]: утв. Мингео СССР 03.08.1960. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1960. – 57 с.

2. Инженерно-геологические, гидрогеологические и геоэкологические исследования при разведке и эксплуатации рудных месторождений (методические рекомендации) [Текст]: Рассмотрено и одобрено Управлением ресурсов подземных вод, геоэкологии и мониторинга геологической среды Министерства природных ресурсов Российской Федерации (протокол № 5 от 12 апреля 2002 г.). – М., РИЦ ВИМС, 2002. – 117 с.

3. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых [Текст] / редкол. К.-А.К. Вайтекунас, Г.Н. Кашковский, Ф.И. Лосев. – М.: Недра, 1986. – 171с.

4. Инструкция по изучению инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых при их разведке [Текст]: утв. Мингео СССР 09.04.1973 г. – М.: Недра, 1975. – 49 с.

5. Инструкция по изучению и прогнозированию гидрогеологических условий угольных месторождений при геологоразведочных работах [Текст]: утв. Минуглепром, Мингео, ГКЗ СССР в 1984 г. – Ростов-на-Дону, ВНИГРИуголь, 1985. – 137 с.

6. Методические рекомендации по оценке эксплуатационных запасов подземных дренажных вод месторождений твердых полезных ископаемых [Текст] / Составители Л. С. Язвин, Г. Н. Кашковский, М. В. Кочетков, Ф. И. Лосев : одобрены начальником отдела геоэкологии и гидрогеологии Мингео СССР К. И. Сычевым 24 января 1991 г. и согласованы с ГКЗ СССР. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1992. – 73 с.

7. Мироненко, В.А. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах (опыт гидрогеологических исследований) [Текст] / В.А. Мироненко, В.Г. Румынин, В.К. Учаев – М.: Недра, 1980. –320 с.

8. Озерский, А.Ю. Опыт и проблемы подсчета запасов дренажных вод для разработки россыпных месторождений золота [Текст] / А.Ю. Озерский, Т. П. Иванова, Н. А. Махнева // Геология и недропользование, № 6, 2022. – С. 52-61.

9. Плотников, Н.И. Гидрогеология рудных месторождений [Текст] / Н.И. Плотников, И.И. Рогинец. – М.: Недра, 1987. –287 с.

10. Требования к изучению и подсчету эксплуатационных запасов подземных вод, участвующих в обводнении месторождений твердых полезных ископаемых. [Текст]: утв. приказом ГКЗ СССР от 06 июня 1986 г.№ 20-орг. М.: ГКЗ СССР, 1986. – 6 с.

ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ И МЕНЯЮЩИЙСЯ КЛИМАТ: НАБЛЮДЕНИЯ, МОДЕЛИ, ПРОГНОЗЫ

Поздняков С.П.[1]
[1]*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии*

Аннотация. Рассмотрено современное состояние проблемы изменения климата и влияние этих изменений на поверхностные и подземные воды. Описан сценарный подход к прогнозам изменения климата в 21 веке на основе ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана. На опубликованных примерах показаны возможности и некоторые результаты использования климатических прогнозов в моделях, исследующих климатически-вызванные изменения подземных вод.
Ключевые слова. *Изменение климата, сценарии, подземные воды, инфильтрационное питание, моделирование, глобальные прогнозы.*

Annotation. The current state of the problem of climate change and the impact of these changes on surface and ground waters are considered. A scenario approach to climate change projections in the 21st century based on an ensemble of atmospheric and oceanic general circulation models is described. The published examples show the possibilities and some results of using climate projections in models investigating climate-induced groundwater changes.
Keywords. *Climate change, scenarios, groundwater, recharge, modeling, global projections*

Введение. За последние полвека исследования, связанные с наблюдаемыми климатическими изменениями, прошли путь от научной гипотезы возможного глобального влияния отепляющего эффекта за счет антропогенного выброса в индустриальную эпоху парниковых газов до разработки научно-практических мер по адаптации к этим изменениям в различных регионах и областях жизнедеятельности. Несомненно, что водный сектор в целом и прикладные и фундаментальные науки о воде непосредственно связаны с проблемой климатических изменений так как изменение климата представляет собой одну из наиболее серьезных угроз для доступных водных ресурсов [26]. Эта связь диктуется тем, что изменение радиационно-энергетического баланса не может не отражаться в кругообороте воды в природе, включая его континентальный гидрологический цикл.

Гидрогеология, исследующая подземную часть континентального круговорота воды вслед за гидрологией суши в течение последних десятилетий, выявляет эмпирические факты влияния климатических изменений на подповерхностную часть водного цикла и изменений ресурсов подземных вод. С другой стороны, гидрогеология совместно с геокриологией первыми среди наук геологического цикла столкнулись с необходимостью проведения научных исследований состояния наблюдаемых изменений и выполнения прогнозов эволюции подземной гидросферы, включая ее часть, находящуюся сегодня в многолетнемерзлом состоянии при тех или иных траекториях климатических изменений в 21 веке.

В последние годы в ведущих мировых журналах, затрагивающих проблему изменения климата и водных ресурсов, весьма заметно направление, которое условно можно отнести к глобальному (континентальному) масштабу обобщений. Рост числа таких публикаций начался, по-видимому, в прошлом десятилетии и ускорился в 20-е годы. Он связан с осмыслением и обобщением накопленных и опубликованных ранее фактов, фиксирующих связь между климатическими изменениями и водными ресурсами по наблюдениям для отдельных бассейнов и регионов. Кроме того, поскольку в настоящее время общедоступны сценарные глобальные прогнозы изменения климата в 21 веке, на их основе выполняются прогнозы различных масштабов изменения поверхностных и подземных вод.

В связи с вышеизложенным основная цель данной статьи состоит в описании методов и некоторых результатов анализа и прогноза влияния климатических изменений на подземные воды.

Изменение климата в доиндустриальную и индустриальную эпоху. В настоящее время в научном сообществе в целом сложился консенсус, что весь более, чем двухвековой период инструментальных наблюдений за приземной температурой воздуха условно можно разделить на две части – первая относительно стабильные колебания температуры и период с середины прошлого века, когда начал наблюдаться тренд на увеличение температуры. Продление этого графика назад сначала на 600 лет, а затем и до начала нашей эры с использованием данных палеоклиматических реконструкций подтвердило, что за весь этот период отсутствуют такие выраженные тренды, температуры, как за последние 50-70 лет. Такой характер изменения температур часто называют хоккейной клюшкой Манна в честь английского климатолога и первого автора статьи, в которой в 1998 году был опубликован этот график [18]. Несмотря на то, что метод и полученные результаты в статье подверглись критике, вышедшей за пределы чисто академических дискуссий, достоверность полученных в ней результатов в целом подтверждена и принята в научном климатологическом сообществе. Современный уточненный график клюшки Манна за последние 2000 лет, учитывающий, в частности и похолодание в средневековье можно найти, например в [21]. Этот график демонстрирует научный факт – к началу 21 века положительная аномалия средней глобальной температуры Земли по абсолютной величине больше наблюденных и реконструированных аномалий температур за последние 2000 лет, поэтому можно говорить о так называемом глобальном потеплении, развивающемся с середины прошлого века. Интерпретация этого факта современной климатологией называет основной механизм, вызывающий эту аномалию - дополнительную радиационную нагрузку поверхности земли, возникающую за счет так называемого парникового эффекта. Его суть – уменьшение в индустриальную эпоху прозрачности атмосферы в длинноволновом спектре к отраженному поверхностью земли коротковолнового солнечного излучения. А это уменьшение связывается с повышением концентрации в атмосфере парниковых газов, в первую очередь углекислого газа за счет его антропогенного выброса. Следует отметить, что несмотря на то, что данная интерпретация достаточно широко освещена и в научной и в популярной литературе, и она базируется на фактических наблюдениях о росте концентраций парниковых газов в атмосфере, их корреляции с ростом температур, изменении изотопного состава атмосферного углерода в сторону характерную для ископаемых углеводородов и ряда других фактов, эта антропогенная сущность наблюдаемого глобального потепления все еще находит достаточно большое количество критиков. Интересно, что среди представителей естественных наук эта критика часто приходит от геологов и геофизиков. Характерным примером такого несогласия с антропогенной концепцией изменения климата может быть выступления одного из наиболее известных не только своими геофизическими исследованиями магнитного поля российских геофизиков А.М. Городницкого, который весьма критически относится к самой ее идее [2]. Однако, научный разбор его тезисов со стороны специалиста по климату показывает, что они несостоятельны [4]. В целом же критика со стороны геологического сообщества антропогенного характера глобального потепления связана, по-видимому, с несоответствием геологического масштаба времени, в котором привыкли размышлять геологии и выявленным по наблюдениям временным масштабом глобального потепления. Именно поэтому в возражениях геологов чаще всего упоминаются различные климатические максимумы и минимумы, существовавшие на протяжении геологической истории, циклы оледенения в четвертичный период, циклы Миланковича и др, то есть события. имеющие характерные периоды от тысяч лет и гораздо более. Однако на интересующем сегодня человечество масштабе порядка ста лет эти

возражения не работают в том смысле, что не могу объяснить наблюдаемый ход температур за последние 50-70 лет. Поэтому в настоящее время в научном сообществе сложилось общее понимание, что в конце 20- начале 21 века происходят именно антропогенное потепление климата. Масштаб этого потепления оценивается к 2020 году в превышении глобальной температуры доиндустриального уровня на 1,7 ± 0,1 °C [19]. При этом важно, что в высоких широтах потепление идет почти в четыре раза быстрее, чем в среднем по континентам [23].

Наблюдаемые изменения речного стока. Для территории России обобщение проводимых в последние десятилетия исследований изменчивости речного стока в бассейнах, расположенных в различных природных условиях, показывают, что наблюдаемые и изменения климата во многих регионах существенно влияют на гидрологический цикл суши [1]. Учитывая, что для большей части территории России в формировании речного стока играет часть гидрологического цикла, связанного с динамикой снегового покрова, то повышение зимних температур воздуха напрямую влияет на внутригодовые изменения стока. Эти изменения в первую очередь связаны с наблюдаемыми трансформациями гидрографов рек, выражающихся в уменьшении абсолютных максимумов гидрографов половодья, увеличении минимального зимнего стока рек, возникновения мультипиковости гидрографов в холодный период года и др. В частности, для Европейской Территории России (ЕТР) выявлено нарушение гидрографов стока рек, начиная с 60-70 годов прошлого века [6,15]. При этом характер внутригодового режима стока рек ЕТР становится похожим на этот характер в Центральной и Западной Европе.

В высокоширотных северных бассейнах Сибири увеличение речного стока наблюдается с 1930-х годов [17, 22]. Так, например минимальный сток в бассейне реки Лена увеличился на 80 % за период с 1970 по 2005 г. [3]. Анализ стока крупных рек Сибири и Северной Америки [24] показал, что наблюдаемый рост зимнего стока для четырех крупнейших рек Северного Ледовитого океана превышает рост годового стока в среднем в 1.7 раза. В то время как речной сток в крупных речных бассейнах обычно имеет тенденцию к увеличению, в некоторых небольших бассейнах со спорадическим распространением мерзлых пород может наблюдаться снижение речного стока [12]. Это явление особенно заметно в верховьях рек. Эти данные подчеркивают сложность протекающих изменений речного стока в холодных регионах на формирование которого влияет не только изменение поверхностного гидрологического цикла, но и изменение тепловлагопереноса в сезонно-талом и сезонно-мерзлом слое, а также деградация многолетнемерзлых пород.

Изменение климата и реакция подземных вод. К настоящему времени опубликован ряд обзоров о влиянии климата на подземные воды с обобщением частных результатов, полученных для разных регионов мира. В частности, в обзоре [14] сделана попытка выявить, есть ли направленные изменения в наиболее простом с позиций и доступности данных наблюдений и в то время важным с позиций инфильтрационного водообмена с поверхностными водами показателе – среднегодовой глубины залегания уровня грунтовых вод. Проведённый в упомянутом обзоре анализ динамики уровней подземных вод с обобщением в мировом масштабе показал, что в XXI веке наблюдается в среднем снижение уровней грунтовых вод, причем это наиболее заметно в аридных регионах, где средняя скорость этого снижения может составлять более полуметра в год. В обзорах [16, 25] изменение инфильтрационного питания подземных вод рассматривается как критически важный показатель влияния изменения климата на подземные воды. Концептуально глобальный подход к оценке влияния изменения климата на подземные воды в мировом масштабе, предложен в [11]. В этой работе выделяются однонаправленные изменения, проявляющиеся только в изменении инфильтрационного питания, и двунаправленные - изменении как питания, так и разгрузки подземных вод, влиянием эвапотранспирации при близкой глубине их

залегания. При этом глобально в мире области двунаправленных изменений занимают порядка 46% общей площади территории суши. В обзоре [9] на основании мировой базы данных по оценке питания подземных вод [20], содержащей 5237 объектов на которых была произведена оценка питания подземных вод предложена следующая аппроксимация связи климатически-обусловленного коэффициента питания R с индексом сухости:

$$R = w / P = \alpha \left[1 - \frac{\ln\left(\varphi^{\beta} + 1\right)}{1 + \ln\left(\varphi^{\beta} + 1\right)} \right]; \varphi = E_p / P > 1 \quad (1)$$

Где w- среднегодовое питание, P – среднегодовые осадки, Ep – среднегодовая испаряемость по Пенману-Монтейну, α, β- эмпирические параметры.

При этом глобальные значения параметров оказались следующими α=0.72, β=15.11. Проведённый анализ чувствительности изменения коэффициента питания в зависимости (1) к изменению индекса сухости показал, что наиболее чувствительным является диапазон индекса сухости от единицы до двух, то есть в гумидной климатической зоне, что весьма важно для нашей страны.

Прогнозирование изменения климата в 21 века. Для выполнения прогнозов изменения климата в свою очередь используются модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО).Математически эти модели описываются уравнениями гидротермодинамики, в которые включена параметризация сложных природных процессов взаимодействия атмосфер и океана, атмосферы и суши такие как поглощение и отражение солнечного тепла; глобальный кругооборот воды в атмосфере, океане и на суше с учетом фазовых переходов; перенос примесей (парниковых газов) в атмосфере. Эти модели интенсивно развиваются с 80х годов прошлого века. В 21 веке происходит трансформация этих моделей в так называемые модели Земной системы, так как в них постепенно идет включение биогеохимического цикла и цикла углерода. Международное сотрудничество в области как эпигнозного так прогнозного и моделирования климата происходит под эгидой межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), которая разработала проект CMIP -Coupled Model Intercomparison Project, включающий несколько фаз [10], тестирующий и сравнивающий МОЦАО разработанные в различных странах. С каждой фазой идет усложнение “заданий”, которые должна выполнить та или иная модель. Сейчас идет 6-я фаза этого проекта CMIP6. Для выполнения прогнозов изменения климата с помощью ансамбля МОЦАО используется сценарный подход, суть которого состоит в том, что тому или иному сценарию (траектории) социально-экономического развития человечества в 21 веке соответствует своя прогнозная динамика выбросов парниковых газов, определяющая прозрачность атмосферы для отраженной от земной поверхности солнечной радиации. В настоящее время в соответствии с 6 оценочным докладом МГЭИК используется система сценариев общих социально-экономических путей (SSP - Shared Socioeconomic Pathways) [5]. При этом наиболее опасным с позиций изменения климата в 21 веке является путь SSP5-8.5. Цифра в данном случае 5 обозначает , что на пути развития в 21 веке человечество не отказалось от использования ископаемого топлива, а цифра 8.5 – это возникающая за счет этого к концу 21 века дополнительная радиационная нагрузка 8.5 ватт на кв м за счет высокой концентрации углекислых газов в атмосфере. При реализации этого сценария ансамбль моделей, участвующих в CMIP6, дает повышение средней приземной температуры воздуха на 5 градусов к 2100 году по сравнению с доиндустриальным уровнем.

Прогнозирование изменения подземных вод. Выполнение прогнозных оценок влияния климатических изменений на континентальный гидрологический цикл, включая его подземную составляющую в настоящее время основан на инкорпорации климатических прогнозов в гидрологические и гидрогеологические

(геогидрологические) модели различных масштабов. В эти модели включаются результаты сценарных климатических прогнозов на 21 век. При выполнении глобальных прогнозов непосредственно используются прогнозные климатические результаты, полученные на глобальной пространственной сетке, а при выполнении региональных и локальных прогнозов применяются различные способы даунскейлинга – привязки глобального прогноза к конкретному региону и даже метеостанции [13].

Для глобального прогнозирования изменений подземных вод используются как правило достаточно простые модели, в которые легко инкорпорировать климатические прогнозы. В частности, с использованием зависимости (1) в упомянутой выше работе [9] выполнен глобальный прогноз изменения питания подземных вод в 2050-2080 годах при реализации сценария SSP5-8.5 с использованием прогнозных изменений осадков и потенциальной эвапотранспирации, связанной с прогнозными изменениями температур. Основной полученный вывод, что в целом питание подземных вод поменяется в диапазоне -30% до +30% по сравнению с началом 21 века, однако глобальный паттерн этого изменения достаточно сложный так как составляющие индекса сухости действуют в разные стороны – увеличение потенциальной эвапотранспирации уменьшает питания, а увеличение осадков – его увеличивает. Но при этом, влияние осадков оказалось существеннее, и в целом глобальная карта изменения питания подземных вод по мнению авторов повторяет глобальную карту изменения осадков, осредненную по ансамблю моделей из семейства CMIP6. Этот результат демонстрирует главную проблему, связанную с климатически-обусловленными прогнозами ресурсов подземных вод, так как именно при прогнозе изменения осадков для конкретных регионов даже при одном и том же сценарии социально-экономического пути различные климатические модели дают хорошее межмодельное сходство прогноза температур, но достаточно различные (десятки процентов) прогнозы среднегодовых осадков.

Другим недавно опубликованным прогнозом, основанном на результатах глобальных климатических моделей является прогноз изменения температур подземных вод [8]. Для оценки глобального изменения температуры грунтовых вод использовалась простая одномерная модель кондуктивного теплопереноса в полуограниченной среде с заданием хода температур на поверхности земли в 21 века соответствии с прогнозом по ансамблю CMIP6 для каждого узла глобальной сетки, не попадающем в зону многолетнемерзлых пород. В результате получена серия карт изменения температуры грунтовых вод к концу 21 века при реализации различных сценариев. При этом оказалось, что даже для достаточно консервативного сценария SSP2-4.5 в среднем повышение температуры на уровне грунтовых вод составит около 2 градусов, а при реализации сценария SSP5-8.5 температура повысится на 2.9 градуса. При этом оказалось что даже при реализации умеренного сценария от 77 до 188 млн человек будут проживать в регионах, где температура грунтовых вод будет превышать стандарты максимальной температуры питьевой воды.

Для региональных и локальных объектов используются, как правило более сложные, физически обусловленные модели динамики подземных вод, инфильтрационного водообмена и взаимосвязи подземных вод с водотоками. В обзоре [7] проанализированы результаты 40 публикаций, в которых для конкретных бассейнов стока, расположенных в разных климатических условиях, с помощью моделирования рассматривалось влияние ожидаемых климатических изменений на баланс и режим подземных вод. Обобщение этих результатов по типам климата (умеренный и аридный) показало, что во всех рассмотренных аридных условиях инкорпорация сценария изменения климата в модель ведет к уменьшению питания и уменьшению емкостных запасов грунтовых вод. В то же время в умеренном климате примерно в 15% случаев питание не изменилось, в 30% увеличилось, а в остальных уменьшилось. То есть в гумидном умеренном климате влияние его изменения на подземные воды не настолько

однозначно, как в аридном, что подтверждается прогнозным моделированием изменения питания подземных вод для Европейской части России [13].

Заключение. В настоящее время накоплено большое количество эмпирических фактов об антропогенных климатических изменениях и связанных с ним изменений континентального гидрологического цикла, проявляющегося прежде всего во внутригодовой и многолетней динамике расходов речного стока. Изменение подземной составляющей этого цикла не так заметны, так как они должны происходить в основном за счет изменения условий формирования инфильтрационного питания, наблюдения за временными рядами которого недоступны. Однако основные индикаторы климатического влияния на подземные воды, а именно наблюдаемые изменение минимального стока рек показывают, что процесс климатических изменений дошел и до подземных вод

Прогнозирование климатических изменений в 21 веке в настоящее время проводится при помощи ансамбля МОЦАО (моделей Земной системы), результаты которого для различных сценариев (общих социально-экономических путей) являются общедоступными. Основной проблемой использования климатических прогнозов является то, что различные климатические модели дают межмодельное сходство прогноза температур, но достаточно различные прогнозы среднегодовых осадков для конкретных территорий.

В настоящее время накоплен достаточно обширный опыт инкорпорации климатических прогнозов в модели динамики подземных вод, инфильтрационного водообмена и взаимосвязи подземных вод с водотоками различного масштаба – от глобальных прогнозов для выявления общемировых тенденций в изменении подземных вод до моделей локальных потоков подземных вод и формирования инфильтрационного питания в точке.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-17-00102

Список литературы

1. Гельфан, А. Н., Е. М. Гусев, А. С. Калугин, И. Н. Крыленко, Ю. Г. Мотовилов, О. Н. Насонова, Т. Д. Миллионщикова, Н. Л. Фролова Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 2. Влияние изменения климата на водный режим рек России в XXI веке // Водные ресурсы. 2022. Т 49, № 3, с. 270–285

2. Городницкий А.М. Страсти по глобальному потеплению. //Геориск... 2019. —. Т14, №5. —. С 8-17.

3. Джамалов Р.Г., Сафронова Т.И., Телегина А.А. Эволюция многолетнемерзлых пород Восточной Сибири и их роль в формировании водных ресурсов // Науки о земле: Сырьевая база и геологоразведка. – 2016. – С. 104-111

4. Екайкин А. В чем неправ Городницкий// Троицкий вариант... — 2020. —, №2.

5. Семенов С.М., Гладильщикова А.А. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в 21 веке// Фундаментальная и прикладная климатология .2022—Т8, №1, С75-106.

6. Фролова Н. Л., Магрицкий Д. В., Киреева М. Б., Григорьев В. Ю., Гельфан А. Н., Сазонов А. А., Шевченко А. И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т 49, № 3, с. 251–269

7. Amanambu, A.C., Obarein, O.A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S.S., Balogun, O., Oyebamiji, A., Ochege, F.U., Groundwater System and Climate Change: Present Status and Future Considerations, Journal of Hydrology 2020., doi: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163

8. Benz, S.A., Irvine, D.J., Rau, G.C. et al. Global groundwater warming due to climate change. Nature Geoscience. 2024. https://doi.org/10.1038/s41561-024-01453-x

9. Berghuijs, W.R., Collenteur, R.A., Jasechko, S. *et al.* Groundwater recharge is sensitive to changing long-term aridity. *Nature of Climate. Change.* 14, 357–363 2024. https://doi.org/10.1038/s41558-024-01953-z

10. Carvalho, D., Rafael, S., Monteiro, A. et al. How well have CMIP3, CMIP5 and CMIP6 future climate projections portrayed the recently observed warming. Sci Rep 12, 11983 (2022). https://doi.org/10.1038/s41598-022-16264-6

11. Cuthbert, M.O., Gleeson, T., Moosdorf, N. et al. Global patterns and dynamics of climate–

groundwater interactions. Nature Climate Change 9, 137–141(2019. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0386-4

12. Feng D., Gleason C.J., Lin P., et al. 2021. Recent changes to Arctic River discharge. Nature Communications 12(1), 6917

13. Grinevskiy, S.O.; Pozdniakov, S.P.; Dedulina, E.A. Regional-Scale Model Analysis of Climate Changes Impact on the Water Budget of the Critical Zone and Groundwater Recharge in the European Part of Russia. // Water 2021, 13, 428. https://doi.org/10.3390/w13040428

14. Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D. et al. Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. Nature 625, 715–721 (2024). https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8

15. Kireeva M., Frolova N., Rets E., Samsonov T., Entin A., Kharlamov M., Telegina E., Povalishnikova E. Evaluating climate and water regime transformation in the European part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period // International Journal of River Basin Management,2019. DOI:10.1080/15715124.2019.1695258

16. Kuang X., Liu J., Scanlon B.R., et al. 2024. The changing nature of groundwater in the global water cycle. Science 383(6686), eadf0630

17. Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev,V.M., et al. 2018. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector. Polarforschung 87(2), 177-194.

18. Mann, M. E., Bradley, R. S. & Hughes, M. K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. Nature 392, 779–787 (1998)

19. McCulloch M.T., Winter A., Sherman C.E., et al. 2024. 300 years of sclerosponge thermometry shows global warming has exceeded 1.5 °C. Nature Climate Change 14(2), 171-177.

20. Moeck, C. et al. A global-scale dataset of direct natural groundwater recharge rates: a review of variables, processes and relationships. *Sci. Total Environ.* **717**, 137042 (2020).

21. Neukom, Raphael, and Barboza, Luis A, et al. "Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era". NATURE GEOSCIENCE, vol.12, no.8, 2019, pp. 643-649. doi:10.1038/s41561-019-0400-0

22. Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W., et al. 2002. Increasing river discharge to the Arctic Ocean. Science 298(5601), pp. 2171-2173.

23. Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., et al. 2022. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Communications Earth & Environment 3(1), 168.

24. Shiqi Liu, Ping Wang, Jingjie Yu, Tianye Wang, Hongyan Cai, Qiwei Huang, Sergey P. Pozdniakov, Yichi Zhang, and Ekaterina S. Kazak. Mechanisms behind the uneven increases in early, mid- and late winter streamflow across four arctic river basins. Journal of Hydrology, vol. 606. 2022.

25. Taylor R. G. et al., Ground water and climate change. Nature of Climate Change. 3, 2013. pp. 322–329. doi: 10.1038/nclimate1744

26. Woolway R.I., Kraemer B.M., Lenters J.D., et al. 2020. Global lake responses to climate change. Nature Reviews Earth & Environment 1(8), 388-403

ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ДРЕНАЖНЫХ ВОД В СЛОЖНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИХ В ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВЫХ ЦЕЛЯХ

Потапова Е.Ю.
Московский Государственный Университет имени. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
E-mail: potapova081962@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные со спецификой оценки запасов подземных вод, извлекаемых при добыче полезных ископаемых и использовании их для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения. При разработке месторождений полезных ископаемых практически всегда имеется необходимости проведения водоотлива из горных выработок. Зачастую подземные дренажные воды, извлекаемые при водоотливе, имеют хорошее качество и могут быть использованы для хозяйственно-питьевого назначения.

На примере Старооскольского промышленного района показана возможность оценки запасов подземных вод для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения и описаны сложности, которые при этом возникают.

Ключевые слова: *водоснабжение, запасы подземных вод, водоотлив, карьеры, гидродинамическое моделирование.*

Abstract. The issues related to the specifics of the assessment of groundwater reserves extracted during the extraction of minerals and their use for the purposes of domestic drinking water supply are considered. When developing mineral deposits, there is almost always a need for drainage from mine workings. Often, the underground drainage water extracted during drainage is of good quality and can be used for household and drinking purposes. Using the example of the Starooskolsky industrial district, the possibility of assessing groundwater reserves for the purposes of household and drinking water supply is shown and the difficulties that arise in this case are described.

Key Words: *water supply, groundwater reserves, drainage, quarries, hydrodynamic modeling.*

Введение

Системы отработки и осушения месторождений твердых полезных ископаемых для различных типов месторождений дренажных подземных вод это - карьеры, система подземных горных (в том числе и расположенные этажно), комбинированные системы, с обрушением горных пород и с закладкой выработанного пространства.

Запасы дренажных подземных вод должны: соответствовать величине минимального среднемесячного водопритока или его среднему значению за заданный расчетный период (если режим водопотребления соответствует режиму водопритока или проектируется накопительное водохранилище).

Не следует отождествлять запасы с величиной водопритока, рассчитанного для выбора системы осушения и насосного оборудования, так как инженерный запас, принимаемый при расчетах водопритоков, может привести к существенному завышению эксплуатационных запасов дренажных вод [7].

Запасы дренажных вод оцениваются с учетом взаимодействие дренажных систем оцениваемого месторождения с другими дренажными системами, а также с действующими и проектируемыми водозаборами на месторождениях подземных вод. При этом должен быть выполнен прогноз влияния планируемого отбора на существующие водозаборные сооружения и разработаны рекомендации по обеспечению водой потребителей, использующих существующие водозаборные сооружения, если последние в результате эксплуатации месторождения дренажных вод выйдут из строя.

Запасы дренажных вод оцениваются на определенный ограниченный срок эксплуатации (учитывая сложность гидрогеологических и горнотехнических условий, а также этапы освоения месторождения твердого полезного ископаемого, этот срок целесообразно принимать равным сроку первоочередной отработки).

Использование дренажных вод для хозяйственно-питьевых целей ограничено Санитарными нормами, которые декларируют невозможность расположения водозаборов питьевых вод в зоне санитарных ограничения горных выработок.

Методы и результаты исследований

Анализ гидродинамических условий территории Старооскольского железорудного района свидетельствует о том, что гидродинамическая обстановка является здесь достаточно сложной. Это обусловлено значительной фильтрационной неоднородностью толщи водовмещающих отложений в плане и разрезе, а также множеством типов граничных условий. Сложная картина формирования потоков подземных вод определяет выбор метода гидродинамических и миграционных расчетов.

При прогнозе водоотлива нужно учитывать развитие дренажных систем и увеличение производительности водозаборов предприятий ОАО «Лебединский ГОК» АО «Стойленский ГОК», планы развития подземных горных работ на Комбинате КМАруда, а также расширение водоснабжения территории в целом.

Подземные воды водозабора дренажных вод Стойленского карьера планируется использовать для хозяйственно-питьевого водоснабжения 25-ю дренажными восстающими скважинами, пробуренными в Восточном штреке, потребность в воде составляет 15 000 $м^3$/сут.

В ходе исследовании были реализованы оценки дренажных подземных вод с учетом планов развития дренажных систем Лебединского и Стойленского ГОКов, с выделением запасов для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Территория находится в Губкинском районе (Белгородская обл.), в 3 км к юго-востоку от г. Губкина. Разработка железных руд месторождения производится открытым способом с 1959 г.

Подземные дренажные воды, извлекаемые при осушении месторождения, являются попутным полезным ископаемым, которое используется для технического и хозяйственно-питьевого водоснабжения предприятий АО «Лебединский ГОК» и АО «Стойленский ГОК».

Территория расположена в пределах свода Воронежской антеклизы сложенной осадочно-метаморфическими породами архея и нижнего протерозоя [].

Осадочный чехол представлен отложениями: среднего и верхнего девона, верхнего девона и нижнего карбона, средней и верхней юры, нижним и верхним отделами меловой системы, палеогена, неогена, четвертичной системы [2, 3].

Геолого-гидрогеологические условия территории определяются переслаиванием водоносных горизонтов и слабопроницаемых относительных водоупорных отложений.

Системы осушения Лебединского и Стойленского карьеров представляет единый комплекс дренажных выработок, состоящих из внешнего и внутреннего контуров осушения.

На исследуемой территории в разные годы были выполнены комплексные геолого-съёмочные и поисково-разведочные на подземные воды работы, математическое моделирование и оценки и переоценки запасов подземных вод по участкам недр крупных водопользователей как самого АО «Стойленский ГОК», так и крупных водопользователей Старооскольского района.

Анализ гидродинамических условий территории Старооскольского железорудного района свидетельствует о том, что гидродинамическая обстановка является здесь достаточно сложной. Это обусловлено значительной фильтрационной неоднородностью толщи водовмещающих отложений в плане и разрезе, а также множеством типов граничных условий. Сложная картина формирования потоков подземных вод определяет выбор метода гидродинамических и миграционных расчетов.

Подсчет запасов подземных дренажных вод проводился на основе математической модели, в основу которой положены данные режимных наблюдений, состоящие в замерах уровней воды в гидротехнических сооружениях; уровней дренажа

водоносных горизонтов и комплексов, участвующих в обводнении карьера; величины водоотбора подземных вод на действующих водозаборах; величины водоотлива, а также положением уровней подземных вод (с 1957 года) по режимной наблюдательной сети, включающей на момент оценки запасов около 130 наблюдательных скважин, оборудованных на альб-сеноманский, турон-коньякский водоносные горизонты и на архей-протерозойский водоносный комплекс и расположенных вокруг карьеров и хвостохранилищ [1].

Запасы оценивались по величине прогнозных водопритоков в дренажный комплекс при его проектном развитии в пространстве и во времени вместе с расширением и углубление карьерного поля.

Прогнозные расчеты показали, что водоприток к дренажной системе Стойленского карьера году будет формироваться в основном за счет фильтрационных потерь из хвостохранилищ Лебединского (46 %) и Стойленского (38 %) ГОКов, 16 % подземных вод поступает с северной стороны исследуемой территории в основном за счет фильтрационных потерь из реки Осколец.

В работе автором приводятся результаты прогнозной оценки потенциального загрязнения подземных вод на действующих водозаборах г.г. Губкин и Старый Оскол и др. населенных пунктов, а также на водозаборах предприятий Стойленского и Лебединского ГОКов как самый важный момент для обоснования прогноза качества воды на весь период эксплуатации.

Такая оценка необходима, поскольку установлено, что в результате фильтрации воды из хвостохранилищ Лебединского и Стойленского ГОКов в подземные воды может поступать загрязнение, в котором могут быть повышенные содержания ряда компонентов, в т.ч. нефтепродукты [4].

По результатам моделирования на 2045 г со стороны хвостохранилищ ГОКов фронт потенциального загрязнения будет продолжать распространяться в сторону карьеров, достигая максимального распространения. При этом очень важно, что оно не будет доходить до действующих водозаборов гг. Губкин и Старого Оскола и других населенных пунктов.

Восточный штрек, в котором находятся восстающие скважины, используемые для хозяйственно-питьевых и хозяйственно-бытовых целей, расположен в восточной части территории горного отвода Стойленского ГОКа.

Восточный штрек является крайним штреком в районе карьера, основным штреком по перехвату подземных вод альб-сеноманского водоносного горизонта восточной части горного отвода. Расстояние от кромки борта карьера, которая планируется на конец отработки карьера первой очереди (2040 год), составляет 250 - 450 м в южной части штрека, 370- 450 м в северной части.

Решение прогнозной миграционной задачи показало, что изменение водохозяйственной обстановки (развитие дренажной системы карьеров развитие дренажной системы карьеров, увеличение водоотбора подземных вод, наращивание площадей хвостохранилищ) приводит к интенсификации скорости распространения потенциального загрязнения подземных вод.

Таким образом, прогноз возможного изменения качества подземных вод, использующихся для хозяйственно-питьевого водоснабжения водозаборами гг. Губкин, Старый Оскол и др. населенных пунктов (под влиянием сложившейся к настоящему времени и изменяющейся в дальнейшем водохозяйственной обстановки) может быть осуществлен методом математического моделирования.

По результатам расчетов (рис.1) установлено, что в течение прогнозного периода нет прямой угрозы загрязнения подземных вод питьевого качества, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения в гг. Губкин и Старый Оскол и др. населенных пунктов.

Гарантией отсутствия загрязнения в подземных водах эксплуатируемых водоносных горизонтов могут служить лишь стационарные гидрохимические наблюдения за качеством подземных вод, для чего необходима организация режимных наблюдений [5].

Размеры зон санитарной охраны, полученные в результате прогнозного моделирования, для II-го пояса составляют 50 м вниз по потоку и 200 м вверх по потоку, ширина практически равна длине ряда скважин 1900 м, а для III-го пояса составляют вниз по потоку 200 м, вверх по потоку – 3350 м, ширина 6500 м.

Результаты решения прогнозной миграционной задачи показывают, что зоны санитарной охраны не достигают границ потенциально опасных объектов, которые могут послужить источниками химического и бактериологического загрязнения.

Таким образом, качество подземных вод на водозаборе хозяйственно-питьевых вод в Восточном штреке обеспечено на весь срок эксплуатации.

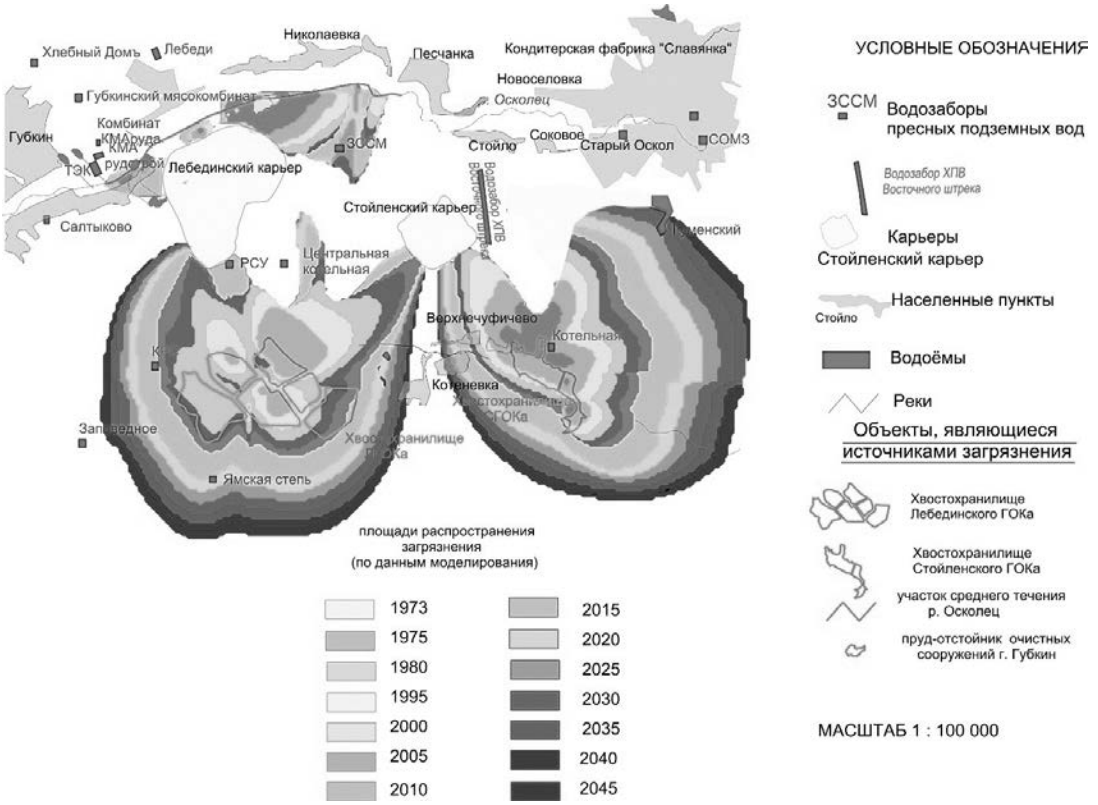


Рис.1. Развитие потенциального загрязнения подземных вод Старооскольского промышленного района по данным моделирования

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать выводы о возможности использования дренажных вод для хозяйственно-питьевых целей восстающими дренажными скважинами Восточного штрека.

Список литературы

1. Беспалов П.М., Кривошеев В.Я. Анализ результатов гидрогеологических наблюдений в Старооскольско-Губкинском промрайоне, уточнение фильтрационных параметров водоносных горизонтов, прогноз фильтрационных потерь из технических водоемов и водопритоков в карьеры, оценка и прогноз загрязнения подземных вод, разработка водного баланса промрайона. НТЦ НОВОТЭК. Белгород, 1996.

2. Геология, гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии (КМА). Том III. Железные руды. Ред. И.Н. Леоненко, М., Недра, 1969.

3. Железные руды КМА (под редакцией В.П. Орлова, И.А. Шевырева, Н.А. Соколова)

Геоинформмарк, М., 2001.
4. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1988.
5. Мироненко В.А., Норватов Ю.А., Сердюков Л.И. Гидрогеологические исследования в горном деле. М., Недра, 1976.
6. Оксанич И.Ф., Береснев В.С., Гордон А.Б. Осушение месторождений при строительстве железорудных предприятий. М., Недра, 1977.
7. Писанец Е.П., Мироненко В.А. Водопонижение на карьерах КМА. М., Недра, 1968.

РАДИОУГЛЕРОДНОЕ ДАТИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОБЬ-ЗАЙСАНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

Пыряев А.Н.[1,2], Новиков Д.А.[2,3], Петрожицкий А.В.[2,4], Кулешов Д.В.[2,5]
[1]Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, pyrayev@igm.nsc.ru
[2]Новосибирский государственный университет, Новосибирск
[3]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск
[4]Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
[5]Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск

Аннотация. В настоящей статье представлены данные комплексного изотопного анализа природных вод Обь-Зайсанской складчатой области: состав стабильных изотопов H, O, C, а также содержание радиоизотопа углерода ^{14}C. Проведенное исследование позволило получить ответ на вопрос о существенном различии в составе стабильных изотопов подземных вод Новосибирской области, где влияние высотного градиента - минимально, а влияние широтного эффекта в пределах изученной области – очень невелико.

Ключевые слова: *подземные воды, стабильные изотопы H, O, C, радиоуглерод ^{14}C, датирование вод*

Abstract. In this paper data of complex isotope analysis of natural waters of Ob-Zaisan folded region (stable isotope analysis of H, O, C and radiocarbon ^{14}C concentration) are presented. The study made it possible to decide problem of significant differences in the composition of stable isotopes of groundwater in the Novosibirsk region, where the influence of the altitudinal gradient is minimal, and the influence of the latitudinal effect within the studied area is very small.

Key words: *ground waters, stable isotopes H, O, C, radiocarbon ^{14}C, dating of waters*

Радиоуглеродное датирование растворенного в водах углерода (РВУ) применяют для решения различных гидрогеологических и палеогидрогеологических задач: скоростей фильтрации отдельных водоносных горизонтов и их баланса; установление периодов оледенения, смены климата, привноса разных типов вод [1, 2]. Метод, разработанный коллективом Либби (Libbi) [3] исходно рассматривался исключительно применимым для органических археологических и геологических образцов. Позже, в 1957-1968 гг. Мюнних (Münnich) на базе концепции Фрэнка (1951 г) разработал концепцию датировки древних грунтовых вод, основные принципы которой детально изложены в [1, 2] и, коротко, сводятся к вымыванию современным ВРУ с pMC = 100 (per cent modern carbon – процентным содержанием современного углерода) карбонатов в породах водоносного горизонта с pMC, близким к 0. Соответственно, получаемые таким образом датировки – специфические величины для каждого водоносного горизонта,

несущие свой индивидуальный набор неточностей, обусловленный вторичными гидрогеохимическими и физическими изменениями.

Для оценки возраста РВУ вод, дренирующихся через водоносные горизонты в гидрогеологических системах применяют различные модели массопереноса и выбор конкретной модели может оказать существенное влияние на конечный результат. В большинстве случаев оперируют поршневой моделью Мюнниха [4]. Существует несколько важных факторов, оказывающих влияние на активность радиоуглерода в водах и, соответственно, корректность оценки возраста вод. Для преодоления этих затруднений в оценке радиоуглеродного возраста подземных вод был предложен эмпирический подход, основанный на статистике, сводящийся к объединению всех внешних региональных параметров, гидрогеохимических реакций и процессов изотопного фракционирования в параметр содержания ^{14}C в исходной воде, проходящей через водоносный горизонт. При этом для различных геологических обстановок эта поправка индивидуальна [5] и составляет от -1000 лет для закрытых горизонтов до -5000 лет для открытых карстовых и дюнных систем.

Также при анализе радиоуглеродного возраста DIC следует принимать во внимание процессы, изменяющие относительное содержание радиоуглерода в водах не только за счет радиоактивного распада, но и за счет реакций, протекающих при силикатном выветривании, растворении/переотложении карбонатных пород коллектора, а также изотопный обмен с ними [1, 2]. При использовании ^{14}C-хронометров всегда важно помнить, что такие датировки определяют время удержания некоторого трассера в водоносном горизонте, а не возраст самих вод [2]. Каждая датировка представляет средневзвешенную и интегрированную информацию по смешению, старению вод, а также физическим и химическим процессам, модифицирующим подземные вод между областью питания и водозаборной скважиной (источником).

Настоящая работа является продолжением ранее проведенных исследований природных вод Новосибирской области [6-13], объединивших комплексный анализ химического и изотопного состава вод и РВУ. Очевидно, что датирование РВУ для выраженных поверхностных вод (реки, озера, карьерные воды) представляется малоинформативным, поэтому в этой работе мы акцентировали свое внимание на подземных водах (скважин и источников), объединив ранее полученные отдельные радиоуглеродные датировки с новыми данными. Первоочередной задачей было проверить работоспособность метода радиоуглеродного датирования для определения возраста РВУ, содержащегося в подземных водах с невысокой степенью минерализации, а также сопоставить полученные материалы с результатами определений состава стабильных изотопов. Проведенное исследование позволяет получить ответ на вопрос о существенных различиях в составе стабильных изотопов подземных вод Новосибирской области, где отсутствует/минимально влияние высотного градиента [1], а влияние широтного эффекта в пределах изученной области – очень невелико.

Для проведения исследований было отобрано 29 проб вод из различных объектов. Карта точек отбора проб приведена на рисунке (рис 1). Процедура отбора проб для анализа стабильных изотопов проводилась по методике, описанной в [14] с использованием нейлоновых фильтров 0,22 мкм. проб была следующая. Пробы в течение дня транспортировались в лабораторию и помещались в холодильник (при +5°C) до проведения изотопного анализа. Анализ состава стабильных изотопов проводили в максимально сжатые сроки, чтобы нивелировать влияние эффекта хранения. Исследование изотопного состава кислорода, водорода вод, а также РВУ проводилось в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. Подробное описание использованного оборудования, методик и стандартов представлено в [14].

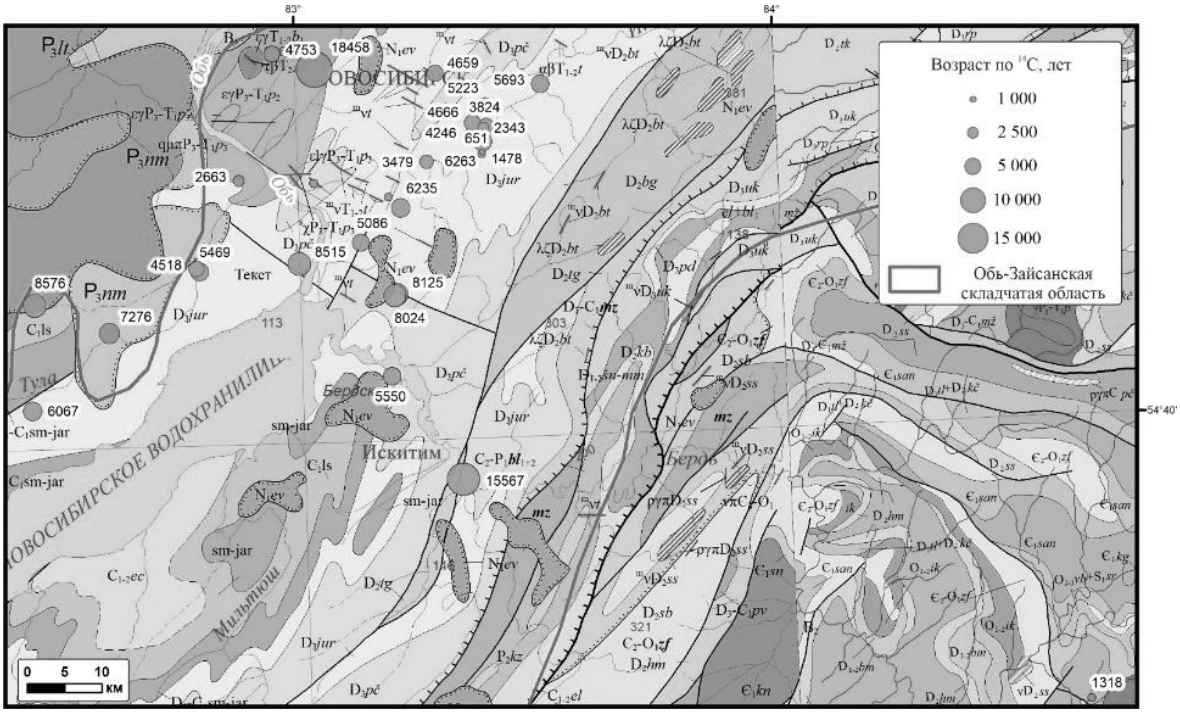


Рис.1 – Карта точек отбора проб с указание возрастов РВУ, оцененных расчетным способом с использованием традиционного значения периода полураспада.

Радиоуглеродное датирование проводили методом ускорительной масс-спектрометрии на приборе, сконструированном в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, РФ. Для этого анализа пробы отбирали в отдельную тару, следуя следующей методике. В образец подземной воды, не подвергшийся контакту с атмосферой, объемом 1,5 л добавляли 1 г $CoCl_2$ (ЧДА), и перемешивали до полного растворения соли. Полученный раствор выдерживали не менее суток в герметично закрытой таре до появления осадка (карбонат кобальта). Сформированный осадок декантировали и сушили на воздухе. С помощью абсорбционно-каталитической установки, изготовленной сотрудниками Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН и функционирующей в НГУ [15] производили разложение $CoCO_3$ и последующее восстановление выделяющегося углекислого газа до графита. После завершения процесса графитизации порошок, содержащий 2-3 мг углерода, прессовали в таблетки для проведения УМС-анализа. Процедуре зауглероживания, помимо исследовательских образцов, подвергали также стандартные образцы щавелевой кислоты OxI, сахарозы ANU (National Institute of Standards and Technology, США), а также фонового образца, не содержащего 14C, например, мелкозернистого плотного графита (МПГ), коллагена древнего мамонта, фталевой кислоты, полиэтилена и др. Относительное содержание радиоуглерода $^{14}C/^{13}C$ в изученных образцах нормировали на содержание $^{14}C/^{13}C$ в указанных стандартах.

Оценка возраста РВУ производилась с использованием классического уравнения [2]. Для расчетов использовались результаты количественных определений содержания радиоизотопа ^{14}C в процентах современного стандарта углерода (pmc – per cent modern carbon) как с традиционным значением периода полураспада ^{14}C (5568 лет), применяемым для органических субстанций, так с рекомендованным для водных систем, физическим значением периода полураспада ^{14}C (5730 лет) [2]. На рис. 1 представлены результаты оценки возрастов с применением традиционного периода полураспада. Наибольшая поправка, полученная при использовании величины физического периода полураспада углерода ^{14}C составляла не более 540 лет, что является не очень значимым отклонением при датировании углерода в водоносных горизонтах [2].

Изотопный состав кислорода и водорода изученных вод представлены на рисунке 2а. Видно, что воды обладают широким спектром вариации проанализированных параметров. Изотопный состав водорода и кислорода варьирует в диапазонах от -140 до -114 ‰ для δD и от -18,7 до -15,3 ‰ для $\delta^{18}O$. Большинство точек изотопного состава ложатся близко к глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) [16], что указывает на их инфильтрационное происхождение из атмосферных осадков (рис. 2а) [1]. Отметим, что для вод с различным содержанием ^{14}C относительно современного стандарта (то есть, различным возрастом РВУ при простейшей интерпретации данных) характерно разделение по изотопному составу кислорода и водорода. Наглядно это продемонстрировано на рисунке (рис. 2б). Видно, что по мере уменьшения доли ^{14}C в составе РВУ изотопный состав водорода становится все беднее дейтерием (зависимость описывается уравнением $\delta D = 0.2003 \cdot [^{14}C] - 142.15$). Аналогичная зависимость наблюдается и для значений $\delta^{18}O$. Предполагая корректность оценки возрастов РВУ, можно прийти к заключению, что климатические условия формирования вод до их инфильтрации постепенно изменялись: от более холодных в древности к более теплым современным.

Этот результат отчасти объясняет существенное различие в изотопном составе кислорода и водорода подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области. Отсутствие выраженных перепадов рельефа в ближайшем окружении, а также удаленность от всех крупных водоемов сводит к минимуму влияние высотного и широтного эффекта вариации изотопного состава [1]. Как известно, подземные воды, ввиду тщательного перемешивания, усредняют изотопный состав кислорода и водорода и отражают некоторую усредненную величину за длительный период времени. Небольшие смещения в изотопном составе одновозрастных водоносных горизонтов также могут наблюдаться, в частности, благодаря смещению акцентов питания индивидуальных источников от более теплых к более холодным периодам года. В нашем случае, имея в распоряжении оценки радиоуглеродных возрастов ВРУ можно предполагать смещение акцентов питания не только по сезонным осадкопроявлениям, но уже и по длительным временным периодам, когда выразительно мог проявиться эффект климатических изменений.

Безусловно, корректная оценка возраста ВРУ сопряжена с множеством факторов вторичного влияния, о чем было сказано ранее. Применение простых расчетных методов для оценки возраста ВРУ не всегда выглядит достоверным. Поэтому, кроме простого уравнения для расчета возраста образца [2] мы использовали подход Пирсона-Шварценки [1, 17], который позволяет нивелировать эффект разубоживания РВУ вод карбонатами коллектора и построить линии одновозрастных вод даже при различной удельной активности в них радиоуглерода (рис. 2в). Из проведенных построений видно, что большинство точек расчетных значений возрастов РВУ корректно располагаются на диаграмме Пирсона-Шварценки, то есть, попадают в соответствующие диапазоны возрастов. Исключение составляют лишь точки вод с расчетными возрастами ВРУ до 2500 лет. Вероятно, это отклонение обусловлено рядом факторов, среди которых, в первую очередь, следует выделить невысокие значения расчетных возрастов, а отсюда и высокую погрешность определений.

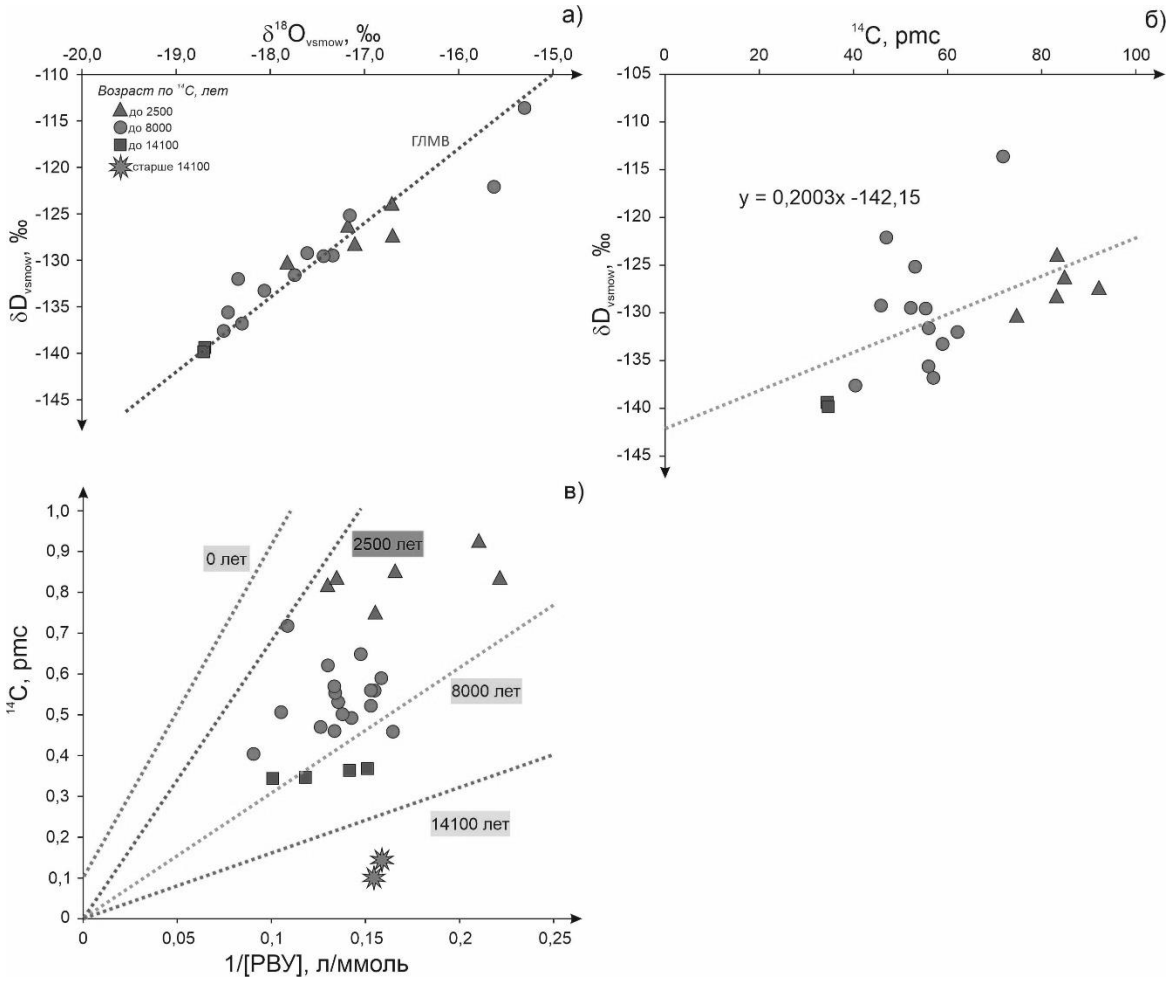


Рис.2 – Изотопный состав кислорода и водорода подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области. ГЛМВ [16] (а); изменение изотопного состава водорода в водах от измеренного содержания ^{14}C, pmc (б); диаграмма линий одновозрастных вод по [1, 17] (в).

Следует принять во внимание влияние «эффекта жесткой воды» [4], позже получившего название «эффект резервуара» [18], который приводит к искусственному завышению реального возраста водоносного горизонта. В зависимости от комплекса принятых начальных условий при оценке радиоуглеродного возраста, ошибка датировок может достигать 5000 лет [2]. Полагаем, что суперпозиция этого эффекта с другими вторичными геохимическими процессами, может приводить также и к занижению радиоуглеродного возраста в водных системах. Например, при использовании модели смешения разновозрастных вод [19], привнос даже небольшой порции современной воды (0,1%) в коллектор с древними водами может занизить ^{14}C-возраст почти вдвое [1]. В целом, для изученных подземных вод результаты оценки радиоуглеродного возраста с применением двух подходов получились соизмеримыми и вполне могут быть использованы для дальнейшей интерпретации данных. Полученные результаты позволяют объяснить существенное различие в изотопном составе кислорода и водорода подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области, обусловленные, очевидно, не только различием акцентов питания в разные периоды года, но также и изменением климатических условий в регионе в течение длительного периода.

Полевые и аналитические работы по изучению особенностей изотопного состава подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области выполнены при финансовой поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

Список литературы

1. Ферронский В.И. Изотопия гидросферы земли / Ферронский В.И., Поляков В.А. – Москва: Изд-во Научный мир, 2009. – 632 с.

2. Aggarwal P.K. Isotopes in the Water Cycle. Past, Present and Future of a Developing Science / Aggarwal P.K., Gat J.R., Froehlich K.F.O. – Netherlands: Springer Dordrecht, 2005. – 382 p.

3. Anderson, E.C. Natural Radiocarbon from Cosmic Radiation / Anderson, E.C., Libby, W.F., Weinhouse, S., Reid, A.F., Kirshenbaum, A.D., Grosse, A.V. – Physical Review, 1947. V. 72. – P. 931-936.

4. Münnich K.O. Messung des 14C-Gehaltes von hartem Grundwasser / Münnich K.O. – Naturwissenschaften, 1957. V. 34. – P. 32-33.

5. Geyh M.A. An overview of 14C analysis in study of groundwater / Geyh M.A. – Radiocarbon, 2000. V.42. No. 1. – P. 99-114.

6. Novikov D.A. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashchevskaya A.A., Kalinkin P.N., Petrozhitsky A.V. – Groundwater for Sustainable Development, 2023. V. 20. 100886.

7. Novikov D.A., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Derkachyov A.S., Chernykh A.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of the Kamenskoye hydro-radon occurrence, Novosibirsk, Russia // Geochemistry. – 2023. V.83 № 4– 126016.

8. Пыряев А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А., Дульцев Ф.Ф., Деркачев А.С., Черных А.В., Хващевская А.А. Изотопно-концентрационная характеристика природных вод Новосибирской области как инструмент контроля их взаимодействия с окружением // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. Т. 334. № 2. – С. 22-33.

9. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Сухорукова А.Ф., Вакуленко Л.Г., Пыряев А.Н., Максимова А.А, Деркачев А.С., Фаге А.Н., Хващевская А.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В., Мельгунов М.С., Калинкин П.Н., Растигеев С.А. Об открытии слаборадоновых вод – Инские источники // Геология и геофизика. – 2022. Т. 63. № 12. – С. 1714-1733.

10. Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Сухорукова А.Ф., Дульцев Ф.Ф., Деркачев А.С., Черных А.В., Хващевская А.А. Об открытии слаборадоновых вод – Седова Заимка // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. Т. 333. № 12. – С. 61-73.

11. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Максимова А.А., Пыряев А.Н., Фаге А.Н., Хващевская А.А., Деркачев А.С., Черных А.В. Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Новобибеевского проявления радоновых вод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. Т. 233. № 1. – С. 57-72.

12. Novikov D.A., Dultsev F.F., Kamenova-Totzeva R., Korneeva T.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky–Mochishche zone of Novosibirsk, Russia // Environmental Earth Sciences. – 2021. V. 80. No. 216.

13. Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia // Groundwater for Sustainable Development. – 2021. V. 15. – 8 p.

14. Пыряев А.Н. Стабильные изотопы как инструмент контроля границ закрытых экосистем на примере бассейна р. Витим / Пыряев А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А. – Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2022. Т. 333. № 5. – С. 148-157.

15. Lysikov A.I. Novel Simplified Absorption-Catalytic Method of Sample Preparation for AMS analysis designed at the Laboratory of Radiocarbon Methods of Analysis (LRMA) in Novosibirsk Akademgorodok / Lysikov A.I., Kalinkin P.N., Sashkina K.A., Okunev A.G., Parkhomchuk E.V., Rastigeev S.A., Parkhomchuk V.V., Kuleshov D.V., Vorobyeva E.E., Dralyuk R.I. – International Journal of Mass-spectrometry, 2018. V. 433. – P. 11-18.

16. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. Ninth edition. / Hoefs J. – Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021. – 528 p.

17. Pearson F.J.Jr. 14C Evidence for the origin of arid region groundwater, northern province, Kenya / Pearson F.J.Jr., Swarzenki W.V. – Vienna: IAEA: Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, 1974. V. II. – P. 95-108.

18. Olsson I.U. The radiocarbon contents of various reservoirs / Olsson I.U. // Radiocarbon dating, 9th Internat. Radiocarbon Conf.: Proc. – Los Angeles, 1979. – P. 613-618.

19. Evans G.V. Some Problems in the Interpretation of Isotope Measurements in United Kingdom Aquifers / Evans G.V., Otlet R.L. Downing A., Monkhouse R.A. Rae G. – Vienna: IAEA: Isotope Hydrology, 1979. V. II. – P. 679-708.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ ШАХТНОЙ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Разумная Д.А.[1], Бродская Н.А.[2]
[1]*Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, г. Санкт-Петербург, dasha.razumnaya@mail.ru*
[2]*Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, г. Санкт-Петербург, gidro-geo@yandex.ru*

Аннотация: системно рассматриваются условия взаимодействия отработки угольного месторождения шахтным способом с поверхностными и подземными водами, нарушение режима вод и формирование депрессионного понижения в результате шахтного водоотлива. Изменение гидрохимического состава происходит при смешении вод. Прекращение водоотлива привело к катастрофическому подъему подземных вод на территории селитебной застройки.

Ключевые слова: *отвалы вскрышных пород, техногенный режим подземных вод, депрессионная воронка, макрокомпоненты*

Abstract: The conditions of interaction of mining a coal deposit with surface and groundwater are systematically considered. Violation of the water regime and the formation of a depression as a result of mine drainage. A change in the hydrochemical composition occurs when water is mixed. The cessation of drainage led to a catastrophic rise in groundwater in the residential development area.

Key words: *overburden dumps, technogenic regime of groundwater, depression funnel, macro components*

Добыча различных полезных ископаемых по степени воздействия на окружающую среду различается лишь технологиями переработки сырья, поэтому проблемы, связанные с воздействием на природные водные объекты практически одинаковые. Открытые (карьеры) и закрытые (шахты) разработки месторождений вызывают нарушение ландшафтных условий, режима уровней грунтовых вод и изменение гидрографической сети рек, формирование твердых и жидких отходов по производству готовой продукции, подтопление территорий, загрязнение поверхностных и подземных вод. Настолько эти процессы взаимосвязаны, что следует рассматривать их как единую геотехническую систему (ГТС). Причем, в эту систему вовлекается территория селитебной застройки, располагающаяся на некотором удалении от ядра месторождения, и здесь уже развиваются катастрофические процессы изменения всех компонентов окружающей среды. [1, 2]. Однако разработка природоохранных мероприятий и оценка воздействия промышленного предприятия на окружающую среду нуждается в комплексном плане каждой конкретной ГТС. Самым негативным состоянием характеризуется период прекращения отработки месторождения, рекультивации и реновации. Но на каждом конкретном объекте проявляется это состояние по-разному.

Наши исследования проводятся на месторождении каменного угля Буланаш в Свердловской области, разрабатываемым подземным шахтным способом с 1938 г.

Отработка месторождения сопровождается значительным изменением ландшафтных условий, проседанием земной поверхности с образованием множества пониженных участков рельефа, заполненных водой. Проседание поверхности происходит из-за обвалов в шахтах.

Кроме этого, новые формы положительного рельефа характеризуются отвалами вскрышных пород с содержанием угольной фракции, которые внутри самовозгараются и тлеют круглогодично (рис. 1).



Рис. 1 Отвалы на рассматриваемой территории (фото Разумной Д.А.)

Месторождение Буланаш расположено в зоне умеренно-континентального климата, для него характерна резкая изменчивость погодных условий с хорошо выраженными сезонами года, с большими колебаниями температуры воздуха как внутри года, так и в течение суток. Наблюдения за метеорологическими данными проводятся на сети Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации (Роскомгидромета) в г. Артемовский, в 10 км от рудного поля. Анализ данных имеет важное значение для прогноза и оценки состояния природных вод.

На рис. 2 представлено годовое количество осадков и температуры, где четко прослеживается взаимосвязь, повышение годовой температуры приводит к снижению осадков и наоборот. Так с 2000 г. начался маловодный период, а годовая температура воздуха увеличивается от года к году. В годовом разрезе самый теплый месяц - июль, а самый холодный – январь, (табл. 1). К 2025 году следует ожидать начало многоводного цикла.

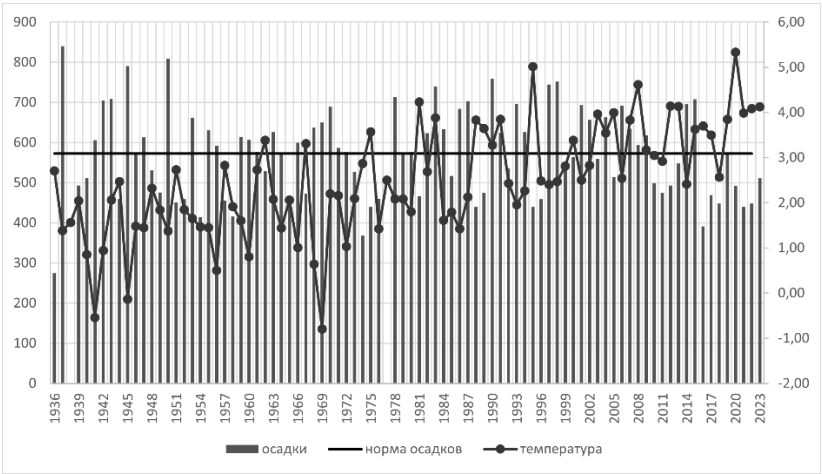


Рис. 2. График осадков и температуры с 1936 по 2023 гг.

Таблица 1. Среднемноголетние месячные температуры воздуха и осадки

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
Температура, °С	-16,6	-14,5	-8,4	2,1	9,8	15,1	17	14,7	9,0	1,0	-7,6	-14,3	0,6
Осадки, мм	19	16	21	22	41	64	74	61	45,0	30,0	30	26	449

Ветровой режим представлен на рисунке 3, на котором видно, что в течение всего года преобладает западный ветер. Этот факт является положительным, т.к. п. Буланаш расположен на западе от шахтного поля и распыление при перегрузке угля наблюдается не сильное.

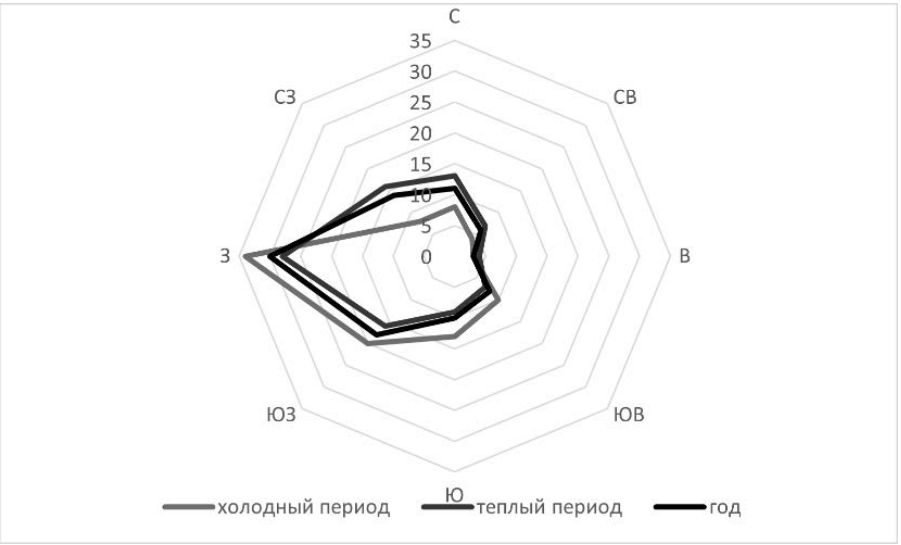


Рис. 3 Роза ветров

Территория посёлка расположена в междуречье рек Ближний Буланаш и Бобровка, являющиеся левыми притоками реки Ирбит, они относятся к Обскому бассейновому округу. В естественных условиях на реках района хорошо выражены весеннее половодье, летние и осенние дождевые паводки и продолжительная зимняя межень. Реки по типу питания являются смешанными, с преимущественным снеговым питанием. Река Бобровка в районе шахтного поля зарегулирована озером, которое образовалось по закону сообщающихся сосудов. На сегодняшний день на озере ведутся ежедневные наблюдения. По данным Уральской гидрогеологической станции формирование притоков на месторождении происходит на 50% за счёт фильтрации поверхностных вод, а остальное количество обеспечивается инфильтрацией атмосферных осадков [3].

Шахтное поле расположено вблизи устьевых частей рек, это определяет безусловное взаимодействие поверхностных и подземных вод при шахтной отработке месторождения с одной стороны и обводненность гидрогеологического разреза при формировании перетекания из нижних горизонтов подземных вод, с другой. В связи с водопонижением шахтным водоотливом сформировалась депрессионная воронка, которая обеспечивала осушение прилегающей заболоченной территории и территории поселка. Но с прекращением откачки депрессионная воронка резко стала повышаться. Шахты затапливались. На рис 4 в 2009г глубина до воды по скв.12 составляла 46,4 м, а в 2019г 7,6 м. В поселке началось катастрофическое подтапливание, вводятся дренажные узлы с водопонижением, но они эту ситуацию не улучшают. [4].

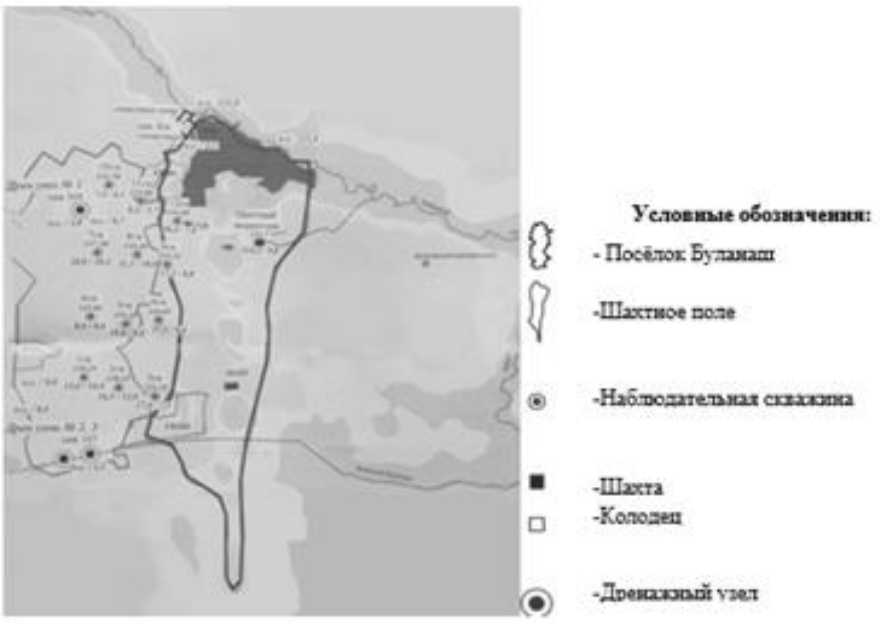


Рис. 4 Схема междуречья р. Бобровки и р. Буланаш с шахтным полем (масштаб 1:25000)

При смешении поверхностных и подземных (шахтных) вод состав сбрасываемых стоков частично изменялся на очистных сооружениях, но из-за обилия притоков зачастую они поступают, минуя их, в реки Бобровка и Бл.Буланаш через водоотливные каналы. Оградительная дамба береговой зоны реки Бобровка испытывает прорывы, и речная вода поступает снова в шахты. Помимо этого, шахтные воды сбрасывались в шахтное озеро на данной территории, в которое сбрасываются стоки с очистных сооружений.

Нами построены графики хода уровня подземных вод по скважинам территории не только шахтного поля, но и самого поселка Буланаш. Причем, четко выделяются группы скважин по линиям, параллельным границе шахтного поля (рис. 4). Ход среднегодовых уровней подземных вод по скважинам ближайшей первой линии 3, 6, 9, представлен на рис. 5. Как видно на графике, с 2015 г. начался резкий подъем уровней, достигший максимума к 2018, 2019 гг. Подъем составил 10─15 м. Он практически совпадает с отметкой уреза воды в реке Бобровка, на которой произошел прорыв дамбы. По второй линии скважины 2, 5, 8, 11 отреагировали на повышение уровня всего на 4─5 м. На третьей линии, подальше от шахтного поля, по скважинам 1, 4, 7, 9, подъем уровня составил 1─1,5 м. Максимальное поднятие уровня подземных вод на 40 м. представлено по скважине 12 (рис. 6).

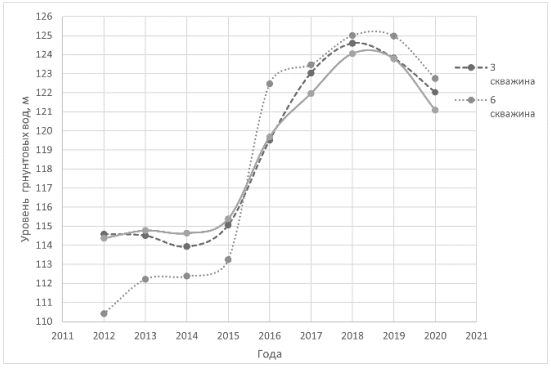


Рис. 5. Среднегодовые уровни подземных вод скважин первой линии за 2012–2020 гг.

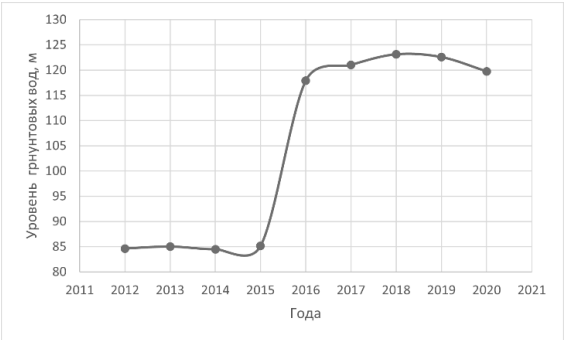


Рис. 6. Среднегодовой уровень подземных вод по скважине 12 за 2012–2020 гг.

Единственным контролем режима в техногенной зоне отработки месторождения является гидрохимический анализ подземных и поверхностных вод, по которому можно проследить наличие взаимосвязи вод. По качеству холодной питьевой воды, в соответствии с протоколами лабораторных испытаний от 23.07.2018 года, по пробам, взятым из водопроводной сети превышение нормативного содержания химических элементов – марганца, железа, нитратов и кремния не установлено, т.е. все определяемые показатели содержания химических элементов в питьевой воде соответствуют или ниже предельной допустимой концентрации. Также и по результатам анализов проб по микробиологическому составу питьевая вода поселка Буланаш соответствует СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода». Во всех образцах общие колиморфные и термотолерантные колиморфные бактерии отсутствуют. Подземные воды опокового горизонта, используемые для питьевого водоснабжения поселка, по химическому составу гидрокарбонатные кальциево-магниевые с сухим остатком до 408 мг/дм^3 умеренно-жесткие (до 6,7 ммоль/дм^3). [2]. Поверхностные воды рек из-за сброса шахтных вод имеют повышенные показатели сухого остатка до 500-644 мг/дм^3, цветности до 160 град., мутности до 2,2 мг/дм^3, содержание сульфатов достигает 247,7 мг/дм^3, нефтепродуктов - до 1,4-2,0 мг/дм^3.

Подземные воды продуктивного трещинно-карстового водоносного горизонта – гидрокарбонатные кальциево-магниевые с сухим остатком до 568 мг/дм^3 и жесткостью до 8,4 ммоль/дм^3. Характерная особенность состава воды данного горизонта – повышенное содержание следующих элементов: Железо - до 6,2 мг/дм^3, при ПДК 0,3 мг/дм^3; Марганец – до 0,49 мг/дм^3, при ПДК 0,1 мг/дм^3; Кремний – до 10,4 мг/дм^3, при ПДК 1,0 мг/дм^3; показатель мутности – до 25,4 мг/дм^3, при ПДК 1,5 мг/дм^3.

Практически по всем макрокомпонентам и ряду микрокомпонентов воды, сбрасываемые в реку Бобровка, превышают ПДК до 1,5 раз. Бактериологическое состояние подземных вод удовлетворительное.

В материалах госэкспертизы [5] отмечается, что природное состояние подземных вод действующих водозаборных участков, не соответствующее питьевым нормативам по мутности, содержанию железа, кремния, марганца и периодически по бактериальному загрязнению требует нормализации воды. Существующая на водозаборе система водоподготовки включает в себя обезжелезивание, деманганацию и хлорирование воды

Изменения состава подземных вод наблюдается в весенний и осенний периоды, некоторое увеличение содержания гидрокарбонатов, сульфатов, а содержание микрокомпонентов – железа, марганца, кремния увеличивается в летний меженный период. Следует отметить, что содержание марганца и жесткости воды имеют тенденцию к повышению в течение всего наблюдаемого периода.

Рассмотренные водно-балансовые и эколого-гидрогеологические составляющие формирование взаимосвязи природных вод на Буланашском месторождении свидетельствуют о техногенном режиме, трудно управляемым и остро нуждающимся прогнозировании, в связи с угрозой подъема уровня подземных вод и подтопления жилой застройки поселка. Мы видим единственное решение в проектировании водопонижения через локальную дренажную систему с тщательным контролем гидрохимического состава, причем ориентированным на рыбохозяйственные нормативы

Список литературы

1. Бродская Н.А. Влияние промышленного комплекса на режим и состав природных вод. Дис. СПб., 1992г.

2. Бродская Н.А. Возможности использования водных объектов в зонах погашенных карьеров. Доклад на научной конференции – «Комплексные проблемы гидрогеологии». СПб., СПбГУ, 2013, с. 16-19.

3. https://textarchive.ru/c-1032127-p23.html

4. Разумная Д.А. Катастрофический подъем уровня грунтовых вод в районе поселка Буланаш Свердловской области. Материалы конференции. СПб.: РГГМУ, 2023. С.80-86.

5. Обоснование интервала оптимальной глубины поддержания уровня подземных вод в шахтном стволе, обеспечивающее безопасное гидродинамическое состояние и отсутствие подтопления в жилой зоне п.Буланаш, включая коммуникации, а также, в садах на шахтном поле: отчет: 26-29/ ООО «Интекс». Екатеринбург: 2020.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕТРАЭДРАЛЬНЫХ СЕТОК ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ КАРКАСОВ МОДЕЛИ ГЛУБОКОГО КАРЬЕРА В ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЁТАХ

Расторгуев И.А., Литвинова И.В., Зайцев А.В., Иост Н.А., Ильин А.В., Зацарина С.В.
НИЦ «Курчатовский институт», АК «АЛРОСА»

Аннотация. В статье приводится описание геофильтрационной модели, основанной на применении тетраэдральной сетки. Такие сетки позволяют более подробно учесть фильтрационные неоднородности по вертикали в модели, не задавая дополнительных слоев.

Ключевые слова. *Тетраэдральная сетка, каркасная модель, призматическая сетка, слои, фильтрационная модель, Feflow.*

Abstract. The article describes a groundwater flow model based on the usage of a tetrahedral mesh. This mesh makes it possible to take into account groundwater flow heterogeneities in the model in more vertical details without specifying additional layers.

Keywords. *Tetrahedral mesh, wireframe model, prismatic mesh, layers, groundwater flow model, Feflow*

Введение

Существует большое количество сеточных методов для задания модельной дискретизации гидрогеологических задач. Наиболее популярный сегодня код Modflow (он реализован в пре-пост процессорах Processing Modflow, Visual Modflow, GMS, Model Muse и др.) ориентирован на использование призматических сеток. Это позволяет задать планово-пространственное (послойное) распределение гидрогеологических условий.

Однако, в случае выклинивания геологических слоев, наличия наклонно-залегающих разломов и сложных подземных сооружений (тоннелей, камер, выработок) такой подход имеет свои сложности. Как правило, это решается заданием дополнительных слоев (иногда более 40), чтобы учесть выклинивание. Это приводит к существенному увеличению размерности задачи, а вычисления на такой модели становятся весьма трудоемкими. Отказ от призматических сеток и переход к тетраэдральным сеткам на участках, где того требуют геологические условия, позволит существенно уменьшить размерность задачи, более точно задать инженерно-геологические условия и сократить временные затраты на вычисления.

Существуют примеры выполнения геологической дискретизации по вертикали, когда, используя специальные возможности моделирующей программы, слои выгибаются под уклон разломов [7]. Однако такая реализация требует разработки дополнительных кодов. Совершенно другой подход для дискретизации по вертикали при использовании тетраэдральных сеток предложен в работе [3]. Наиболее часто такие сетки применяются для для геомеханических расчётов [2].

В гидрогеологических задачах применение тетраэдральных сеток на основе кода Feflow [5] отмечены в работе [6]. В этот код, в отличие от программ, связанных с модулем Modflow, «зашиты» процедуры тетраэдрализации сетки на основе сеточного генератора Tetgen [8]. Это позволяет в областях, где гидрогеологические условия не требуют детального разбиения по вертикали, и реализуемая планово-пространственная

схематизация им полностью соответствует, использовать призматическую сетку. В местах, где требуется уточнение по вертикали, применяется тетраэдральная.

Разработка модели, описанная в данной работе, выполнена в среде Feflow. Авторами рассматривается комбинированная (с точки зрения дискретизации по вертикали) сетка модели. Для выполнения такой дискретизации подготовлены каркасы геологических условий, каркасные модели инженерных сооружений и прочее.

Каркасная модель — это широко используемый метод трехмерного картирования недр для подготовки цифровых моделей рельефа или сооружений в геодезии, гидрологии, геологии и горном деле. Каркасная модель отображает набор точек с известными (x, y, z) декартовыми координатами. Перед построением используется процедура построения сетки для размещения случайно расположенных полевых данных в регулярной сетке. В результате каркасного построения создается сетка (x, y) с высотой каждого узла сетки, соответствующего координате z в этой точке. Каркасная модель имеет ряд преимуществ перед другими методами 3D-моделирования за счёт простоты отображения и гибкости в использовании цвета для представления 3D эффектов.

Генерация или создание тетраэдральной сетки апробирована применительно к горной выработке (карьеру) алмазного месторождения. Были использованы каркасы существующего карьера трубки «Удачная», каркасы рудных тел, разломы. Алмазное месторождение расположено в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе, недалеко от одноименного города [1].

Размеры карьера «Удачный»: глубина 640 метров, размеры карьера по поверхности — 2000 х 1600 метров, по дну — 600 х 230 метров. Это самый крупный карьер в России и один из крупнейших в мире. Отработка трубки велась открытым способом, карьер «Удачный» был введен в эксплуатацию в 1971 г. и функционировал более 40 лет. Открытые горные работы были завершены в 2016 г. В 2014 г. введён в эксплуатацию подземный рудник «Удачный».

Каркасы для карьера были подготовлены для нескольких стадий разработки. На начало разработки 1985 год и далее на весь период разработки (см. рис. 1). Комбинированное представление трехмерной сетки показано на рисунке 2.

В области карьера задана тетраэдральная дискретизация. Вне карьера - призматическая. Из-за постепенного углубления карьера часть ячеек отключается по мере увеличения глубины карьера. В модели ячейки, ниже которых произошло углубление, отключаются (задаются неактивными).

Модель разрабатывалась и калибровалась по данным за период 1985-2002, по условиям эксплуатации карьера и одного из участков обратной закачки на данной территории.

Расчетная область ограничена по горизонтали урезами рек С и Д и водохранилищем С. На юге модели задано нулевое условие второго рода.

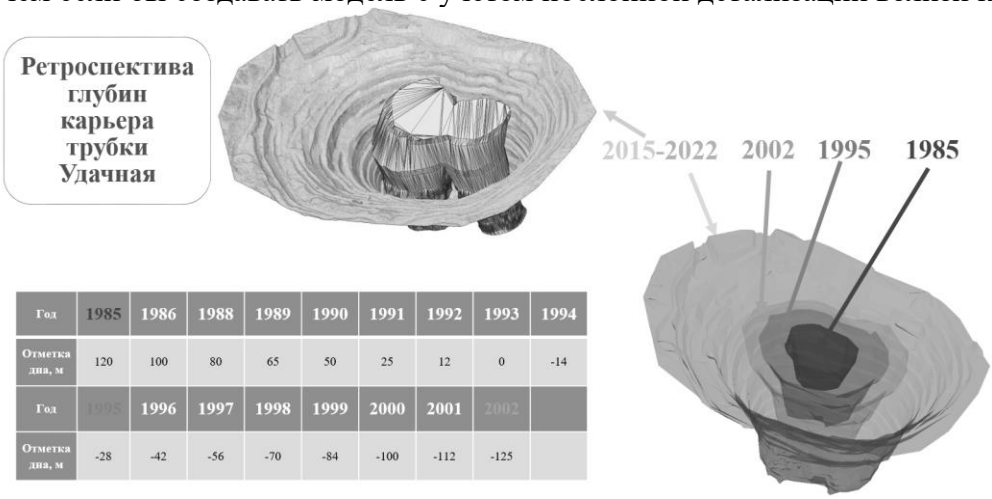
По вертикали модель сверху ограничена земной поверхностью, снизу отметкой минус 100 м (водоупор верхнекембрийского водоносного комплекса).

Поскольку условия эксплуатации объекта моделирования расположены в зоне вечной мерзлоты, задана мощность многолетнемерзлых пород (ММП) - 160 м. Отведение дренажных вод из карьера происходит в зону ММП и предполагает переток в подмерзлотное пространство.

Созданная таким образом модель с использованием тетраэдральных сеток была откалибрована по уровненному режиму более чем в 30 наблюдательных скважинах.

На основе калибровки коэффициенты фильтрации ММП (принимающего слоя) рассчитаны в диапазоне 1e-5 до 2 м/сут. Для верхнекембрийского водоносного комплекса (ВВК) от 1e-5 до 0.01 м/сут. Для даек и разломов была получена проводимость от 0.003 до 0.05 м/сут. Емкостные параметры, характеризующие упругую емкость породы, были от 1e-7 до 1e-5 1/сут. Пористость от 0.00005 до 0.001. По полученной калибровке был произведен прогнозный расчёт с оценкой приточности в карьер.

Время, затраченное специалистами на построение модели и последующие расчёты, за счет построения тетраэдральной сетки пространства оказалось существенно ниже, чем если бы создавать модель с учетом послойной детализации вблизи карьера.



Год	1985	1986	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Отметка дна, м	120	100	80	65	50	25	12	0	-14
Год	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	
Отметка дна, м	-28	-42	-56	-70	-84	-100	-112	-125	

Рис. 1. Представление стадий разработки карьера трубки «Удачная».

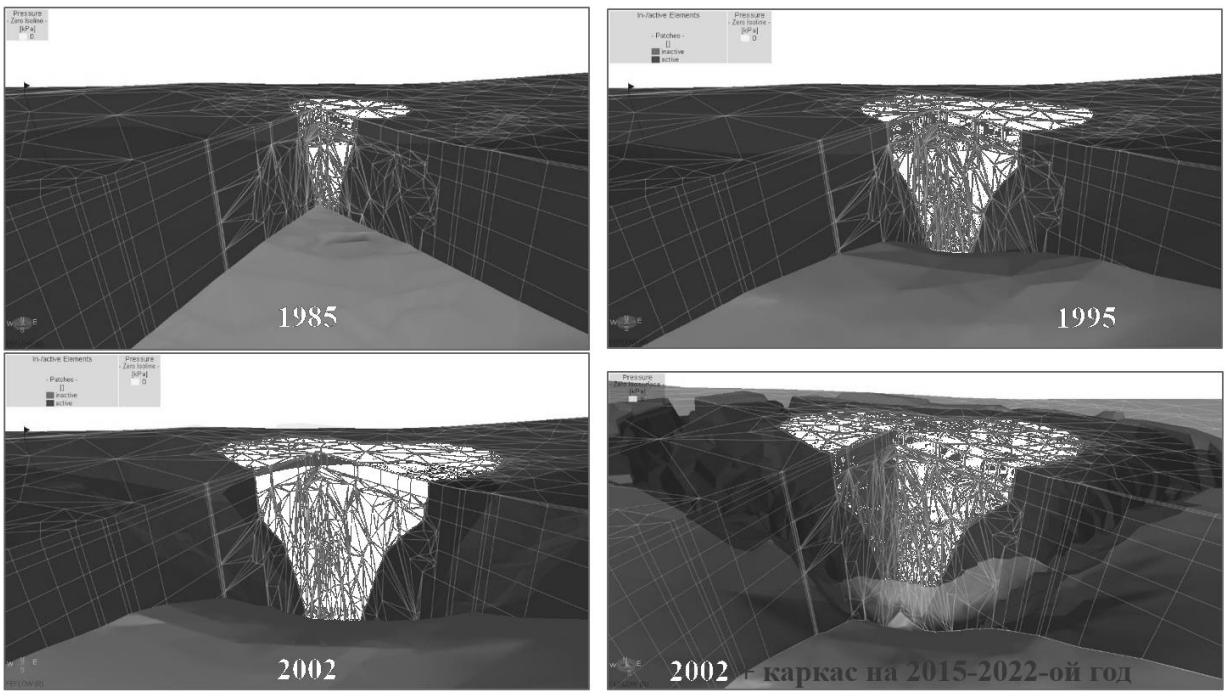


Рис. 2. Комбинированное представление трехмерной сетки. Светлой заливкой показаны отключенные (неактивные) ячейки. Темной – задействованные в расчетах

Выводы

Использование тетраэдральных сеток, построенных в программе Feflow, позволило более точно задать условия моделируемого объекта. По сравнению с использованием призматических сеток это существенно улучшило качество моделирования, ускорило выполнение калибровки и прогнозных расчётов.

Поэтому описанный подход с тетраэдральными сетками рекомендован к дальнейшему использованию специалистами в гидрогеологическом моделировании. Этому способствует развитие геологических кодов (Micromine), позволяющих готовить каркасы и, в конечном счете, упрощать работу специалистов по гидрогеологическому моделированию.

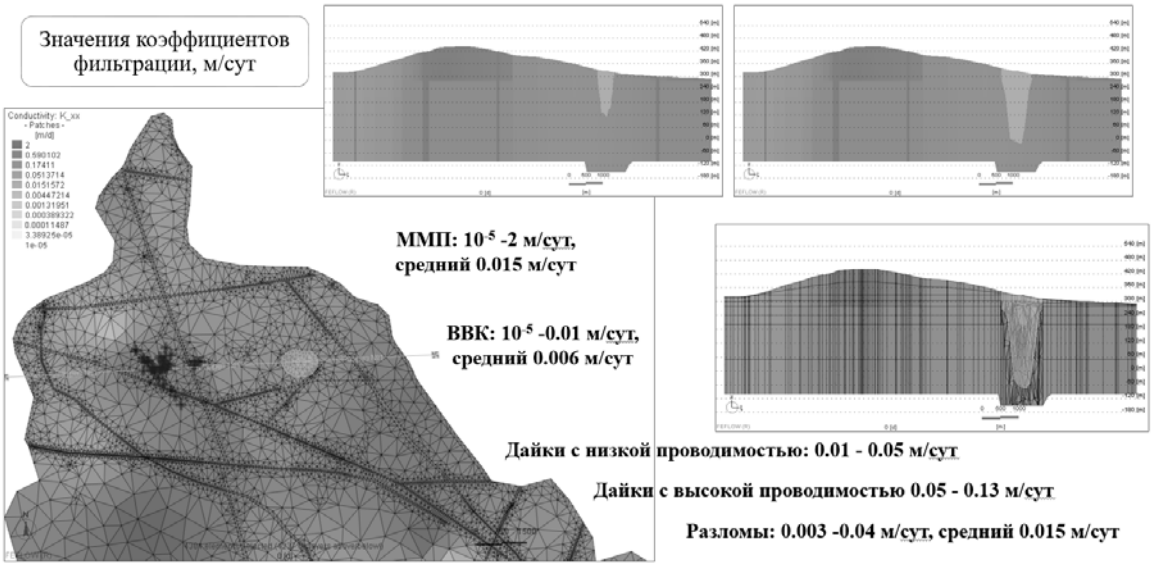


Рис. 3. Схема модельной области и дискретизация сетки в разрезе, проходящем через карьер. Красно-белой заливкой показано значение коэффициентов фильтрации

Список литературы

1. Анисимов К.А. Геомеханические проблемы при разработке подкарьерных запасов алмазосодержащих месторождений в условиях рудника «удачный» // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 5. – С. 29-36;

2. Баклыков, И. В. Влияние омоноличивания межстолбчатых швов на напряженно-деформированное состояние бетонной плотины Богучанской ГЭС при наполнении водохранилища / И. В. Баклыков // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, № 9(120). – С. 1133-1142. – DOI 10.22227/1997-0935.2018.9.1133-1142. – EDN YLRCST

3. Галанин М. П., Щеглов И. А. Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: итерационные методы. - Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2006. 009. - 32 с.

4. И. А. Расторгуев, Д. Д. Луканов. Применение кодов для динамической адаптации модельной сетки при решении задач водопонижения в среде DHI Feflow

5. Diersch, H.-J. G. (2005). FEFLOW Software - Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System - Reference Manual. - WASY GmbH, Berlin.

6. Dufour, RM, Aguirre, C, Sanchez, M, Maqueda, A, Zwinger, JM, Renz, A, Cho, J & Evans, D 2020, 'Pit dewatering optimisation of a 3D FEFLOW unstructured groundwater model at geologically complex Antamina mine site in Peru', in PM Dight (ed.), Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 1329-1348, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2025_91

7. Rastorguev, I.A., Mukhina, L.N. & Ermakova, D.A. Software DHI Feflow and Processing Modflow in Solving Groundwater Flow Problems for HPP Projects Design and Reconstruction in a Complex Geological and Hydrogeological Environment. Power Technol Eng 55, 172–178 (2021). https://doi.org/10.1007/s10749-021-01337-9

8. https://www.wias-berlin.de/software/index.jsp?id=TetGen

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗАКАЧНЫХ СКВАЖИН

Расторгуев И.А., Литвинова И.В., Хилько И.А., Синчук Е.В.
НИЦ «Курчатовский институт», ПАО Алроса

Аннотация. Для прогноза планируемой эксплуатации участка по отведению дренажных вод при отработке месторождения алмазов разработана фильтрационная модель. Созданная фильтрационная модель позволила предварительно оценить объемы отводимых дренажных вод и время эксплуатации участка. Создан математический алгоритм для поиска оптимального расположения закачных скважин с учетом геологического строения и экологических требований, предъявляемых к участку закачки.

Ключевые слова. *Отведение дренажных вод, фильтрационная модель, оптимизационный алгоритм, расположение скважин, Feflow.*

Annotation.
A groundwater flow model has been developed to predict the planned operation of the site for the removal of drainage water from the diamond deposit pit. The created model made it possible to estimate preliminarily the volumes of discharged drainage water and the operating time of the site. A mathematical algorithm has been created to find the optimal location of the injection wells taking into account the geological structure and environmental requirements for the injection site.

Keywords. *Disposal of drainage water, groundwater flow model, optimization algorithm, location of wells, Feflow.*

Применение математических методов в гидрогеологических расчётах становится одним из важных способов для оценки природных условий. Предварительные оценки, получаемые от расчётных моделей, позволяют существенно сократить капитальные затраты и упростить реализацию проектных решений с учетом гидрогеологических и экологических условий. Используя численные модели и решая прогнозные задачи, можно перебрать множество вариантов условий, провести анализ чувствительности к различным параметрам и выдать наиболее оптимальный результат. Однако такой перебор требует больших усилий специалиста и множественных вычислительных затрат.

В данной работе предлагается алгоритм, который производит подбор параметров автоматически направленным поиском и предлагает на выходе оптимальное решение для заданных условий. Примером такой реализации направленного поиска может выступать работа [4].

Математическая модель реализована для оценки способов утилизации дренажных рассолов в ММП (многолетнемерзлые породы). Возможность использования криогенных геологических структур и подмерзлотных водоносных горизонтов в криолитозоне для захоронения высокоминерализованных вод с минерализацией до 400 г/л зависит от региональных мерзлотно-гидрогеологических условий. Эти условия определяют зависимость природных резервуаров от фильтрационно-емкостных свойств поглощающего криогенного или водоносного горизонта, а также от мощности и текстурных особенностей перекрывающего мерзлотного экрана [1].

Для закачки дренажных рассолов в криогенные структуры используются преимущественно участки повышенной трещиноватости. Процесс закачки дренажных вод приводит к высвобождению дополнительного объема пустотности в ММП и образованию техногенного водоносного горизонта. Происходит увеличение емкостных показателей пород и их фильтрационной проницаемости [1]. Дополнительные емкостные параметры ММП на участках закачки формируются, главным образом,в результате фазового перехода воды из твердого состояния в жидкое при плавлении льда рассолами. Естественная (открытая)пустотность мерзлого массива низкая и не превышает первых процентов от общей потенциальной емкости резервуара.

Участок расположен на правом берегу реки Д., в Мирнинском районе Республики Саха (Якутия). Структурно-тектоническую картину участка закачки осложняет система

разломов: Октябрьский разлом северо-западного простирания, и система разломов, простирающаяся с юга на север, часть из которых выполнена дайками долеритов (Рис. 1а).

Поисково-оценочные работы выполнены в несколько этапов: бурение поисково-оценочных скважин, геофизические исследования в скважинах, опытно-фильтрационные работы (экспресс и кустовые наливы).

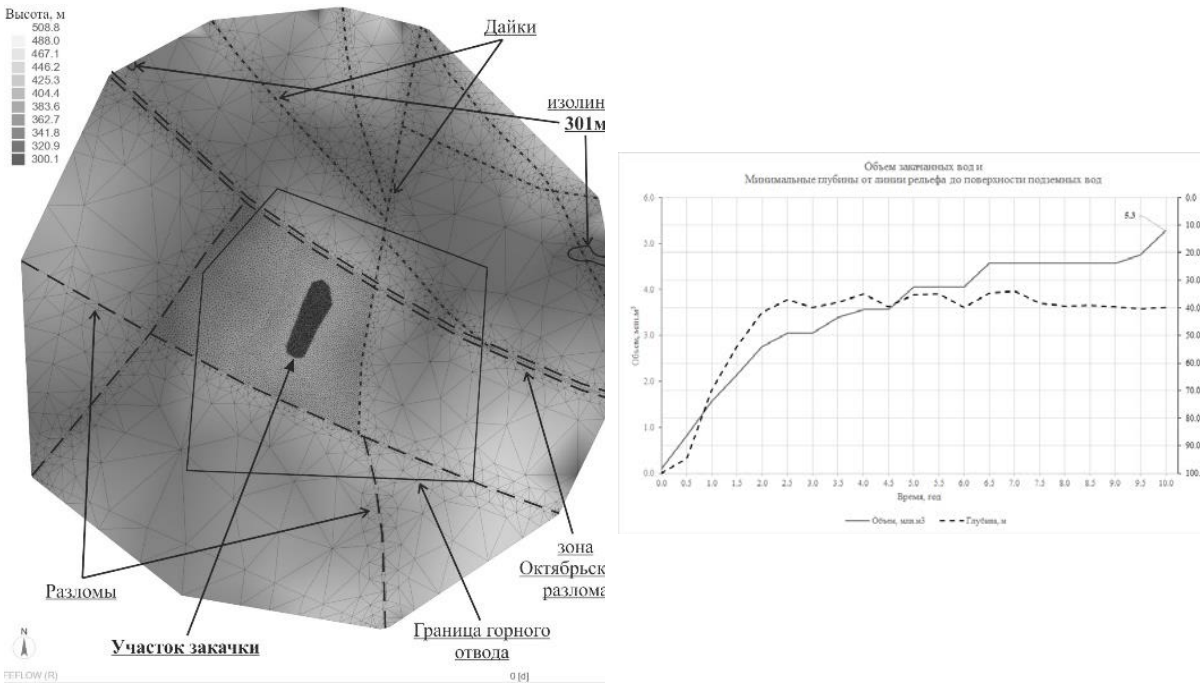


Рис. 1. а) рельеф, тектоника и конечно-элементная сетка модели. Сгущение сетки в центре показывает область участка закачки, где располагаются закачные скважины. б) графики закачки и глубины кривой репрессии

По результатам проведенных геолого-геофизических работ предварительно выделены наиболее перспективные пласты-коллекторы (под закачку дренажных рассолов). Основные проницаемые зоны (коллектора) определены в интервалах ~220-250 м, что соответствует показателям трещиноватых известняков моркокинской свиты. Основные свойства выделенных пластов-коллекторов, задаваемых в модели и уточненных по калибровке,приведены в таблице 1. Для трещиноватых зон (разломов и даек) были получены следующие значения параметров. Для разломов и даек коэффициенты фильтрации 0.01 м/сут и 0.02 м/сут, пористость и удельная упругая емкость получились (обоюдно) 0.0004 и 0.00001 1/м.

Моделирование проводилось в программном пакете DHI Feflow 7.4. Для моделирования принята округлая область размером 15 на 15 км с площадью около 165 км^2, в центре которой находится участок закачки (см. рисунок 1). Абсолютная отметка уреза воды р. Д. в пределах модели +300,0м, которая и является отметкой, регулирующей предельный уровень закачки. Количество узлов – 131985, количество ячеек – 225222, количество слоев в модели – 6. Размеры ячеек варьируются от 10 (более детальная дискретизация в зоне закачных скважин) до 2300 м. Область наибольшего сгущения сетки рассматривается как участок закачки (области разрешенной для расположения закачных скважин), в пределах которого задаются закачные скважины. Оптимальное расположение закачных скважин подбирается в рамках поискового алгоритма.

Таблица 1. Значения фильтрационно-емкостных параметров по результатам калибровки модели

№ слоя	Абс. отметки, м	Мощн. слоя, м	Значений коэффициентов фильтрации, м/сут	Значения удельной упругоемкости, 1/м	Пористость
1	от рельефа – 300	0.1-210	0.12	-	1e-6
2	300 – 278.5	21.5	0.14	1e-5	4e-4
3	278.5 – 257	21.5	0.14	1e-5	4e-4
4	257 – 220	37	0.14	1e-5	4e-4
5	220 – 160	60	0.14	1e-6	-
6	160 – 0	160	0.001	1e-6	-

Мощности слоев меняются от 0.1 (в зонах выклинивания) до 210 метров. Общая вертикальная мощность модели достигает 500 метров. Нижняя граница проведена на абсолютной отметке 0 м., за верхнюю границу принята поверхность рельефа. В соответствии с принятой для данной территории гидрогеологической стратификацией сверху вниз было выделено три расчетных слоя, один из них еще дополнительно разбит на 3 слоя.

При калибровке и дальнейших расчётах использовался модуль FreezeThaw75 [2] для учета свойств ММП и растепления мерзлоты.

Перед моделированием выполнялась калибровка модели путем решения обратной задачи, целью которой являлся подбор расчетных значений фильтрационных и емкостных параметров водоносных слоев так, чтобы при использовании полученных данных модельное пространственно-временное распределение уровней с приемлемой точностью согласовывалось с фактическими уровнями, полученными при опытно фильтрационных работах. По итогам калибровки (для расчета емкости и прогноза времени эксплуатации участка закачки) была разработана гидрогеологическая фильтрационная модель участка.

По результатам анализа полученного материала и результатам проведенного численного моделирование предварительно определены границы возможного распространения закачиваемых рассолов в коллекторах изученной структуры на участке в плане и разрезе, дано предварительное обоснование расчетных и максимально допустимых величин закачки дренажных вод.

Предполагается, что на участок закачки будет отводиться 1-1.2 млн $м^3$ дренажных и шахтных вод в год. Исходя из приведенных значений для закачки требуемого объема, предположительно потребуется обустройство нескольких (5-8) закачных скважин со средним дебитом закачки до 30 $м^3$/час, возможно увеличение или уменьшение дебита закачки в зависимости от стадии работ и заполнения участка. Планируемый режим закачки - безнапорный. Основной критерий, по которому останавливается закачка в модели – непревышение предельно допустимой отметки уровня. Эта предельно допустимая отметка (рис. 1б) для недопущения перелива не должна подниматься выше отметки рельефа минус 40 м во всех точках модельной области (включая низкие отметки уреза на р. Д – ~300 м). Таким образом, критерий недопущения перелива является параметром управления, ограничивающим закачку. Он проявляется как в точках закачки, так и на участках с низким рельефом. После достижения предельно допустимого уровня закачка останавливается. Она может быть продолжена, если в результате паузы уровень начнет восстанавливаться и упадет ниже предельных значений. В качестве искомых параметров задаются положения скважин, их координаты ***X, Y***. Рассматривается 5-8 скважин. Максимальное расчётное время закачки - 10 лет. При определенных условиях

это не является ограничением на время расчёта. Поскольку пласт на участке может быть заполнен еще до наступления этого момента. Закачка в модели будет остановлена и не сможет продолжаться, если уровень не восстанавливается до предельного значения (рис. 1б).

Расчет оптимального расположения закачных скважин

Разработанная и откалиброванная модель была далее использована в оптимизационном процессе. В качестве поисковой оптимизационной процедуры был задействован алгоритм Нельдера-Мида, основанный на симплекс-методе [5]. Многократные расчёты по этому алгоритму показали на выходе близкие или практически единые оптимальные расположения скважин, не зависящие от начального расположения в пределах области закачки.

Для решения поисковой оптимизационной процедуры так же использовали среды моделирования Feflow (перемещение узлов). Эта функция программы Feflow необходима, поскольку оптимизационный метод не способен выдавать координаты, точно совпадающие с дискретизацией, а именно с узлами конечно-элементной сетки. Для этого дополнительно была использована API функция MoveNode(x,y), встроенная в Feflow. Результаты применения этой функции для перемещения узлов приводятся в статье [3].

Целью выполнения оптимизирующей процедуры был поиск координат скважин, при которых пласт на участке закачки мог бы вместить максимально возможный объем отводимых рассолов с учетом геологических условий и экологических требований эксплуатации участка.

По результатам проведенного оптимизационного моделирования получен дополнительный объем в 450 тыс. $м^3$ за счет удачного (оптимального) расположения скважин. Что соответствует 3-5 месяцам работы предприятия (или эксплуатации участка при проектных условиях).

Следует отметить ход вычислений алгоритма и промежуточное расположение скважин, а также их взаимовлияние при увеличении числа закачных скважин. Для малого числа закачных скважин (5 штук) алгоритм, по сути, пытается отодвинуть закачные скважины подальше от областей с самым низким рельефом в пределах области закачки (области, разрешенной для расположения закачных скважин). Для большего числа скважин (8 штук) начинает сказываться их взаимовлияние. При близком расположении закачные скважины могут существенно увеличить уровень кривой репрессии и приводить к аварийному выходу рассолов близко к поверхности земли. Алгоритм это тоже учитывает и пытается отодвинуть закачные скважины подальше друг от друга и отводить их от точек с низким рельефом (рис. 3).

Заключение. По результатам проведенных геолого-геофизических исследований ОФР и геофильтрационному моделированию показан прогноз эксплуатации участка закачки дренажных вод по годам. Разработанная оптимизационная процедура позволила обосновать выбор принципиальной схемы закачки при дальнейшей опытно-промышленной эксплуатации и определить расположение закачных скважин, позволяющее закачать максимальный объем дренажных вод.

Полученный опыт применения оптимизационной процедуры будет также перенесен на другие участки закачки, где требуется оптимизация расположения скважин для увеличения объемов закачки дренажных вод.

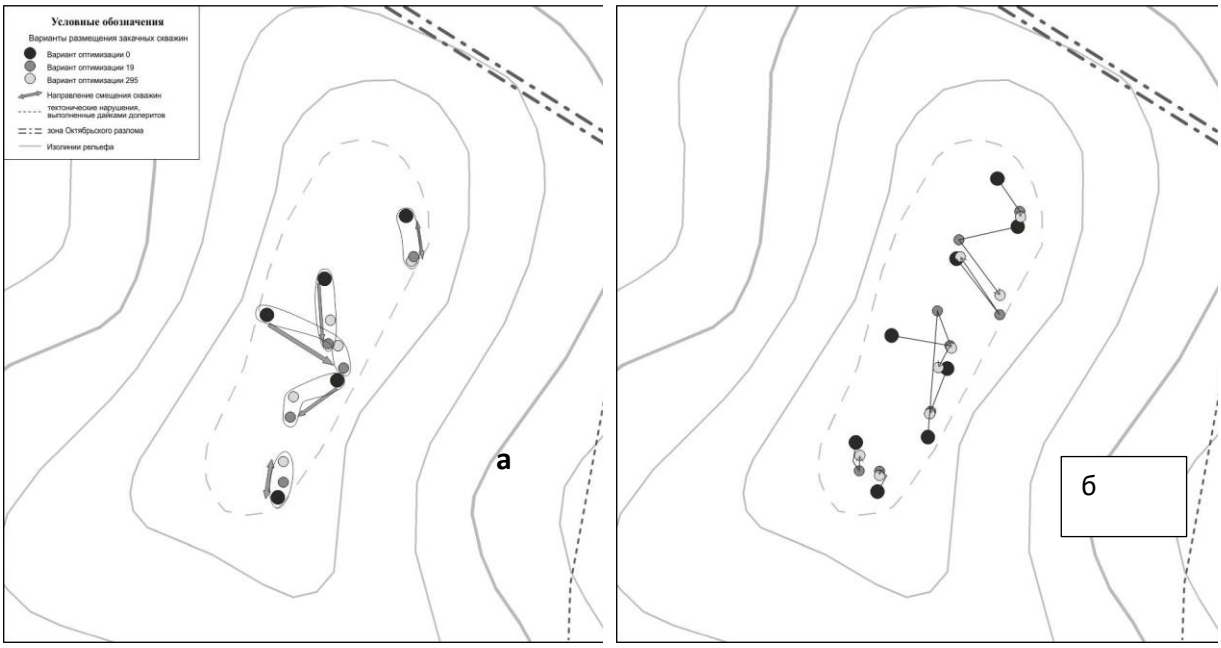


Рис. 2. Оптимизация расположения закачных скважин (а) – для 5 скважин, (б) для 8 скважин

Список литературы

1. Дроздов А.В. Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы) // Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2007, 296 с.

2. Расторгуев И.А., Литвинова И.В., Иост Н.А., Ильин А.В. МОДУЛЬ THAWFROST ДЛЯ РАСЧЁТА ТЕПЛО-МАССО-ПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ МЕРЗЛОТЫ. В сборнике: Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования. труды Всероссийской научной конференции с международным участием. Москва, 2023. С. 244-249.

3. Расторгуев И. А., Луканов Д. Д. Применение кодов для динамической адаптации модельной сетки при решении задач водопонижения в среде DHI Feflow.

4. Dufour, RM, Aguirre, C, Sanchez, M, Maqueda, A, Zwinger, JM, Renz, A, Cho, J & Evans, D 2020, Pit dewatering optimisation of a 3D FEFLOW unstructured groundwater model at geologically complex Antamina mine site in Peru', in PM Dight (ed.), Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 1329-1348, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2025_91

5. Gao, F. and Han, L. Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters. 2012. Computational Optimization and Applications. 51:1, pp. 259-277

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Рыбникова Л.С., Рыбников П.А.
[1]Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург,
luserib@mail.ru, ribnikoff@yandex.ru

Аннотация Свердловская область использует преимущественно поверхностные водные ресурсы для водоснабжения населения и промышленности (65 % от общего объема). Среднее значение модуля эксплуатационных ресурсов подземных вод составляет 1,25 л/с на км^2, что обусловливает относительно небольшие размеры прогнозных ресурсов локальных участков, характерных для большей части территории области (около 4 тыс. м^3/сут.). В системе водопотребления г. Екатеринбурга доля подземных вод не превышает 10%. Свободные ресурсы подземных вод, пригодные для использования в системе водоснабжения г. Екатеринбурга в радиусе до 100 км, отсутствуют. Принципиальное повышение роли подземных вод в балансе водоснабжения города (в пределе до 100 % от его общей потребности) возможно при использовании весьма удалённых от него объектов, в частности Сосьвинско-Шугультанского бассейна трещинно-карстовых вод с ресурсами около 900 м^3/сут. Этого количества достаточно для полного водообеспечения крупных городов Свердловской области (Екатеринбург, Нижний Тагил, В. и Н. Салда, Ивдель, и Североуральск).

Ключевые слова *поверхностные и подземные воды; Сосьвинко-Шегультанский бассейн трещинно-карстовых вод; ресурсы, запасы*.

Abstract The Sverdlovsk region uses mainly surface water resources for the water supply of the population and industry (65 % of the total volume). The average value of the modulus of operational resources is 1.25 L/s per km^2, which determines the relatively small size of the projected groundwater resources of local areas typical for most of the territory of the region (about 4 thousand m^3/day). The share of groundwater in the balance of water consumption in Yekaterinburg does not exceed 10 %. Free groundwater resources suitable for use in the city's water supply system Yekaterinburg, within a radius of up to 100 km, is missing. A fundamental increase in the role of groundwater in the balance of the city's water supply (up to 100 % of its total demand) is possible when using facilities very far from it, in particular the Sosvinsk-Shugultansky basin of fractured karst waters with resources of about 900 m^3/day. This amount is sufficient for full water supply to large cities of the Sverdlovsk region (Yekaterinburg, Nizhny Tagil, V. and N. Salda, Ivdel, and Severouralsk).

Key words *surface and groundwater; Sosvinko-Shegultan basin of fractured karst waters; resources, reserves.*

Общие сведения об источниках водоснабжения Свердловской области

Территория Свердловской области (население 4,24 млн чел) принадлежит бассейнам семи основных рек: Тавда, Тура, Пышма, Исеть (бассейн Карского моря), Чусовая, Уфа, Сылва (бассейн Каспийского моря). Естественные эксплуатационные ресурсы поверхностных вод области составляют 16,5 км^3/год. Общая величина прогнозных ресурсов подземных вод Свердловской области составляет 7,2 млн м^3/год, из них эксплуатационные запасы 0,52 млн м^3/год (степень изученности и разведанности 7,3%) [3].

Водные ресурсы Свердловской области отличаются значительной неравномерностью распределения не только во времени, но и по территории. Так, на бассейны р. Исеть и р. Пышмы с наибольшей концентрацией населения и промышленности (33 % населения области) приходится всего лишь 5% стока рек, а на бассейн р. Тавды, где проживает 3 % населения области, 53 % стока рек. В целом по Свердловской области водохозяйственный баланс рек положительный. Однако низкие величины минимального стока на большинстве рек и повышенное загрязнение отдельных участков рек обусловили дефицит водных ресурсов необходимого качества (до 30–80 % объема) в крупных городах Свердловской области: Екатеринбурге, Нижнем Тагиле, Первоуральске, Кировграде. Для покрытия дефицита построен целый ряд водохранилищ и прудов, а также производятся внутрибассейновые и межбассейновые переброски стока (табл. 1).

Таблица 1. Внутри- и межбассейновые бассейновые переброски стока рек Свердловской области

Вид переброски	Откуда	Куда	Объем, млн $м^3$/год
Внутрибассейновые (бассейн Каспийского моря)	р. Ревда (Ревдинское водохранилище)	р. Чусовая (Волчихинское водохранилище)	31,5
Межбассейновые (бассейн Каспийского моря - бассейн Карского моря)	р. Уфа (Нязепетровское водохранилище)	р. Западная Чусовая	88,33
	р. Чусовая (Волчихинское водохранилище)	р. Решетка (приток р. Исеть), р. Исеть (Верх-Исетское водохранилище)	7,88
	р. Аять (Аятское водохранилище)	р. Нейва (Верх-Нейвинское водохранилище)	7,97

Основные потребности населения и промышленности удовлетворяются за счет поверхностного, в основном зарегулированного стока. Суммарный забор воды из природных водных объектов составил 1002,4 млн. $м^3$/год, в том числе из поверхностных водных объектов составил 649,9 млн. $м^3$ (65 %), из подземных водных объектов 352,5 млн $м^3$ (35 %) [3]. Использование воды составило 647,2 млн $м^3$, из них 42 % на хозяйственно-питьевые нужды.

Среднее по Свердловской области значение модуля эксплуатационных ресурсов составляет 1,25 л/с на $км^2$, что обусловливает относительно небольшие размеры прогнозных ресурсов подземных вод локальных участков, характерных для большей части территории области (около 4 тыс. $м^3$/сут.). Максимальные величины модуля оцениваются в 5–7 л/с на $км^2$ на площади развития карбонатных пород в Уральской СГСО, слагающих Уфимское плато, и в районе Северо-Уральского бокситового рудника. Модуль добычи и извлечения подземных вод в среднем составляет 0,05 л/с на $км^2$.

По состоянию на 01.01.2023 на территории Свердловской области поставлено на баланс и находится на государственном учете 750 месторождений (участков месторождений) подземных вод, в том числе 603 месторождения питьевых подземных вод и 147 месторождений (участков) технических подземных вод. Суммарные запасы по всем месторождениям (участкам) подземных вод составляют 1422,1 тыс. $м^3$/сут (в том числе 51 % ддя промышленного освоения). 678 месторождений (91%) относятся к категории мелких (запасы до 5 тыс. $м^3$/сут), 68 (9%) – к категории средних (с запасами от 5 до 50 тыс. $м^3$/сут). Единственным крупным месторождением питьевых подземных вод (с запасами более 100 тыс. $м^3$/сут) является Сергинское месторождение [4, 9].

На водозаборах добыто 399,4 тыс. $м^3$/сут подземных вод. Из 747 разведанных месторождений (участков) питьевых и пресных технических подземных вод в 2020 г. эксплуатировался 431 объект, суммарная добыча на них составила 333,7 тыс. $м^3$/сут; на месторождениях с забалансовыми запасами подземных вод эксплуатировалось 23 объекта с суммарной добычей 5,2 тыс. $м^3$/сут. Величина использования подземных вод на водозаборах составляет 399,0 тыс. $м^3$/сут (44,1 % от общего водоотбора). С учетом использования вод на объектах извлечения – 410,4 тыс. $м^3$/сут (45,4 % от общего водоотбора).

При шахтном, карьерном водоотливе, из скважин вертикального дренажа в 2022 г. в Свердловской области извлечено 549,7 тыс. $м^3$/сут питьевых и технических (пресных) подземных вод, Сброс без использования составил 460,8 тыс. $м^3$/сут

Использование подземных вод для водоснабжения крупных городов России

По сравнению с поверхностными подземные воды имеют более высокую защищенность от загрязнения (что позволяет использовать их в районах с высокой техногенной нагрузкой), более высокое качество (что снижает затраты на

водоподготовку). В России доля подземных вод в водоснабжении практически всех крупных городов, таких как Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Омск, Екатеринбург, Челябинск, Нижний Новгород, Волгоград, Самара и др., ничтожна [1]. Это связано с тем, что, как правило, вблизи крупных мегаполисов подземные водные объекты, обладающие достаточными ресурсами, отсутствуют, поэтому водоснабжение проще организовать за счет поверхностных источников. При этом в большинстве крупных городов Европы с населением более 1 миллиона человек, таких как Амстердам, Брюссель, Будапешт, Вена, Гамбург, Копенгаген, Лиссабон, Мюнхен, Рим и др., для водоснабжения используются подземные воды. В 2010 г. для водоснабжения г. Баку был пущен в эксплуатацию водовод длиной 260 км, по которому в город подается около 450 тыс. $м^3$/сут подземных вод [1].

Возможности использования подземных вод для водоснабжения г. Екатеринбурга

Водообеспечение города Екатеринбурга (население 1,4 млн. чел.) осуществляется практически полностью за счет ресурсов поверхностных вод верховьев рек Чусовой, Ревды, Исети и Уфы (доля подземных вод около 10 %). Основным является каскад водохранилищ Верхнее-Макаровского и Волчихинского на реке Чусовой; Ново-Мариинского и Ревдинского на р. Ревда. Эта водохозяйственная система восполняет свой ресурс за счет межбассейновой переброски стока реки Уфы, на которой в 1976 г. было создано Нязепетровское водохранилище (Челябинская область). Последнее (вместе с оз. Увильды) обеспечило водоснабжение города во время и после «исторической засухи» 1975 г., когда в системе его водообеспечения сложилась чрезвычайная ситуация.

Сложности с подачей воды из Нязепетровского водохранилища появились в последние годы, после начала использования водных ресурсов реки Уфы для водоснабжения г. Челябинска (переброска из Долгобродского водохранилища в бассейн реки Миасс).

Привлечение водных ресурсов из отдаленных водоемов является одной из слабых сторон системы водообеспечения города: расходы на перекачку воды достигают 1 млн руб. в день. Однако на сегодняшний день переброска стока остается единственным вариантом покрытия дефицита воды по Екатеринбургскому промышленному узлу.

Общее водопотребление города в настоящее время составляет 193 млн $м^3$/год (528,8 тыс. $м^3$/сут) или 385 л/сут на человека [5], что соответствует крупным городам Российской Федерации и в несколько раз превышает показатели развитых стран. Расчетное водопотребление возрастет до 265 млн $м^3$/год [10].

Концепцией водной безопасности Свердловской области предусмотрено создание дополнительных и резервных источников водоснабжения г. Екатеринбурга. Независимый тракт водоснабжения с дополнительным объёмом воды 100–150 млн $м^3$/год (около половины от общей потребности города Екатеринбурга) планируется организовать из двух новых водохранилищ на реках Шишим и Дарья (притоки р. Чусовой). Однако вопрос строительства этих водоемов остаётся спорным, как по экологическим, так и по технико-экономическим соображениям [2].

Оценка возможности организации водоснабжения г. Екатеринбурга из подземных источников определяется, с одной стороны, их ресурсным потенциалом, с другой - технико-экономическим обоснованием целесообразности реализации мероприятий по привлечению их ресурсов с отдаленных территорий.

Ресурсы подземных вод территории г. Екатеринбурга

На территории г. Екатеринбург разведано 57 месторождений подземных вод с эксплуатационными запасами 44 тыс. $м^3$/сут, из них эксплуатируется 31 объект с водоотбором 14 тыс. $м^3$/сут, в том числе 20 - для хозяйственно-питьевого водоснабжения. На территории города пробурено около сотни одиночных водозаборных скважин, которые отбирают порядка 14 тыс. $м^3$/сут воды. Всего на территории города, с учетом дренажных вод метрополитена, извлекается 57 тыс. $м^3$/сут подземных вод, из них

используется 30 тыс. м^3/сут, в том числе для хозяйственно-питьевого водоснабжения 21 тыс. м^3/сут.

Потенциальные эксплуатационные ресурсы питьевых подземных вод на незастроенной территории г. Екатеринбурга (880 км^2) составляют 115 тыс. м^3/сут [6]. Однако размещение водозаборов здесь возможно только в пределах перспективных участков суммарной площадью около 100 км^2, при этом эксплуатационные ресурсы оцениваются модулем подземного стока около 2 л/с*км^2. Их можно использовать путем создания небольших по производительности и рассредоточенных по площади водозаборов, которые сейчас частично разведаны в Калиновском и Юго-западном лесопарках города (запасы около 700 м^3/сут).

Эксплуатационные ресурсы подземных вод застроенной части города (около 500 км^2), формирующиеся преимущественно за счет утечек из городских водонесущих коммуникаций, характеризуются модулем подземного стока около 7 л/с*км^2 [6]. Эти ресурсы частично могут быть использованы для целей технического водоснабжения предприятий при условии, что к ним не предъявляется особых требований к качеству воды и что эти «утечки» будут существовать и в дальнейшем.

Таким образом, использование подземных вод для водоснабжения населения города Екатеринбурга базируется на ресурсах и запасах как застроенной территории города, так и его ближайших окрестностей посредством эксплуатации небольших групповых и одиночных водозаборов. По количеству добываемых подземных вод их среднегодовая производительность не превышает 10 % общего водопотребления мегаполиса. Существенная оптимизация добычи невозможна из-за ограниченности ресурсного потенциала подземных вод, который и в дальнейшем целесообразно использовать для локального и резервного водообеспечения населения, а также для обеспечения качественной водой на экологически благополучных участках предприятий по её розливу (бутилированию).

Ресурсы подземных вод в районе г. Екатеринбурга

Свободные ресурсы подземных вод, которые могут обеспечить работу водозаборов с производительностью более 0,5 тыс. м^3/сут, в радиусе 30 км от города практически отсутствуют, поскольку активно используются для водоснабжения пригородов г. Екатеринбурга. На более удаленных территориях (примерно до 100 км от города) имеются следующие относительно крупные объекты.

Для водоснабжения Первоуральско-Ревдинского промышленного узла в 60 годы XX века было разведано достаточно крупное Сергинское месторождение подземных вод. Оно расположено в 80 км на запад от г. Екатеринбурга, в долине р. Серга (правый приток р. Уфы, бассейн р. Камы), запасы утверждены в количестве 130 тыс. м^3/сут. В настоящее время добыча подземных вод не превышает 26–28 тыс. м^3/сут (20 %), вода подается по водоводу длиной около 30 км. Освоение Сергинского месторождения позволит полностью обеспечить водой города Первоуральск и Ревда (потребность 70 и 23 тыс. м^3/сут, соответственно).

Уткинское месторождение, разведанное в 60 годы, расположено в долине р. Утки на расстоянии более 50 км от Екатеринбурга и до настоящего времени не эксплуатируется. Утвержденные запасы (несколько участков) 42 тыс. м^3/сут, прогнозные ресурсы оцениваются величиной около 100 тыс. м^3/сут. Возможность и целесообразность использования для водоснабжения г. Екатеринбурга Уткинского месторождения подземных вод требует серьезного гидрогеологического и технико-экономического обоснования.

Таким образом, привлечение имеющихся ресурсов и запасов подземных вод с водных объектов, удалённых от города до 100 км, ограничивается двумя обстоятельствами. Во-первых, общие ресурсы, пригодные для добычи и использования, рассредоточены по площади и представляют собой взаимно удалённые объекты с запасами до 20-40, в одном случае – до 100-130 тыс. м^3/сут при суммарной их оценке

порядка 200-220 тыс. м^3/сут. Во-вторых, около половины их общего ресурсного потенциала должно быть направлено на водообеспечение находящихся вблизи них конкретных потребителей (гг. Первоуральск, Ревда, Полевской, Нижние Серги, Михайловск и др.). Освоение ранее разведанных месторождений подземных вод позволит снизить нагрузку на бассейн р. Чусовой [8].

Ресурсы подземных вод Сосьвинско-Шегультанского бассейна подземных вод

Полное водообеспечение г. Екатеринбурга возможно за счет привлечения ресурсов подземных вод с северной территории области, с расположенного здесь в пределах горно-складчатого Урала перспективного Сосьвинско-Шегультанского бассейна подземных вод [7, 8].

Ресурсные и эксплуатационные возможности Сосьвинско-Шегультанского бассейна трещинно-карстовых вод изучались в течение последних лет в связи с эксплуатацией Североуральских бокситовых месторождений, три из которых (Кальинское, Ново-Кальинское, Черёмуховское) расположены на площади этого бассейна. При этом была установлена чрезвычайно высокая водообильность карстовых водоносных зон и систем, сезонная и многолетняя цикличность восполнения их ресурсов и запасов. Указанный бассейн подземных вод расположен в пределах Северо-Уральской карстовой области, сложенной карбонатными и терригенно-карбонатными породами силурийской и девонской систем нижнего палеозоя, и характеризуется высокой закарстованностью карбонатных разностей пород.

По всеобщему признанию Северо-Уральский бокситовый район является уникальным гидрогеологическим объектом, не имеющим себе равных в России и за ее пределами. Сложность геологической структуры продуктивной толщи, обусловленная ее тектонической нарушенностью, фациальная изменчивость пород в плане и в разрезе, высокая проницаемость карбонатных отложений, сопровождаемая их закарстованностью, интенсивное питание подземных вод за счет инфильтрации атмосферных осадков и поглощения речного стока - все это обусловило высокий уровень обводненности подземных разработок.

На площади Сосьвинско-Шегультанского бассейна подземных вод, наряду с шахтным водоотливом, действовали несколько крупных дренажных кустов. При выборе мест их заложения учитывалось, во-первых, наличие участков (блоков) известняков с максимальной закарстованностью и водообильностью, развитых по тектоническим нарушениям на глубину 500-700 метров; во-вторых, их обязательное расположение на периферии шахтных полей. Первое обеспечивало возможность сосредоточенного извлечения из недр подземных вод с расходом до 70-120 тыс. м^3/сут и понижением уровня на участке ДУ до 150-180 метров; второе обеспечивало откачку воды и частичное осушение карбонатного массива еще «на подходе» к защищаемым объектам на отметках 200-600 м выше горных работ. Сейчас действуют только два дренажных узла из 30 водопонизительных скважин (основных и резервных) с суммарной среднегодовой производительностью около 150–180 тыс. м^3/сут. Шахтный водоотлив из Кальинской, Ново-Кальинской и Черёмуховской шахт составляет при этом около 80 тыс. м^3/сут. Вся извлекаемая здесь вода почти полностью сбрасывается в речную сеть без использования. Приведенные значения текущих размеров извлечения подземных вод дренажными узлами не являются максимально возможными - они соответствуют сложившимся в последнее время объёмам, темпам и технологии ведения горных работ.

Разведанным в пределах Сосьвинско-Шегультанского бассейна является Кальинское месторождение подземных вод. Оно представлено дренажными узлами скважин, защищающих расположенные здесь шахтные поля с северо-востока. Область формирования ресурсов подземных вод, каптируемых дренажными скважинами, находится в естественных условиях, характеризуется благоприятными санитарно-экологическими условиями, вмещающие породы химически инертны. Качество воды

стабильно хорошее, общая минерализация подземных вод составляет 0,2-0,3 г/дм^3, жёсткость воды не превышает 3-4 мг-экв/дм^3, перманганатная окисляемость менее 1 мг/л O_2, вода здоровая в санитарно-микробиологическом отношении и безопасная по радиологическим показателям.

Качество подземных вод в шахтном водоотливе подвержено техногенному влиянию, что приводит к высокому содержанию механических примесей, высоким концентрациям окислов алюминия, железа, кремния, присутствию окислов азота, неудовлетворительным санитарно-бактериологическим показателям. В отличие от этого качество подземных вод, извлекаемых дренажными узлами выше горизонтов горных работ и за пределами территории горнопромышленных объектов, является высоким и устойчиво отвечает современным питьевым стандартам. Площадь формирования подземных вод, также как и водосборы участвующих в восполнении их ресурсов поверхностных вод, не заселены и представляют собой естественный горнолесной ландшафт с благополучной экологической обстановкой.

Реализация ресурсного потенциала Сосьвинско-Шегультанского бассейна в виде эксплуатационных запасов подземных вод, подготовленных к промышленному освоению, а также практическое осуществление предлагаемой добычи воды и её транспортировки до конкретных потребителей на расстояние до 350-450 км несомненно представляет собой достаточно сложный и дорогостоящий проект. В его составе следует решить ряд взаимосвязанных задач: выполнить геолого-гидрогеологическое обоснование, подсчитать и утвердить в установленном порядке запасы подземных вод; выполнить сравнительные технико-экономические оценки и проектно-технические проработки; изучить юридическо-правовые аспекты недро- и земелепользования и др. На это потребуется длительное время, но несмотря на кажущуюся утопичность предлагаемого проекта из-за удалённости объектов добычи подземных вод, это наиболее перспективный, надёжный и долговечный вариант обеспечения питьевой водой гор. Екатеринбурга.

Ресурсный потенциал Сосьвинско-Шегультанского бассейна трещинно-карстовых подземных вод вместе с соседними Вагранским (с юга) и Тошемско-Ивдельским (с севера) бассейнами оценивается величиной около 900 тыс. м^3/сут. Этого количества достаточно для обеспечения водой высокого качества крупных городов Свердловской области, включая Екатеринбург, Нижний Тагил, Нижняя и Верхняя Салда и др. [7, 8].

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022-2024 гг.) «Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании» (FUWE-2022-0002) г. р. № 1021062010532-7-1.5.1.

Список литературы

1. Боревский Б.В., Данилов-Данильян В.И., Зекцер И.С., Палкин С.В. Использование пресных подземных вод для улучшения водообеспеченности городского населения // Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции «Устойчивость водных объектов, водосборных и прибрежных территорий; риски их использования», Калининград, 25-30 июля 2011. Калининград: Капрос, 2011. С. 25-34.

2. Водоснабжение Екатеринбурга достигло критической отметки. Областная газета. 11 марта 2013. http://www.oblgazeta.ru/economics/7255/

3. Государственный доклад "О состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2022 году". Екатеринбург: МПР СО. 2023. 366 с.

4. Информационный бюллетень о состоянии недр территории Уральского федерального округа Российской Федерации за 2022 год. Выпуск № 23. Екатеринбург, 2023. 343 с.

5. Концепция водной безопасности Свердловской области на период до 2020 года. Постановление Правительства Свердловской области от 05.08.2011 г. № 1029-ПП.

6. Меньшикова Ю.С. Инвентаризация и изучение действующих водозаборов на территории города Екатеринбурга для обоснования их эксплуатации в чрезвычайных ситуациях. Екатеринбург: ОГУП

«Уральский территориальный центр мониторинга геологической среды». 2003.

7. Оценка ресурсного потенциала подземных вод для питьевого водоснабжения населения и обеспечения водой объектов промышленности на территории РФ. М.: ЗАО «ГИДЭК», 2011. 300 с.

8. Палкин С.В., Палкин С.С., Рыбникова Л.С. О возможности полного водообеспечения города Екатеринбурга подземными водами // Водное хозяйство России. 2011. № 5. С. 75-88.

9. Пояснительная записка к сводным данным о состоянии ресурсной базы подземных вод территории Свердловской области в 2020 году. Екатеринбург: филиал ФГБУ «Гидроспецгеология» «Уральский региональный центр ГМСН». 2021. 22 с.

10. Стратегический план развития муниципального образования «город Екатеринбург» до 2020 года. Одобрен решением Екатеринбургской городской Думы от 26.10.2010 №67/30.

ОСОБЕННОСТИ НАРУШЕНИЯ ЗАКОНА ДАРСИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ

Тагильцев С.Н.*[1], Сурганов С.В.[1], Тагильцев В.С.[1]

[1]Уральский Государственный Горный Университет. E-mail: tagiltsev@k66.ru

Аннотация. Принято считать, что нарушение верхней границы применимости основного закона фильтрации (закона Дарси) происходит очень редко, при больших дебитах скважин и значительных напорах. Данное представление является не совсем правильным. В скважинах среднего диаметра, вскрывающих одну или небольшое количество трещин, критический расход, при котором нарушается закон Дарси, может составить не более 20-30 м^3/сут. В качестве критерия, определяющего возникновение нелинейности в трещинах, удобно использовать величину критического расхода на единицу ширины потока (единичный расход). В качестве параметра, определяющего возникновение и развитие нелинейности в скважинах, следует использовать величину отношения расхода к радиусу скважины, отражающую единичный расход плоскорадиального потока. Переходный режим течения, который возникает при нарушении ламинарного режима в трещинах горных пород, подчиняется линейному закону сопротивления, но характеризуется значительным снижением фильтрационных показателей. При нестационарном режиме откачки, по мере развития депрессионной воронки, значение параметра водопроводимости в прискважинной зоне, в которой возникает нарушение закона Дарси, уменьшается. В связи с этим, фильтрационной сопротивление прискважинной зоны при нестационарном режиме откачек постоянно возрастает. Временные графики, построенные по данным опытных скважин, сохраняют форму прямой линии, но угол наклона этой прямой к временной оси существенно больше, чем при сохранении ламинарного режима течения при восстановлении уровня после откачек.

Ключевые слова: *закон Дарси, переходный режим, критический расход, зона нелинейности, нестационарный режим.*

Abstract. It is generally believed that violation of the upper limit of applicability of the basic filtration law (Darcy's law) occurs very rarely, with large well debits and significant pressures. This representation is not entirely correct. In medium-diameter wells that open one or a small number of cracks, the critical flow rate at which Darcy's law is violated can be no more than 20-30 m^3/day. As a criterion determining the occurrence of nonlinearity in cracks, it is convenient to use the value of the critical flow rate per unit of flow width (unit flow rate). As a parameter determining the occurrence and development of nonlinearity in wells, the value of the ratio of flow to the radius of the well should be used, reflecting the unit flow rate of a plane-radial flow. The transient flow regime, which occurs when the laminar regime is violated in rock cracks, obeys the linear law of resistance, but is characterized by a significant decrease in filtration parameters. In non-stationary pumping mode, as the depression funnel develops, the value of the water supply parameter in the downhole zone, in which a violation of Darcy's law occurs, decreases. In this regard, the filtration resistance of the downhole zone under non-stationary pumping mode is constantly increasing. The time graphs constructed according to the data of experimental wells retain the shape of a straight line, but the angle of inclination of this straight line to the time axis is significantly greater than when maintaining the laminar flow regime when restoring the level after pumping.

Keywords: *Darcy's law, transient mode, critical flow, non-linearity zone, non-stationary mode.*

Линейный закон фильтрации (закон Дарси) считается основой фильтрационных расчетов. Принято считать, что нарушение верхней границы основного закона фильтрации происходит очень редко, при больших дебитах скважин и значительных напорных градиентах (понижениях, напорах) [1-4]. Данное представление является не совсем правильным.

С гидравлических позиций линейный закон фильтрации отождествляется с ламинарным течением жидкости в трубах (порах) и щелях (трещинах). Нарушение ламинарного режима течения (ЛРТ) обычно связывается с переходом к турбулентному режиму течения (ТРТ). Между ЛРТ и полностью сформировавшимся турбулентным режимом течения наблюдается достаточно широкий диапазон скоростей (расходов), при которых происходит переход от ламинарного к турбулентному режиму течения. В гидрогеологической практике особое значение имеет первый этап переходного режима течения (ПРТ), который граничит с ламинарным режимом течения. Граница между ламинарным и переходным режимом течения имеет четкий, скачкообразный характер [5,6]. В гидравлике эта граница определяется числом Рейнольдса (Re).

Для решения гидрогеологических задач удобно применять значение критического расхода на единицу ширины потока ($q_{кр}$) для линейного потока и отношение дебита скважины к ее радиусу ($Q_{кр}/r_c$) для плоскорадиального потока подземных вод [1,5,6]. Значение этих показателей для одиночной щели (трещины), в зависимости от температуры и значения кинематической вязкости представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Критические показатели для одиночной трещины

t воды ˚С	4	6	8	10
ν, м^2/сут	0,136	0,127	0,120	0,113
q, м^2/сут	60	56	53	50
Q/r_c, м^2/сут	375	350	332	313

Величина Q/r_c, которую следует применять при опробовании подземных вод, имеющих температуру от 4 до 7 градусов, составляет от 320 до 375 м^2/сут. В скважинах, имеющих средний радиус в пределах от 0,05 до 0,1 м и вскрывающих одну (главную) трещину, критический расход составит от 17 до 35 м^3/сутки (от 0,2 до 0,4 л/с).

В скальных массивах гидрогеологические скважины чаще всего вскрывают относительно небольшое количество водоносных трещин и поэтому нарушение закона Дарси не является очень редким явлением. Зона ПРТ возникает вблизи опытной скважины и имеет небольшие размеры. Представления об одной или небольшом количестве действующих трещин в пласте являются вполне реальными. Водопроводимость трещины (щели) и, соответственно, расход в ней определяется третьей степенью раскрытия трещины:

$$T = \frac{g\delta^3}{12\nu}; (1)$$

где T – водопроводимость, м^2/сут; g – ускорение свободного падения, 7,2 *10^{10} м/сут^2; ν – кинематический коэффициент вязкости, м^2/сут; δ – раскрытие трещины, м.

Из выражения (1) следует, что даже небольшое различие в раскрытии трещин приводит к тому, что основная часть расхода в трещиноватом пласте локализуется в небольшом количестве наиболее раскрытых (главных) трещин. В этих же трещинах возникает и развивается нарушение линейного (ламинарного) закона фильтрации.

Диапазон расходов, который граничит с ЛРТ, и относится к переходному режиму течения (ПРТ), отличается характерным законом сопротивления, т.е. связью между скоростью фильтрации (расходом) и градиентом напоров. При превышении критического расхода скачком увеличиваются потери напора, т.е. уменьшается проницаемость щели, что выражается в значительном уменьшении значения водопроводимости в зоне

развития ПРТ. Очень важно отметить, связь расхода и напорного градиента сохраняется линейной, и подчиняется линейному закону сопротивления [5, 6]. Таким образом, в зоне развития ПРТ линейный закон сопротивления сохраняется, но фильтрационное сопротивление существенно увеличивается, что выражается в значительном снижении значения водопроводимости пласта в зоне нарушения ламинарного режима течения ($T_н$).

Многочисленные лабораторные эксперименты [5, 6] и данные полевых наливов и нагнетаний показали, что при ступенчатых изменениях дебита, выполненных с достижением стационарного режима, размер зоны ПРТ меняется, но значение водопроводимости в этой зоне ($T_н$) сохраняется неизменным [6, 7].

По данным экспериментальных исследований, значение $T_н$ связано с величиной водопроводимости пласта (T) и размерами депрессионной воронки:

$$T_H = \frac{T}{\beta \ln(R/r_c)}, \quad (2)$$

где R/r_c – отношение радиуса питания к радиусу скважины; β – эмпирический коэффициент, который имеет среднее значение 1,5.

Из выражения (2) следует, что при нестационарном режиме откачки, по мере развития депрессионной воронки, значение $T_н$ уменьшается, и растет фильтрационной сопротивление прискважинной зоны (зоны ПРТ).

В результате анализа развития нестационарного режима в зоне ПРТ получена зависимость, описывающая понижение уровня в опытной скважине (S_c) от логарифма времени (ln t). Эта зависимость имеет форму прямой линии, но угол наклона этой прямой к оси ln t (lg t) существенно больше, чем при сохранении ламинарного режима течения (ЛРТ) в прискважинной зоне.

Соотношение уклонов временных графиков (тангенсов углов наклона прямых линий зависимости S_c от ln t), построенных по данным опытной центральной скважины ($C_н$) и ближайших наблюдательных скважин (C) описывается зависимостью:

$$\frac{C_H}{C} = 1 + \beta \ln(r_H / r_C), \quad (3)$$

где $r_н/r_c$ – соотношение радиуса зоны нарушения ЛРТ и радиуса скважины.

При восстановлении уровня в опытных скважинах после откачки, уклон графиков ($C_в$) восстановления уровня (ΔH) от логарифма времени восстановления (ln $t_в$) соответствует уклону графиков, полученных в зоне ЛРТ. Данный факт показывает, что зона развития ПРТ быстро исчезает при отключении возмущающего фактора (дебита). Таким образом, соотношение $C_н/C_в$ является характерным признаком развития переходного режима течения (ПРТ) в опытных скважинах. Данное соотношение ($C_н/C_в$) позволяет рассчитать размеры зоны ПРТ и оценивать значения гидродинамических характеристик, описывающих процесс нарушения линейного закона фильтрации.

При малых и средних удельных дебитах скважин (до 100 $м^2$/сутки) в начальный период откачек на временных графиках обязательно фиксируется влияние емкости ствола скважины [2, 7]. Этот период имеет характерный вид и выражается «крутым» участком на графиках S÷lg t и ΔH÷lg $t_в$. Начальный («крутой») участок графиков имеет уклон ($C_у$) в 3÷5 раз больше, чем расчетный участок ($C_р$), отражающий поступление воды из пласта.

Формирование вблизи опытной скважины зоны переходного режима течения вызывает существенное увеличение понижения уровня в опытной скважине, и соответственно, влечет значительное снижение величины удельного дебита (q). Этот процесс существенно увеличивает продолжительность влияния ёмкости скважины, что отражается на графиках S÷lg t.

При восстановлении уровня, после отключения насоса, ситуация меняется. Зона ПРТ исчезает, и восстановление уровня происходит значительно быстрее, чем в период возмущения. Этап влияния ёмкости скважины становится существенно короче, чем в период откачки, и за счет быстрого восстановления уровня соотношение $C_у/C_р$ увеличивается до значений равных или более 7÷10. Таким образом, этап влияния ёмкости

ствола скважины имеет характерные особенности, позволяющие выявить развитие процесса нарушения линейного закона при откачках с постоянным дебитом [7, 8].

Зона переходного режима течения формируется в небольшом пространстве вокруг опытной скважины, и имеет размеры, не превышающие, как правило, одного - двух радиусов опытной скважины. Состояние прискважинной зоны оказывает значительное влияние на развитие и сохранение устойчивого состояния зоны ПРТ. Процессы кольматации и раскольматации прискважинной зоны, которые нередко происходят при проведении опытно-фильтрационных работ, могут проявляться в заметных скачках уровней в опытных скважинах, связанных с изменениями характеристик (размеров, фильтрационных свойств) зоны нарушения линейного закона фильтрации.

При возникновении зоны переходного режима течения – зоны условной нелинейности, даже небольшие колебания дебита очень существенно отражаются на форме временных графиков прослеживания понижения уровня. Это связано со степенной, близкой к квадратичной, связью понижения уровня и дебита, которая формально реализуется при развитии процесса нелинейности в прискважинной зоне. Поэтому оценка параметров ПРТ по данным откачек с постоянным дебитом требует повышенной аккуратности в измерении дебитов и понижений, и обычно носит ориентировочный характер. Вместе с тем, достоверная интерпретация результатов откачек позволяет количественно оценивать степень нарушения линейного закона фильтрации и целенаправленно планировать более детальные исследования.

Таким образом, при нестационарном режиме откачек (фильтрационных опробований), график временного прослеживания понижения по центральной (опытной) скважине, при развитии нелинейности, аппроксимируется прямой линией. Нередко график по опытной скважине имеет неустойчивый, иногда «скачкообразный» характер, и отличается рядом характерных особенностей. Признаками нарушения линейного закона фильтрации при нестационарном режиме откачки являются: аномально длительное проявление эффекта влияния ёмкости ствола центральной скважины (на этапе возмущения - собственно откачки); несовпадение, особенно в начальный период, формы графиков временного прослеживания понижения уровня (откачка) и восстановления уровня после откачки; аномально высокое значение уклона графика на участке влияния (псевдо влияния) ёмкости ствола скважины (C_y), по отношению к уклону графика на расчётном участке (C_p) при восстановлении ($C_y/C_p>10$); аномально высокое значение соотношения значения водопроводимости пласта(T) и величины удельного дебита (q), примерно $T/q>2-3$; аномально низкое значение действующего гидродинамического радиуса скважины (r'_c), обычно $r'_c \leq 10^{-5}$ м.

Список литературы

1. Гавич И.К. Гидрогеодинамика / М.: Недра, 1988. 349 с.

2. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика / М.: КДУ, 2009. 334 с.

3. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Каневская Р.Д., Максимов В.М. Подземная гидромеханика / М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2006. 488 с.

4. Кадет В.В., Чигиров П.С. Перколяционный анализ границ применимости линейного закона фильтрации //Труды университета нефти и газа им. И.М. Губкина. № 3 (264). 2011. С. 28-37.

5. Тагильцев С.Н. Постановка и результаты экспериментальных исследований закономерностей нарушения линейного закона фильтрации в трещинных средах// Гидрогеология и инженерная геология. Межвуз. Сб. – Новочеркасск: НПИ, 1982. – С. 47-63.

6. Тагильцев С.Н. Экспериментально-теоретическая модель процесса нарушения линейного закона фильтрации и ее практическое значение // Формирование подземных вод как основа гидрогеологических прогнозов: Материалы 1 Всесоюз. Конф. Т. 1. - М.: Наука, 1982. - С. 118-123.

7. Тагильцев С.Н., Тагильцев В.С., Сурганов С.В. Анализ и обработка данных откачек из одиночных скважин с учетом осложняющих факторов. // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. Материалы Пятнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций. М., 26-28 ноября 2019. М.: ООО «Геомаркетинг». 2019. С. 371-378

8. Тагильцев С.Н., Сурганов С.В., Тагильцев В. С. Экспериментально-теоретическое обоснование методики интерпретации фильтрационных опробований при нарушении линейного закона фильтрации //Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования. Труды Всероссийской научной конференции с международным участием. М.: МГУ, 2023. с. 215 – 221

АНАЛИЗ ОРИЕНТИРОВКИ СУБВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРЕЩИН ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВОДОНОСНЫХ РАЗЛОМОВ

Тагильцев С.Н., Тагильцев В.С., Сурганов С.В.
Уральский государственный горный институт, Екатеринбург, tagiltsev@k66.ru

Аннотация. Потенциальная водоносность разломов связана с их активностью (подвижностью) в поле современных тектонических напряжений. Разломы, являясь структурами разрушения породного массива, имеют локальный характер. Массовые трещины предразрушения образуются при допредельном или предельном напряженном состоянии, имеют широкое развитие в приповерхностной зоне хрупкой деформации и достаточно полно отражают современное поле тектонических напряжений. Целенаправленное изучение и анализ трещиноватости позволяет определить ориентировку осей главных максимальных нормальных напряжений (ГМН), действующих в конкретном скальном массиве. Помимо ориентировки ГМН, анализ элементов залегания трещин позволяет оценить уровень значимости отдельных направлений, а также наиболее вероятную ориентировку активных разломов.

Результаты анализа ориентировки систем субвертикальных трещин на конкретном объекте, последующих геофизических исследований, бурения и опробования гидрогеологических скважин подтвердили, что методика поисковых работ, основанная на положениях гидрогеомеханики с использованием анализа ориентировки субвертикальных трещин, позволяет существенно повысить результативность гидрогеологических работ. Наиболее продуктивные тектонические разломные структуры связаны со сдвигами, имеющими характерные азимуты простирания.

Ключевые слова: *гидрогеомеханика, водоносность разломов, тектонические напряжения, скальные массивы, субвертикальные трещины, сдвиги, азимуты простирания.*

Abstract. The potential aquacity of faults is related to their activity (mobility) in the field of modern tectonic stresses. Faults, being structures of rock mass destruction, have a local character. Massive pre-fracture cracks are formed at an extreme or extreme stress state, have a wide development in the near-surface zone of brittle deformation and sufficiently fully reflect the modern field of tectonic stresses. The purposeful study and analysis of fracturing makes it possible to determine the orientation of the axes of the main maximum normal stresses (MMN) acting in a particular rock mass. In addition to the orientation of the GMN, the analysis of the elements of the occurrence of cracks allows us to assess the level of significance of individual directions, as well as the most likely orientation of active faults.

The results of the analysis of the orientation of the systems of subvertical cracks at a specific object, subsequent geophysical studies, drilling and testing of hydrogeological wells confirmed that the method of prospecting based on the provisions of hydrogeomechanics using the analysis of the orientation of subvertical cracks can significantly improve the effectiveness of hydrogeological work. The most productive tectonic fault structures are associated with shifts having characteristic strike azimuths.

Keywords: *hydrogeomechanics, fault aquifers, tectonic stresses, rock massifs, subvertical cracks, shifts, strike azimuths.*

Важнейшей задачей гидрогеомеханических исследований, выполняемых в скальных массивах, является выявление тектонических нарушений (разломов), которые являются активными (подвижными) в настоящее время. Участки породных массивов, в которых развиваются активные разломы, обычно характеризуются повышенным количеством открытых трещин. Для открытых трещин свойственна значительная, относительно окружающих пород, проницаемость и взаимосвязь трещин, т.е. их отличают высокие фильтрационные и емкостные свойства.

Потенциальную активность разломов можно оценить, анализируя их положение в поле современных напряжений, опираясь на анализ ориентировки открытых трещин [1-3]. Разломы, являясь структурами разрушения породного массива, разделяют массив горных пород на отдельные блоки, и имеют локальный характер. Массовые трещины предразрушения образуются при допредельном или предельном напряженном состоянии, имеют широкое развитие в приповерхностной зоне хрупкой деформации и достаточно полно отражают современное поле тектонических напряжений [3]. При наличии естественных или техногенных обнажений (карьеров, котлованов, дорожных выемок, разведочных канав), целенаправленное изучение и анализ трещиноватости позволяет определить ориентировку осей главных максимальных нормальных напряжений (ГМН), действующих в конкретном скальном массиве. Помимо ориентировки ГМН, анализ элементов залегания трещин позволяет оценить уровень

значимости отдельных направлений, а также наиболее вероятный азимут простирания активных разломов.

Опыт гидрогеологических исследований заставляет полагать, что наиболее перспективными (обводненными) тектоническими структурами являются разломы, которые по кинематическому типу относятся к сдвигам. Сдвиги возникают под воздействием тектонических сил, которые формируются в промежуточном геодинамическом этаже [4-7]. Сдвиговые движения способствуют раскрытию трещин различной ориентировки, но наиболее тесная связь, в связи с общим геомеханическим генезисом, прослеживается с субвертикальными трещинами. Значительное количество субвертикальных трещин с близкой ориентировкой, может рассматриваться как важный поисковый признак, который указывает на близкое расположение и аналогичную ориентировку разломных тектонических структур. Необходимо учитывать, что трещины, имеющие субвертикальное падение, проявляются в структуре не только сдвигов, но также сбросов и надвигов. Картирование субвертикальных трещин позволяет выявить полную картину разломных структур, преобладающих на участке поисковых работ.

Субвертикальные трещины скола возникают, как правило, под воздействием тектонических сил, связанных с ориентировкой основных направлений ГМН [6, 7]. Чаще всего эти направления является парными, т.е. в одном массиве действуют, с некоторой периодичностью, два направления ГМН. В процессе изучения элементов залегания трещин и разломов было установлено, что ГМН, имеющее среднюю ориентировку вектора сил по простиранию 285°-105°, чаще всего генерирует возникновение и развитие структур разрушения и предразрушения, имеющих «левую» кинематику движения (против часовой стрелки). В свою очередь ГМН, имеющее среднюю ориентировку вектора сил по простиранию 260°-80°, чаще всего генерирует возникновение и развитие тектонических структур, имеющих «правую» кинематику движения (по часовой стрелке).

Ориентировка сдвигов обычно совпадает с простиранием субвертикальных трещин скола. Трещинные зоны, связанные со сдвигами, формируют хорошо выраженные в поле фильтрационных параметров водоносные зоны. Эти зоны образуют с главным максимальным направлением тектонических сил средний угол в 40°- 45°. Указанное значение угла скола является средним и может варьировать примерно на 10° в сторону уменьшения и увеличения, в зависимости от литологического состава пород и типа деформации (хрупкая, пластично-хрупкая, хрупко-пластичная).

В качестве примера гидрогеомеханического анализа, выполненного на конкретном объекте, представлены результаты исследований, выполненных на медном и марганцевом месторождениях, расположенном в засушливом районе Казахстана. В разведочных канавах измерены элементы залегания примерно сотни субвертикальных трещин. С учетом магнитного склонения, характерного для изучаемого района, построена роза-диаграмма ориентировки (простирания) субвертикальных трещин (рис. 1).

Ориентировка преобладающих главных максимальных напряжений (ГМН) выявлена по аналогии с опытом работ на Уральских медных месторождениях. В качестве основного признака, помимо типовых значений ориентировки ГМН, использовался характерный угловой признак [6,7], состоящий в том, что угол между ориентировкой трещин, связанных со сбросами (раздвигами) и надвигами, составляет 90° (с учетом погрешности измерений). Выявлены две пары характерных систем трещин: «левая» пара – 285° и 15°; «правая» пара – 265° и 350°.

Ориентировка ГМН, преобладающего на изучаемом участке, уточняется по наличию трещин скола, связанных со сдвигами. Характерным признаком, позволяющем уточнить ориентировку основных тектонических структур, является значение угла скола, составляющее, чаще всего, 40°. На изучаемом участке сдвиговые трещины проявились у «правого» ГМН, имеющего азимут 265°. Наиболее отчетливо выражены «правые» трещины сдвига, имеющие азимут простирания 225°.

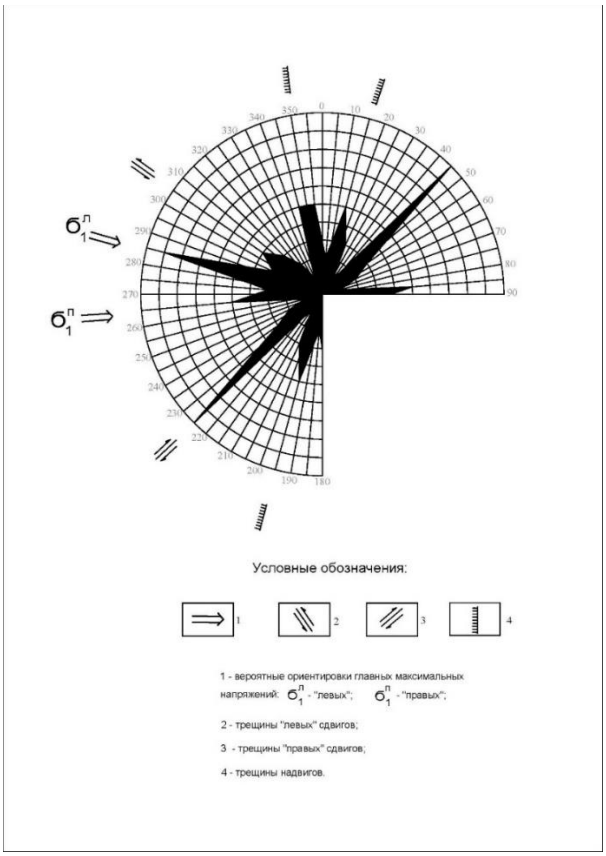


Рис. 1. Ориентировка субвертикальных трещин. Месторождение Сарышаган.

Заметно слабее, но также достаточно отчетливо, на диаграмме отражаются «левые» сдвиговые трещины со средним азимутом простирания 305°. Эти трещины также генерирует «правое» ГМН, имеющее азимут 265°.

Таким образом, на изучаемом участке наиболее перспективными для поисковых работ на воду являются сдвиги, имеющие азимут простирания 225° и 305°, а также места их пересечения. На участках пересечения сдвигов формируются зоны сжатия и растяжения. Необходимо учитывать, что зоны растяжения с относительно высокими фильтрационными свойствами, возникают в северном и южном секторах «креста», возникающего при пересечении сдвигов [5].

При ведении поисковых работ на соседних участках, но расположенных в пределах изучаемого месторождения, учитывалось, что перспективные сдвиговые структуры могут быть связаны и с «левым» ГМН, имеющим ориентировку 285°. Соответственно, могут выявляться сдвиговые структуры с простиранием 325° (левые сдвиги) и 245° (правые сдвиги). Учитывая определённую тектоническую «специализацию» ГМН, можно полагать, что для «левого» ГМН наиболее вероятно формирование левых сдвигов со средним простиранием 325°.

Результаты геофизических исследований, бурения и опробования гидрогеологических скважин подтвердили, что методика поисковых работ, основанная на положениях гидрогеомеханики с использованием анализа ориентировки субвертикальных трещин, позволяет существенно повысить результативность гидрогеологических работ. Наиболее продуктивные тектонические разломные структуры связаны со сдвигами, имеющими характерные азимуты простирания.

Выводы

1. Полевые измерения и гидрогеомеханический анализ элементов залегания субвертикальных трещин позволяют выявить основные характеристики поля тектонических напряжений и ориентировку разломных структур, активных (водоносных) в современный геологический период.

2. Сравнительный анализ характерных азимутов главных максимальных напряжений и активных разломов позволяет считать, что указанные характеристики поля тектонических напряжений являются одинаковыми как для Урала, так и для Центрального Казахстана.

3. Наиболее продуктивные, с гидрогеологических позиций, тектонические разломные структуры связаны со сдвигами, имеющими характерные азимуты простирания. Субвертикальное залегание сдвигов существенно облегчает их выявление и последующее целенаправленное изучение бурением и геофизическими методами.

Список литературы

1. Антыпко, Б.Е. Гидрогеологические ёмкости горно-складчатых областей. /Б.Е. Антыпко; - М.: Недра, 1986. - 185 с.

2. Шерман, С.Н. Поля напряжений земной коры и геолого–структурные методы их изучения. / С.Н. Шерман, Ю.И. Днепровский; – Новосибирск: Наука, 1989. – 158 с.

3. Тагильцев, С.Н. Основы гидрогеомеханики скальных массивов. /С.Н.Тагильцев //Уч. пособ. - Екатеринбург: Из-во УГГГА, 2003. - 88 с.

4. Тагильцев, С.Н. Закономерности пространственного расположения тектонических нарушений в поле современного напряженного состояния земной коры /С.Н. Тагильцев // Горный журнал. Изв. ВУЗов. – 2018. № 7. С. 52 - 66.

5. Тагильцев, С.Н. Гидрогеомеханические структуры растяжения и сжатия в поле современных тектонических напряжений. /С.Н. Тагильцев, Т.Н. Кибанова; // Изв. Вузов. Горный журнал. 2017. № 7. С. 63-69.

6. Тагильцев, С.Н. Комплексирование методов гидрогеомеханики, электроразведки и биолокации для выбора мест заложения гидрогеологических скважин / С.Н. Тагильцев, А.В. Чередниченко, В.В. Мельник; // Горный информационно-аналитический бюллетень. —2020. — № 3-1. — С. 236–246.

7. Тагильцев, С.Н. Геомеханический анализ гидрогеологических свойств тектонических нарушений/С.Н. Тагильцев, Т.Н. Кибанова, В.С. Тагильцев, С.В. Сурганов // Горный информационно-аналитический бюллетень. —2022. — № 5-1. — С. 145–157.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФИЛЬТРАЦИИ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ВОДОПРИТОКОВ В ПРОЕКТИРУЕМЫЕ ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ МАСЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ.

Шеходанов[1] В.О., Заболоцкий К.А.[2], Пацук С.В.[1]

[1]ООО «ТЦ «Эвенкиягеомониторинг», г. Красноярск, Россия, evgm@evgm.ru

[2]ООО «Арктик Палладий», г. Москва, Россия

Аннотация. В данной статье отражены этапы составления концептуальной и численной моделей Масловского месторождения, а также выполнен расчёт прогнозных водопритоков в двух вариантах – при самостоятельной отработке месторождения и с учетом работы южной части рудника Норильск-1. С целью создания концептуальной модели была выполнена интерпретация исходных данных о гидрогеологической структуре месторождения.

Ключевые слова: *гидрогеодинамическое моделирование, месторождения ТПИ, гидрогеологические условия, расчет водопритоков, многолетнемерзлые породы.*

Abstract. This article reflects the stages of compiling conceptual and numerical models of the Maslovskoye field, and also calculates predicted water inflows in two versions - with independent development of the field and taking into account the work of the southern part of the Norilsk-1 mine. In order to create a conceptual model, the initial data on the hydrogeological structure of the field were interpreted.

Key words. hydrogeodynamic modeling, solid mineral deposits, hydrogeological conditions, calculation of water inflows, permafrost.

Расчет водопритоков является одним из залогов будущей эффективной отработки месторождения. Так как от величины водопритока напрямую зависят как затраты на систему водоотведения, в частности, так и рентабельность добычи руды в целом.

Масловское месторождение платино-медно-никелевых руд расположено в 13 км к юго-западу от г. Норильска Красноярского края в северо-западной части Средне-Сибирского плоскогорья. С запада месторождение оконтуривает река Ергалах, южная граница проходит по руслу реки Южный Ергалах. Климат района переходный от резко континентального к арктическому; характеризуется продолжительной холодной зимой и коротким, часто дождливым летом. Среднегодовая температура воздуха – 8,6 ^{0}C [6]. Такие климатические условия обуславливают наличие на участке моделирования многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность многолетнемерзлых пород достигает 400 м. Что является одним из важнейших факторов, которые необходимо учитывать при задании слоев численной модели.

Изучение гидрогеологических условий этого района началось с 40-х годов прошлого столетия, работы были связаны с бурением гидрогеологических скважин, а также оценки шахтных и рудничных вод. В дальнейшем проводилась оценка фильтрационных параметров трещинно-жильных вод месторождения Норильск-1. Первые гидрогеологические работы непосредственно на Масловском месторождении начаты с 2008 года в рамках составления отчета с подсчетом запасов ТПИ [2]. Дальнейшее изучение выполнено в 2015 году и завершилось составлением первой модели Масловского месторождения в 2015 г. Далее было проведено доизучение гидрогеологических условий в 2020-2021 гг. [7].

Гидрогеологические условия исследуемого участка

На основе имеющейся гидрогеологической карты Норильского района было определено, что на площади моделирования развиты 7 гидрогеологических подразделений. Основной на территории Масловского месторождения является водоносная верхнепермская-нижнетриасовая вулканогенная пластовая зона (P_2-T_1), имеющая в пределах участка сплошное распространение (рис. 1). Рассматриваемая водоносная зона представлена вулканогенной толщей переслаивающихся базальтов, туфов, туфопесчаников, туффитов, туфоалевролитов, туфобрекчий. Вся вулканогенная толща соответствует блоково-пластовой структуре. Вместе с тем, длительный континентальный перерыв способствовал формированию значительной зоны экзогенной трещиноватости. Экзогенная трещиноватость с глубиной затухает и водоносность проявляется в отдельных напластованиях. В пределах месторождения мощность зоны от 800-900 на юге и до 1200 на севере. Уровень подземных вод устанавливается на абсолютных отметках 67,9-77,7 м. Общее снижение уровня адекватно понижению рельефа поверхности земли, что указывает на существование постоянных источников питания подмерзлотных вод. Воды напорные, высота напора 97,29-134,07 м [3].

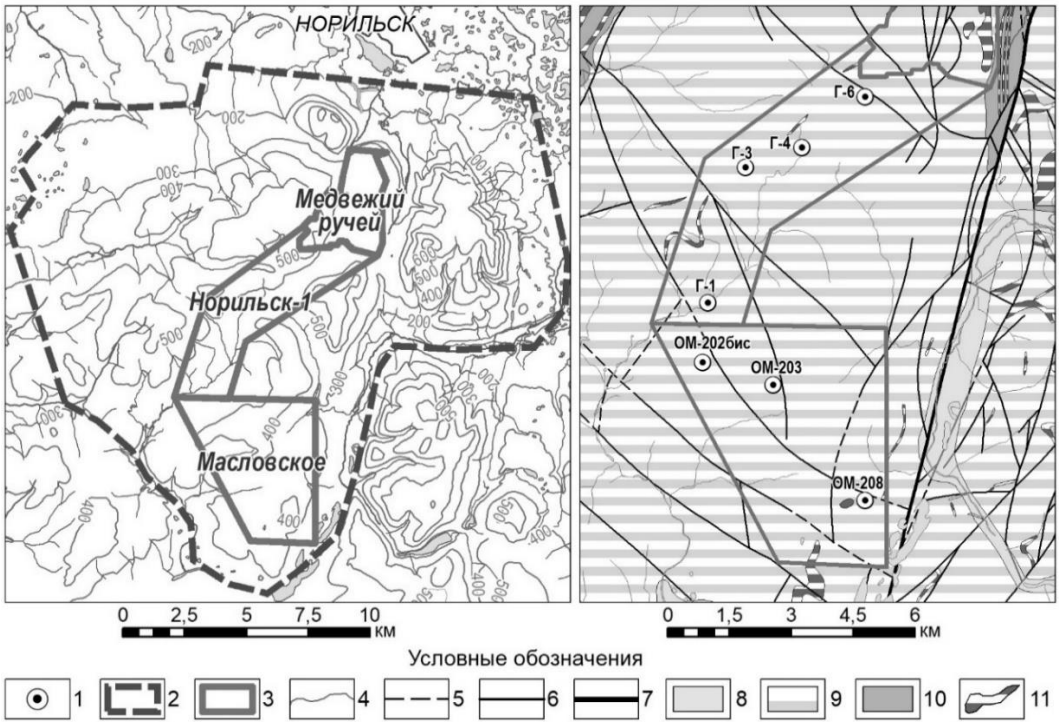


Рис. 1 – Область моделирования и гидрогеологическая карта участка месторождения. 1 – скважина и её номер; 2 – граница области модели; 3 – лицензионные площади; 4 – изолинии рельефа; 5, 6, 7 – разломы: предполагаемые, достоверные, Норильско-Хараелахский; 8 – водоносный криогенно-таликовый среднеплейстоцен-голоценовы аллювиальный, водно-ледниковый, ледниковый, озерно-ледниковый горизонт; 9 – водоносная верхнепермско-нижнетриасовая криогенно-таликовая вулканогенная пластовая зона; 10 – водоносный среднекаменноугольный-верхнепермский угленосно-терригенный комплекс; 11 – водоносная нижнетриасовая интрузивная зона.

Минерализация подмерзлотных вод вулканогенных отложений в большинстве скважин находится в пределах 0,2-0,4 г/дм^3. По химическому составу воды пестрые.

Многочисленные озера на абсолютных отметках более 300 м дают основание полагать о существовании под этими озерами сквозных таликов, по которым происходит питание подмерзлотных вод.

Перед созданием концептуальной модели, данные, полученные по проводимым ранее опытно-фильтрационным работам, были обобщены и проанализированы. Часть исходных данных, после анализа была отбракована и не использовалась. Достоверные параметры были использованы авторами для уточнения гидрогеологических условий месторождения.

На основе выполненных замеров статических уровней, были построены локальная (на Масловское месторождение) и расширенная (на область модели) карты-схемы гидроизопьез подмерзлотного водоносного комплекса, с целью определения областей питания и разгрузки. Было определено, что основной областью питания является зона в верховьях реки Далдыкан и ручьев Юж. Угольный и Болотный, а разгрузки – долины крупных рек, в том числе по направлению потока через Масловское месторождение – р. Ергалах.

С целью определения амплитуды колебания уровня подземных вод подмерзлотного водоносного комплекса (ВК) были проанализированы максимальные и минимальные уровни по всем имеющимся режимным скважинам на месторождениях Норильск-1 и Масловское. Для построения графика были использованы скважины Г-6, Г-4, Г-3, Г-1 и ОМ-202бис, ОМ-203 в порядке от области питания к области разгрузки (табл. 1, рис. 1). Анализируя таблицу, можно сделать вывод, что максимальные колебания уровня в течении года наблюдаются, как раз по скважинам, которые ближе к основной области питания, затухая к области разгрузки.

Таблица 1 – Уровни подземных вод за период наблюдений

№ скважины	Уровень ПВ за период наблюдений в асб. отм., м		Амплитуда, м
	Минимум	Максимум	
Г-6	327,89	380,89	53,0
Г-4	348,94	358,8	9,9
Г-3	357,78	363,84	6,1
Г-1	299,47	301,47	2,0
ОМ-202бис	302,7	305,05	2,4
ОМ-203	299,78	302,58	2,8

Следующим шагом, необходимым для разделения слоев будущей модели, стало определение мощности ММП. Прямым методом определения положения нижней границы ММП является измерение отметки уровня подошвы ледяной пробки при разбуривании или растеплении скважин, пробуренных на участке работ ранее. Что и было сделано по некоторым скважинам (ОМ-202бис, ОМ-203 и ОМ-208). По части разведочных скважин геологами при бурении были определены отметки нижней границы ММП.

Концептуальная модель района месторождения

На основе собранных гидрогеологических данных была выполнена схематизация реальных гидрогеологических условий. Подробно останавливаться на каждом отдельном анализе данных в рамках этой статьи не будем. Далее будут представлены основные положения необходимые для схематизации условий.

Во-первых, на основе фондовых данных [4] по проводимым кустовым откачкам в долине р. Ергалах был выполнен расчет водопроводимости подрусловых отложений косвенным способом с помощью программного комплекса «Ansdimat». Исходя из этих параметров проведена оценка значения водопроводимости подрусловых отложений для задания, получены значения 150-210 м^2/сут (для реки шириной 15 м и ячейки 100 м). Все реки заданы в концептуальную модель, как граничные условия 3-го рода.

В модели 2015 года все реки были заданы условиями первого рода [5, 8], однако проведя анализ данных дистанционного зондирования долины р. Ергалах было установлено: работа только лишь Ергалахского водозабора способна снижать уровень в реке настолько, что в межень может полностью исчезать поверхностный сток. Таким образом, наглядно видно, что нельзя задавать р. Ергалах на модели как границу постоянного напора.

Во-вторых, использовав высотные отметки рельефа, сделан пересчет их в мощность ММП на всю область моделирования. Как известно, мощность ММП напрямую зависит от рельефа местности [1]. Имея ряд ретроспективных и современных данных по соотношению мощности ММП от абсолютной отметки рельефа, получена функция для описания этой связи, с помощью которой и был выполнен пересчет. В связи с наличием мощного слоя ММП, инфильтрация в модели задается в сквозные талики в долинах рек.

В-третьих, был проведен расчет водопритоков за счет атмосферных осадков и подземных вод. По данным режима водопритоков в соседний рудник «Заполярный», можно разделить календарный год на 3 периода. Первый период, когда водопритоки формируются только за счет подземных вод длительностью около 245 суток. Второй этап с начала теплого периода, при котором добавляется водоприток за счет таяния снега, период таяния снега составляет порядка 40 суток. Третий этап – период после схода снега до начала холодного периода, с дополнительным водопритоком за счет дождевых осадков – 80 сут. Рассчитанные значения составил для паводка – 28700 м^3/сут, для летнего половодья – 3625 м^3/сут.

При моделировании водопритоков в проектируемые выработки Масловского месторождения было оценено также и влияние существующих горнодобывающих предприятий, таких, как рудник «Заполярный» и карьер «Медвежий ручей». Так как

дополнительным источником поступления воды в подмерзлотный ВК могут служить заброшенные горные выработки, расположенные на этой территории. Так, например, в 10 км на север от участка работ существует затопленный угольный карьер.

Численное моделирование

Комплекс численного моделирования состоит из четырех этапов:

- создание концептуальной модели, включающее подготовку исходной информации и схематизацию реальных гидрогеологических условий;
- создание численной модели, определяющее степень детальности, с которой будут решаться поставленные задачи за счёт выбора размеров расчетной сетки;
- калибровка – решение обратных задач;
- прогнозное моделирование – решение прямых задач, включающее расчеты изменения уровней подземных вод и водопритока в горные выработки.

Концептуальная гидродинамическая модель Масловского месторождения, также охватывающая площадь месторождения Норильск-1, была реализована в виде численной модели. Размеры площади модели 2015 года был выполнен с таким расчетом, чтобы область моделирования имела естественные границы [8]. В связи с этим, она оставлена без изменения и имеет протяженность 21,4 км с севера на юг и 22,5 км с запада на восток. В рамках текущей задачи для моделирования основного шахтного поля достаточно задать размер ячеек 100×100 м. При этом, на период калибровки по данным ОФР вокруг скважин, было выполнено локальное сгущение ячеек до 25×25 м и 5×5 м.

В модели было задано 5 слоев: Слой 1 соответствует зоне ММП, но на некоторых участках в нем заданы таликовые зоны. Слой №2 характеризует основной подмерзлотный ВК. Следующие слои №3, 4 и 5 обозначают водоносные пермо-триасовые вулканогенные породы с постепенным уменьшением фильтрационных параметров. Рудный (продуктивный) горизонт находится в слое №5.

Мощность 1-го слоя определяется разницей отметок рельефа и подошвы ММП. Слой 2 (подмерзлотный ВК) задан мощностью 100 м, на основании проведенных гидрогеологических работ. Подошва модели также обозначена фиксированной отметкой – 800 м. Количество остальных горизонтов четко не определено и может меняться в зависимости от наличия исходных данных. В связи с этим, в концептуальной модели они отсутствуют и заданы только в численной, методом редактирования количества слоев. В данной модели переходные слои 3 и 4 заданы мощностью по 150 м. Мощность нижнего 5-го слоя составила от 375 до 662 м. Гидрогеологические параметры слоев определены по результатам ОФР. В целом, как уже отмечалось, до глубины 150-220 м, а на водоразделе до 400 м, массив представлен многолетнемерзлыми породами, которые при гидрогеологической схематизации можно рассматривать в качестве водоупора. Ниже ММП залегает подмерзлотный ВК, приуроченный к трещиноватым отложениям пермо-триаса. Трещиноватость породного массива затухает с глубиной, что предопределяет снижение его проницаемости. Для нижнего слоя модели использовано значение коэффициента фильтрации 0,0001 м/сут, которое подтверждено ОФР по ряду скважин.

Ширина таликов в концептуальной модели принята 60 м (по 30 м в обе стороны от русла реки), но в численной модели они получились шире из-за размеров ячеек по 100 м.

Условия фильтрации – напорно-безнапорные во всех слоях.

В дальнейшем процесс моделирования заключался в проведении факторно-диапазонной оценки заложенных фильтрационных параметров. В соответствии с этими данными по ОФР, были доработаны параметры зоны водопроводимости подмерзлотного ВК. В итоге коэффициент фильтрации в слое 2 был зафиксирован в значении 0,08/0,02 м/сут. В дополнение к этому в слой 2 были заданы локальные зоны пониженной водопроводимости. Были проведены 3 вида калибровки: на зимнюю межень, на период паводка и ОФР.

Калибровка на зимнюю межень проведена по руднику Заполярному, расчетный водоприток составил 3683,6 $м^3$/сут, при фактическом 3732,4 $м^3$/сут, так что можно

считать адекватным соответствием фактическим данным для участка моделируемой площади.

При калибровке на паводковый период было определено, что на модели не удалось получить величину сопоставимую с фактическим паводковым водопритоком в рудник Заполярный. В ненарушенных природных условиях такая высокая инфильтрация вряд ли возможна. Здесь она может возникнуть только при наличии техногенной зоны трещиноватости с высокой проницаемостью, которая и была определена.

В процессе доработки модели было выполнено моделирование кустовой и двух одиночных откачек. Задача решена в нестационарной постановке. Была получена разница в понижениях, что, скорее всего, объясняется техническими особенностями скважин, которые моделью не учитываются. Однако в данном случае наиболее важным оказывается хорошее совпадение темпов снижения.

В целом, все вышеизложенное, по мнению авторов, позволяет сделать вывод о том, что созданная модель в принципе удовлетворительно отражает реальную ситуацию и может быть использована для прогноза.

На этапе прогноза с помощью модели был решен комплекс прогнозных задач:

1. Без учёта южной части месторождения Норильск-1 (не отрабатывается);
2. Южная часть месторождения Норильск-1 отрабатывается.

В каждой задаче: приняты периоды отработки по 5 лет, без привязки к фактическим датам; рассчитаны водопритоки в подземный рудник; оценено количественное влияние на Ергалахский водозабор. Общий срок отработки – 25 лет (9125 суток).

В итоге рассчитанные на данном этапе моделирования нормальные прогнозные притоки подземных вод на конец отработки Масловского месторождения составляют 2426 м^3/сут для северного участка и 1304 м^3/сут для южного для 1ой задачи, и 2260 и 1303 м^3/сут для 2-ой задачи.

Заключение

Созданная модель удовлетворительно отражает реальную ситуацию с учетом текущей гидрогеологической изученности. Она позволяет проводить дальнейшую детализацию природной гидрогеологической обстановки путем добавления разломов, зон трещиноватости, а также локальных зон, с отличающимися фильтрационными параметрами, по мере их выявления в период полевых работ. Модель может быть использована для решения различных прогнозных задач, позволяет включать в работу новые выработки или изменять порядок отработки существующих. Максимальные водопритоки по обеим задачам составляют 2426 м^3/сут для северного участка и 1304 м^3/сут для южного участка.

Также необходимо отметить, что при решении обеих задач, какого-либо влияния на водоотбор Ергалахского водозабора не выявлено.

Таким образом, полученные водопритоки могут быть использованы авторами последующих ТЭО кондиций Масловского месторождения.

Список литературы

1. Гидрогеология СССР. Том 18. Красноярский край. И.К. Зайцев. Москва, 1972 год.

2. Ковальчук К.К., Таургалинова П.Б. и др. «Оценочные работы на Масловском сульфидно-медно-никелевом рудопроявлении». Отчет с подсчетом запасов по состоянию на 01.12.2008 г. Норильск, 2009 г.

3. Ковпий А.Н. и др. Комплексная гидрогеологическая и инженерно-геологическая съемка масштаба 1:200000 (Листы R-45-79-82; -91-94; -103-106; -115-118) за 1993-1999 гг. Норильск, 2000 г.

4. Михалев Г. Л., Кузьмин Е. Е. и др., Гидрогеологические условия и оценка эксплуатационных запасов подземных вод Ергалахского месторождения. Норильск, 1974 г.

5. Норватов Ю.А., Петрова И.Б. Создание численной геофильтрационной модели месторождения Масловское и прогноз притоков подземных вод в проектируемые горные выработки. СПб, 2015 г.

6. Татарников Б.Б. ТЭО постоянных разведочных кондиций с подсчетом запасов сульфидных медно-никелевых руд Масловского месторождения. ООО «СПб-Гипрошахт», Санкт-Петербург, 2018.

7. Шеходанов В.О., Зарубов М.С., Доизучение горнотехнических условий Масловского месторождения, Красноярск 2021 г.

8. Jos Beckers и др. Аудит гидрогеологических данных и геофильтрационной модели по Масловскому месторождению. Mining Plus Pty Ltd, 2019.

Авторский указатель

Абдрахманов Р.Ф., 81
Абукова Л.А., 203
Агафонов Ю.А., 222
Алексеев С.В., 165, 367
Алексеева Л.П., 165, 367
Алферов И.Н., 11
Антонова И.А., 486
Аракчаа К.Д., 311
Асеева А.В., 64

Бадминов П.С., 242
Баишев Н.Е., 25, 218, 228, 248
Барановская Е.И., 64, 253
Бердова Д.В., 86
Березина О.А., 402
Белкин И.Ю., 86
Болдина С.В., 53
Боревский Б.В., 5
Борзенко С.В., 327
Бородулина Г.С., 255
Брагин И.В., 64, 287
Бродская Н.А., 532
Буддо И.В., 222

Вакуленко Л.Г., 372
Васильев Ю.В., 377
Вах Е.А., 260, 477
Вахромеев А.Г., 14
Вашестюк Ю.В., 481
Вашурина М.В., 377
Верхозина Е.С., 284
Верхотуров А.Г., 193
Ветошкина А.В., 260, 477
Виноград Н.А., 20
Вилькина М.В., 90, 354
Владимиров К.В., 96

Гагарин Л.А., 25
Гаев А.Я., 11
Гарипова Е.Р., 382
Гайдукевич В.А., 198
Гинзбург А.П., 228
Глотов В.Е., 29, 203
Гончар Н.В., 486
Горбунова Э.М., 492
Горобейко Е.В., 477
Горохова Н.Б., 497
Горячев В.В., 337
Гриневский С.О., 264
Гуман О.М., 141, 486

Дашко Р.Э., 101, 208
Деменев А.Д., 402
Деркачев А.С., 107, 291
Джабарова Н.К., 112
Добрынина А.А., 34, 165
Домрочева Е.В., 118, 342
Дорошкевич С.Г., 180
Дребот В.В., 327
Дубенко К.А., 416
Дубовецкий В.Н., 86
Дульцев Ф.Ф., 107, 451

Егоров Т.С., 37, 46
Ершов Г.Е., 213

Жабко А.В., 141
Жамбалова Д.И., 175, 180, 456
Журавлев Н.Б., 274

Заболоцкий К.А., 559
Замана Л.В., 269, 461
Зайцев А.В., 537
Зацарина С.В., 537

Иванов А.Г., 492
Иванова И.С., 130, 342
Иванова Т.П., 510
Ильин А.В., 123, 537
Иноземцев С.А., 96
Иост Н.А., 537

Каплан Е.М., 354
Карабцов А.А., 64
Караваев А.В., 492
Караулов В.А., 426
Кац В.Е., 112
Каюкова Е.П., 387
Килин Ю.А., 126, 392
Кирюхин А.В., 14, 274
Кислов Е.В., 41, 332
Козлов Ю.А., 37, 46
Кокорева С. В., 49
Колосова Д. Л., 101
Колубаева Ю.В., 130
Копанцева Е.Н., 392
Копылова Г.Н., 53
Король И.С., 75
Корзун А.В., 279
Котович А.Д., 58
Коханенко А.А., 112
Красильников В.Я., 426
Кряжев А.А., 136
Крюкова И.Г., 311
Кулаков В.В., 397
Кулешов Д.В., 348, 526

Лагунов И.К., 123
Ланкин Ю.К., 284
Лебедева Е.Г., 228, 287
Лебедева Л.С., 337
Лесина Н.В., 439
Лепокурова О.Е., 342
Литвинова И.В., 14, 136, 537, 541
Луканов Д.Д., 501

Максимова А.А., 291, 372
Максимович Н.Г., 402
Малков Д.С., 136
Мещерякова О.Ю., 402
Минин А.В., 426
Минькевич И.И., 126
Морару К.Е., 295
Мусин Р. Х., 300
Мухортина Н.А., 75, 130

Наумова О.О., 284
Неуважаев Г.Д., 426
Нечаева Н.Н., 141
Никитенков А.Н., 405, 439
Николаева Е.С., 25
Николенко О.Д., 372
Никуленков А.М., 90, 96, 354
Новиков Д.А., 306, 348, 526
Новокрещенных Н.П., 505

Овечкина О.Н., 141
Огонеров В.В., 218, 248
Озерский А.Ю., 145, 510
Озерский Д.А., 426
Олиферова О.А., 213
Оргильянов А.И., 311
Оролбаева Л.Э., 410
Оцимик А.А., 222

Павлов С.Х., 150
Павлова Н.А., 228, 238, 467
Паламарчук В.А., 228
Паничев А.М., 260
Паркина В. А., 49
Паршин А.В., 243
Паршикова Н.Г., 279
Пацук С.В., 559
Петухова С.М., 492
Петров В.В., 316
Петрожицкий А.В., 348, 526
Пиотровский А.С., 501
Плавник А.Г., 156
Плаксина Н.А., 169
Плюснин А.М., 175, 184, 382, 416, 456, 505
Поздняков С.П., 515
Полубелова А.В., 218
Потапова Е.Ю., 522
Потурай В.А., 160
Преображенская А.Е., 264
Попов В.Н., 421
Посохов В.Ф., 332
Пушкарева О.В., 426
Пыряев А.Н., 311, 348, 526

Расторгуев А.В., 431, 437
Расторгуев И.А., 501, 537, 541
Разумная Д.А., 532
Редина М.М., 69, 445
Реутова А.П., 291
Румынин В.Г., 90, 96, 354
Русакова Ю.О., 61, 377
Романов И.С., 208
Ролдугин В.В., 112
Рыбникова Л.С., 546
Рыбников П.А., 546
Рычкова К.М., 311

Саньков В.А., 34
Сальникова Ю.И., 156
Светлаков А.А., 165
Сергеева А.В., 14
Сидорина Н. Г., 112
Синчук Е.В., 541
Скалин А.А., 434
Скалин А.В., 434
Скалин В.А., 434
Сметанина И.В., 311
Сорокоумова Я.В., 431, 437
Сурганов С.В., 552, 556
Сухорукова А.Ф., 169

Тагильцев В.С., 552, 556
Тагильцев С.Н., 552, 556
Тугарина М.А., 234
Токарев И.В., 360
Токарева О.В., 222
Труфанов А.И., 322

Украинцев А.В., 175, 184, 382, 416

Федоров А.А., 198, 238
Федоров А.Ю., 492
Федоров М.А., 238
Федорова Н.Е., 238
Фомина Я.В., 439

Хаустов А.П., 69, 445
Харитонова Н.А., 64, 253, 279, 287
Хващевская А.А., 107
Хилько И.А., 136, 541
Хмурчик В.Т., 402
Храмцова А.Л., 377

Челноков Г.А., 64, 253
Чередова Т.В., 180, 416, 456
Черниговский Р.С., 184
Черных А.В., 451, 472
Чернышов В.И., 322
Чернявский М.К., 382, 416, 456
Чечель Л.П., 461
Чуйкина Д.И., 75

Шамов В.В., 337
Шварц А.А., 96
Шепелёв В.В., 467
Шеходанов В.О., 559

Яковлев Е.Ю., 360
Яндола Н.И., 169, 472
Янников А.М., 189

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

I. ЭВОЛЮЦИЯ ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЫ

Боревский Б.В. Достоверность гидрогеологических прогнозов: влияние состава и полноты информации…… 5

Гаев А.Я., Алферов И.Н. О замечательной сибирской гидрогеологической школе и её создателе……..……..... 11

Вахромеев А.Г., Кирюхин А.В., Сергеева А.В., Литвинова И.В. Моделирование условий формирования рапа-силлов и эксплуатации предельно насыщенных литиеносных рассолов на юге Сибирской платформы……..... 14

Виноград Н.А. Принципы применения ресурсной классификации ООН к подземным водам……. 20

Гагарин Л.А., Николаева Е.С., Баишев Н.Е. Применение радиолокационных снимков в картировании наледей подземных вод…… 25

Глотов В.Е. Гидрогеологические неоднородности на арктическом склоне Северо-востока России…….. 29

Добрынина А.А., Саньков В.А. Миграция флюидов в очаговых областях сильных землетрясений …… 34

Егоров Т.С., Козлов Ю.А. Первые результаты и особенности мелкомасштабного гидрогеологического картографирования территории арктической зоны……... 37

Кислов Е.В. Источники подземных вод ООПТ и проектируемых геопарков Бурятии…… 41

Козлов Ю.А., Егоров Т.С. Использование структурированного массива эталонных условных знаков для создания гидрогеологических карт…… 46

Кокорева С.В., Паркина В.А. Вопросы гидрогеологического районирования территории России……..... 49

Копылова Г.Н., Болдина С.В. Экспериментальное исследование и развитие теории сейсмогидрогеодинамических эффектов в задачах геофизического мониторинга и прогноза землетрясений…….. 53

Котович А.Д. Специализированная гидрогеологическая карта распространения глубокозалегающих водоносных горизонтов (комплексов) Западно-Сибирской плиты масштаба 1:1 000 000 для использования с целью захоронения жидких промышленных отходов……. 58

Русакова Ю.О. Решение прикладных задач гидрогеологии с использованием метода гамма-каротажа…….. 61

Харитонова Н.А., Барановская Е.И., Челноков Г.А., Брагин И.В., Асеева А.В., Карабцов А.А. Геохимия и генезис термальных вод северо-западной части Центральной Азии……... 64

Хаустов А.П., Редина М.М. Прогрессивная эволюция гидрогеохимических систем (эмпирическое обоснование) …… 69

Чуйкина Д.И., Король И.С., Мухортина Н.А. Разработка новых способов оценки качества природных вод…… 75

II. СИСТЕМА «ВОДА-ПОРОДА-ГАЗ-ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО»

Абдрахманов Р.Ф. Формирование минеральных вод Южного Урала……... 81

Бердова Д.В., Дубовецкий В.Н., Белкин И.Ю. Совершенствование процессов анализа результатов исследования проб подземных вод……. 86
Вилькина М.В., Никуленков А.М., Румынин В.Г. Оценка связанности потока в трещиноватом массиве на участке «Енисейский» в Красноярском крае с использованием метода многоточечной геостатистики…… 90
Владимиров К.В., Шварц А.А., Иноземцев С.А., Никуленков А.М., Румынин В.Г. Особенности формирования инфильтрационного питания подземных вод водосборов малых рек в контексте долговременной безопасности планируемого ПГЗРО (участок «Енисейский», Красноярский край)……. 96
Дашко Р.Э., Колосова Д.Л. Структура поровой воды в системе: глинистый грунт – ионы – газ – микроорганизмы на основе ядерно-магнитного резонанса – практика применения в гидрогеологии…….. 101
Деркачев А.С., Дульцев Ф.Ф., Хващевская А.А. Радиоактивность вод родников центральной части Колывань-Томской складчатой зоны…….. 107
Джабарова Н.К., Кац В.Е., Ролдугин В.В., Коханенко А.А., Сидорина Н. Г. Подземные воды источников юго-восточной территории горного Алтая: перспективы использования в лечебно-оздоровительных целях……... 112
Домрочева Е.В. Особенности взаимодействия природных вод с водовмещающими отложениями на территории юга Кемеровской области….. 118
Ильин А.В., Лагунов И.К. Опыт применения соляно-кислотных обработок для увеличения проницаемости пород с целью последующей закачки дренажных вод…… 123
Килин Ю.А., Минькевич И.И. Особенности химического состава подземных вод Иренского карстового района Предуралья……. 126
Колубаева Ю.В., Иванова И.С., Мухортина Н.А. Оценка рисков при употреблении железосодержащих вод Ямало-Ненецкого автономного округа…….. 130
Кряжев А.А., Малков Д.С., Литвинова И.В., Хилько И.А. Придонное гидрогеохимическое опробование водохранилищ Ангарского каскада…… 136
Овечкина О.Н., Гуман О.М., Нечаева Н.Н., Жабко А.В. Роль подземных вод при строительстве на элювиальных грунтах Среднего Урала…… 141
Озерский А.Ю. Особенности гидрогеохимических условий по данным изучения минерального осадка на водоподъемном оборудовании (Чулымо-Енисейский бассейн)…….. 145
Павлов С.Х. Формирование гидрокарбонатных натриевых подземных вод повышенной и высокой минерализации…….. 150
Плавник А.Г., Сальникова Ю.И. Формирование гидрогеохимических условий пластовых вод сеноманских отложений в районе Тазовского месторождения……... 156
Потурай В.А. Некоторые особенности хромато-масс-спектрометрического анализа органического вещества природных вод……..…….. 160
Светлаков А.А., Добрынина А.А., Алексеев С.В., Алексеева Л.П. Подземные воды. Сейсмичность Байкальского региона. Новые данные о взаимосвязи параметров……. 165
Сухорукова А.Ф., Плаксина Н.А., Яндола Н.И. Геохимические особенности подземных вод водозабора Новосибирского научного центра…….. 169
Украинцев А.В., Плюснин А.М., Жамбалова Д.И. Условия формирования и химический состав вод источника минеральных вод Дабан-Горхон…… 175
Чередова Т.В., Дорошкевич С.Г., Жамбалова Д.И. Обобщенные показатели и катионно-анионный состав подземных вод на полигоне ТКО Республики Бурятия…… 180

Черниговский Р.С., Плюснин А.М., Украинцев А.В. Газовый и микроэлементный состав потоков аэрозолей на содовом озере Нижнее Белое (Западное Забайкалье)…….…….. 184
Янников А.М. Изменение криогидрогеологических условий в пределах участков закачки Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей…. 189

III. КРИОГИДРОГЕОЛОГИЯ

Верхотуров А.Г. Многолетняя динамика наледей Центрального и Южного Забайкалья……... 193
Гайдукевич В.А., Федоров А.А. Результаты гидрогеологических работ на месторождениях питьевых подземных вод на границе Алданского гидрогеологического массива и Якутского артезианского бассейна……. 198
Глотов В.Е., Абукова Л.А. Мерзлотно-гидрогеологические аспекты становления и развития водородной энергетики Северо-Востока России…… 203
Дашко Р.Э., Романов И.С. Подмерзлотные воды как фактор активной биокоррозии крепей на руднике Купол (Чукотский автономный округ)…… 208
Ершов Г.Е., Олиферова О.А. Балансовая структура запасов подземных вод месторождений в таликах речных долин криолитозоны…… 213
Огонеров В.В., Баишев Н.Е., Полубелова А.В. Мониторинг криогидрогеологических условий грунтов оснований на намывной территории г. Якутска……. 218
Оцимик А.А., Буддо И.В., Токарева О.В., Агафонов Ю.А. Особенности распространения многолетнемерзлых пород на одной из площадей Мирнинского улуса Республики Саха (Якутия)…….. 222
Паламарчук В.А., Лебедева Л.С., Павлова Н.А., Гинзбург А.П., Баишев Н.Е. Гидрохимические исследования незакрепленных песчаных массивов Восточной Сибири…….…… 228
Тугарина М.А. Влияние мерзлотно-гидрогеологических условий на устойчивость линейных сооружений в районах развития многолетней мерзлоты……. 234
Федоров М.А., Федоров А.А., Павлова Н.А., Федорова Н.Е. Гидрогеологическая изученность и перспективы использования подмерзлотных вод для питьевого водоснабжения населенных пунктов Чурапчинского района Республики Саха (Якутия)……. 238

IV. МИНЕРАЛЬНЫЕ, ТЕРМАЛЬНЫЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

Бадминов П.С., Паршин А.В. Факторная модель формирования подземного стока центральной части Восточного Саяна…… 243
Баишев Н.Е., Огонеров В.В. Гидрохимические исследования источников питания природно-техногенной наледи в долине р. Большой Дурай (Южная Якутия)…… 248
Барановская Е.И., Харитонова Н.А., Челноков Г.А. Гидрогеохимические особенности месторождения минеральных вод Джети-Огуз (Иссык-Кульский артезианский бассейн)……... 253
Бородулина Г.С. Радон в подземных водах восточного склона Фенноскандинавского щита……. 255
Вах Е.А., Паничев А.М., Ветошкина А.В. Гидрогеохимия и распределение редкоземельных элементов в бассейнах рек Кемпендяй и Кюндяе (Якутия)…… 260
Гриневский С.О., Преображенская А.Е. Влияние изменения климата на формирование запасов подземных вод приречных месторождений……. 264
Замана Л.В. Гидрогеохимия и изотопия Мордойского углекислого источника (Юго-Восточное Забайкалье)……..…….. 269

Кирюхин А.В., Журавлев Н.Б. Моделирование условий формирования азотных гидротермальных систем…… 274
Корзун А.В., Паршикова Н.Г., Харитонова Н.А. Перспективы использования и проблемы изучения месторождений промышленных вод РФ…… 279
Ланкин Ю.К., Наумова О.О., Верхозина Е.С. Роль новейшей тектоники в формировании ресурсов подземных вод юга Сибирской платформы……..... 284
Лебедева Е.Г., Брагин И.В., Харитонова Н.А. Микробные сообщества в подземных минеральных водах Дальнего Востока России……. 287
Максимова А.А., Деркачев А.С., Реутова А.П. Редкоземельный состав подземных вод долины реки Иня…….. 291
Морару К.Е. Промышленные подземные воды Юго–Западной части Причерноморского артезианского бассейна…… 295
Мусин Р. Х. Пространственно-временные вариации гидрогеохимического поля зоны пресных подземных вод в Республике Татарстан и их природа…… 300
Новиков Д.А. Уран в системе «вода-горная порода»……. 306
Оргильянов А.И., Аракчаа К.Д., Крюкова И.Г., Пыряев А.Н., Сметанина И.В., Рычкова К.М. Геологические условия формирования состава воды источника Дустуг-Хем (Юго-Западная Тува)…….. 311
Петров В.В. Некоторые особенности режима микрокомпонентного состава природных вод восточного побережья оз. Байкал…… 316
Труфанов А.И., Чернышов В.И. К вопросу о перспективности использования сероводородных вод Вологодской области…….. 322

V. ИЗОТОПЫ В ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЕ

Дребот В.В., Борзенко С.В. Распределение стабильных изотопов хлора ($\delta^{37}Cl$) и брома ($\delta^{81}Br$) в солёных озёрах и подземных водах Юго-Восточного Забайкалья……... 327
Кислов Е.В., Посохов В.Ф. Аномально легкий изотопный состав кислорода нефрита Кавоктинского месторождения и его формирование…… 332
Лебедева Л.С., Шамов В.В., Горячев В.В. Тритий в атмосферных, поверхностных и подземных водах Восточной Сибири…… 337
Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Домрочева Е.В. Использование изотопов водорода, кислорода и углерода при интерпретации условий формирования состава вод в средах, богатых органическими веществами…… 342
Пыряев А.Н., Новиков Д.А., Петрожицкий А.В., Кулешов Д.В. Радиоуглеродное датирование подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области…… 348
Румынин В.Г., Никуленков А.М., Вилькина М.В., Каплан Е.М. Процессы и параметры, контролирующие миграцию радионуклидов в кристаллических массивах при обосновании долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения РАО (на примере участка «Енисейский» в Нижнеканском массиве, Красноярский край)…… 354
Токарев И.В., Яковлев Е.Ю. Отражение современной деградации подземных льдов севера Евразии в изотопном составе воды (^{2}H, ^{18}O) и растворенного урана ($^{234}U/^{238}U$)…….. 360

VI. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОЛОГИИ

Алексеев С.В., Алексеева Л.П. Загрязнение подземных вод на Юго-Западном побережье оз. Байкал. Итоги мониторинга……... 367
Вакуленко Л.Г., Максимова А.А., Николенко О.Д. Фракционирование химических элементов в системе вода-порода (на примере долины реки Иня, юг Западной Сибири)…… 372

Вашурина М.В., Храмцова А.Л., Русакова Ю.О., Васильев Ю.В. Влияние техногенеза на изменение химического состава пресных подземных вод на территории Самотлорского месторождения нефти……. 377
Гарипова Е.Р., Плюснин А.М., Украинцев А.В., Чернявский М.К. Токсичные элементы в конденсационной влаге на территории Джидинского ГОКа и поверхностных водах реки Мыргеншено…… 382
Каюкова Е.П. Качество питьевых вод в Крымском предгорье……. 387
Копанцева Е.Н., Килин Ю.А. Миграция нефтяного загрязнения в карстовых районах Прикамья…….. 392
Кулаков В.В. Изменение качества подземных вод и водовмещающих пород при водоподготовке питьевых вод в пласте…….. 397
Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Деменев А.Д., Березина О.А., Мещерякова О.Ю. Дистанционный мониторинг гидрохимических параметров при очистке подземных вод от растворенных нефтепродуктов…… 402
Никитенков А.Н. Моделирование изменений геохимического поля при размещении CO_2 на примере Верх-Тарского месторождения……. 405
Оролбаева Л.Э. Экосистемно-бассейновый подход к управлению и сохранению ресурсов подземных вод высоких гор Кыргызстана в условиях техногенных изменений……. 410
Плюснин А.М., Дубенко К.А., Украинцев А.В., Чернявский М.К., Чередова Т.В. Химический состав атмосферных осадков и конденсационных вод на озерном полиметаллическом месторождении……. 416
Попов В.Н. Возможности водоотведения очищенных бытовых стоков в трещиноватые породы Прибайкалья (на примере Ольхонского района)…… 421
Пушкарева О.В., Караулов В.А., Минин А.В., Красильников В.Я., Неуважаев Г.Д., Озерский Д.А. Изучение фильтрационных параметров зоны региональной трещиноватости в кристаллических породах на участке строительства подземной исследовательской лаборатории…… 426
Расторгуев А.В., Сорокоумова Я.В. Реабилитация водоносных горизонтов, загрязненных нефтепродуктами……... 431
Скалин А.В., Скалин В.А., Скалин А.А. Технологические схемы очистки подземных вод в водоносных пластах на Урале…….. 434
Сорокоумова Я.В., Расторгуев А.В. Исследование миграции контаминантов различного генезиса на территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината…… 437
Фомина Я.В., Никитенков А.Н., Лесина Н.В. Методические аспекты оценки участков недр для размещения углекислого газа на севере Западно-Сибирского артезианского бассейна при реализации проектов CSS…….. 439
Хаустов А.П., Редина М.М. Растворенные органические вещества как индикатор взаимодействия с ПЭТ-упаковками и генезиса вод…… 445
Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Перспективы размещения углекислого газа в сверхкритическом состоянии на Северо-Западе Новосибирской области…….. 451
Чернявский М.К., Плюснин А.М., Жамбалова Д.И., Чередова Т.В. Геоэкологические особенности и условия формирования Уринского термального источника……..... 456
Чечель Л.П., Замана Л.В. Пруды хвостохранилищ горнодобывающих предприятий Забайкалья как потенциальный источник загрязнения подземных вод…… 461
Шепелёв В.В., Павлова Н.А. Роль техногенеза в формировании режима надмерзлотных вод……. 467

Яндола Н.И., Черных А.В. Первые данные по гидрогеохимическому мониторингу Хапхальского ущелья…… 472

VII. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ, ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШАХТНЫХ ВОД

Вах Е.А., Ветошкина А.В., Горобейко Е.В. Геологические и гидрогеохимические условия месторождения Шануч (Камчатский край)……. 477
Вашестюк Ю.В. Перспективные направления снижения техногенного влияния горного производства на подземную гидросферу…… 481
Гончар Н.В., Антонова И.А., Гуман О.М. Прогноз качества подземных вод при рекультивации карьерных выемок Уральского региона……... 486
Горбунова Э.М., Иванов А.Г., Караваев А.В., Петухова С.М., Федоров А.Ю. Информативность прецизионного гидрогеологического мониторинга в техногенно-нарушенных условиях……... 492
Горохова Н.Б. Надмерзлотные воды пойменных таликов р. Лены в районе пос. Кангалассы в Центральной Якутии……... 497
Луканов Д.Д., Расторгуев И.А., Пиотровский А.С. Расчёт промерзания котлована……. 501
Новокрещенных Н.П., Плюснин А.М. Химический состав конденсационных вод на Холбольджинском угольном разрезе (Гусиноозерское буроугольное месторождение)…….. 505
Озерский А.Ю., Иванова Т.П. Опыт подсчета запасов дренажных вод для разработки россыпных месторождений золота…… 510
Позднякoв С.П. Подземные воды и меняющийся климат: наблюдения, модели, прогнозы…….. 515
Потапова Е.Ю. Оценка запасов дренажных вод в сложных гидрогеологических условиях и использование их в хозяйственно-питьевых целях…… 522
Пыряев А.Н., Новиков Д.А., Петрожицкий А.В., Кулешов Д.В. Радиоуглеродное датирование подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области…… 526
Разумная Д.А., Бродская Н.А. Воздействие на водные объекты шахтной отработки угольного месторождения……... 532
Расторгуев И.А., Литвинова И.В., Зайцев А.В., Иост Н.А., Ильин А.В., Зацарина С.В. Использование тетраэдральных сеток для геологических каркасов модели глубокого карьера в гидрогеологических расчётах……. 537
Расторгуев И.А., Литвинова И.В., Хилько И.А., Синчук Е.В. Математическая оптимизация расположения закачных скважин…….. 541
Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Использование подземных вод для водоснабжения Свердловской области……. 546
Тагильцев С.Н., Сурганов С.В., Тагильцев В.С. Особенности нарушения закона Дарси при нестационарном режиме фильтрационных опробований……. 552
Тагильцев С.Н., Тагильцев В.С., Сурганов С.В. Анализ ориентировки субвертикальных трещин для выявления водоносных разломов…….. 556
Шеходанов В.О., Заболоцкий К.А., Пацук С.В. Численное моделирование геофильтрации с целью прогноза водопритоков в проектируемые горные выработки Масловского месторождения…… 559
Авторский указатель……. 565

Научное издание

Подземная гидросфера
(Материалы XXIV Всероссийского совещания
по подземным водам Востока России)

Фото на обложке, *лицевая сторона:*
Жигаланские водопады на реке Улсуй (Северный Урал, хребет Кваркуш, Красновишерский район Пермского края), автор П.А. Рыбников.

Фото на обложке, *оборотная сторона:*
затопленный карьер Левихинского медно-колчеданного месторождения (пос. Лёвиха, Свердловская область), автор П.А. Рыбников;

источник Духовой, Баргузинская впадина
(Республика Бурятия), автор Л.П. Алексеева;

затопленный карьер Черемшанского никелевого месторождения
(г. Верхний Уфалей, Челябинская область), автор П.А. Рыбников.

Технические редакторы *Л.С. Рыбникова, А.Ю. Смирнов*
Компьютерная верстка *А.Ю. Смирнов*

Подписано к печати 30.05.2024. Формат 60x84/8. Гарнитура «Таймс».
Печать цифровая. Усл. печ. л. 64,63. Тираж 96. Заказ № 6058.
Отпечатано в ООО «Типография Для Вас».
620026, Екатеринбург, ул. Розы Люксембург, 52а, офис 3