

Российская академия наук
Уральское отделение
Учреждение Российской академии наук
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА

На правах рукописи

УДК 622.84

Мельник Виталий Вячеславович

**ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ДЛЯ
ДИАГНОСТИКИ ОПАСНОСТИ КАРСТОПРОЯВЛЕНИЙ ПРИ
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ**

*Специальность 25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»*

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
заслуженный деятель науки РФ
Сашурин Анатолий Дмитриевич

Екатеринбург - 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. АКТУАЛЬНОСТЬ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАРСТОПРОЯВЛЕНИЙ	11
1.1 Актуальность задачи защиты объектов недропользования от карстопроявлений	11
1.2 Современные методы и подходы к решению задачи обеспечения безопасности от карстопроявлений	24
1.3 Задачи исследований диссертационной работы.....	40
Выводы	43
2. ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МОДЕЛЬ КАРСТООПАСНОГО УЧАСТКА МАССИВА	44
2.1 Основные факторы, определяющие карстоопасность массива горных пород	44
2.2 Иерархически блочная структура и характерные зоны массива горных пород	46
2.3 Современная геодинамическая активность и закономерности ее распределения в массиве горных пород	53
2.4 Взаимосвязь гидрогеологических характеристик карстоопасных участков со структурой и геодинамической активностью массива горных пород	62
Выводы	62
3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОСТРОЕНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	66
3.1 Обоснование методики исследования карстоопасного массива	66
3.2 Изучение глубинного строения массива горных пород.....	72
3.2.1 Построение геоэлектрической модели массива	72
3.2.2 Выявление структурных особенностей массива с использованием спектрального сейсмопрофилирования	80

3.2.3	Определение параметров и морфологии массива георадарным зондированием	88
3.3	Методы диагностики параметров современных геодинамических движений	94
	Выводы	100
4.	МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ КАРСТОПРОЯВЛЕНИЙ	101
4.1	Методы оценки опасности воздействия пустот на земную поверхность	101
4.2	Расчетная геомеханическая модель	120
4.3	Экспериментально-аналитический метод оценки опасности карстопроявлений	129
4.4	Методы укрепления карстующихся пород	132
	Выводы	134
5.	ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОВЕРКА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	136
5.1	Исследования процесса карстопроявлений и разработка мероприятий по обеспечению безопасности газопровода «Бухара-Урал» на Красногорском участке	136
5.2	Исследование и прогноз процесса карстопроявлений под подъездной дорогой Высокогорского ГОКа	149
5.3	Диагностика опасности карстопроявлений на участке строительства перехода через р. Уфу	161
5.4	Диагностика опасности карстопроявлений при строительстве антенных мачт мобильной связи	169
	Выводы	174
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	176
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	178

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях рыночной экономики особенно остро встает вопрос рационального использования территорий для строительства и эксплуатации объектов недропользования, поскольку опасные геологические процессы делают огромные экономически выгодные территории непригодными для использования. Карстопроявления занимают особое место среди опасных процессов, происходящих в земной коре, по степени скрытости его протекания, внезапности проявления, катастрофичности последствий и трудности прогнозирования.

Только в России карстовым деформациям подвержено около 13 % территории, в том числе в пределах более 300 городов и тысяч более мелких поселений, в которых проживают 19 % населения страны. Суммарный экономический ущерб от карстового и тесно связанного с ним суффозионного процесса составляет в России, по экспертным оценкам, от 30 до 45 млрд. руб. в год.

В науках о Земле хорошо изучены причины, условия возникновения и развития карста. Для использования накопленных знаний в целях повышения эффективности и обеспечения безопасности освоения карстоопасных районов необходимо увязать процессы карстообразования с геомеханическими процессами деформирования вмещающих пород и налегающей толщи и воздействием последствий их проявления на объекты недропользования.

Проблеме изучения условий и закономерностей развития карста, способам и методам инженерной защиты от него, прогнозированию проявлений карста и оценке карстоопасности при освоении территорий посвящены работы многих известных российских и зарубежных исследователей, таких как Г. А. Максимович, А. А. Крубер, Н. В. Родионов, Н. А. Гвоздецкий, Д. С. Соколов, И. А. Саваренский, В. М. Кутепов, Л. А. Молоков, М. С. Газизов, А. В. Ступишин, В. И. Мартин, И. А. Печеркин, К.

А. Горбунова, В. В. Толмачев, J. Corbel, J. Jarin, A. Bogli и другие. Вопросам инженерно-геологического изучения карста посвящены работы В. Д. Ломтадзе, В. С. Лукина, А. Г. Чикишева, Б. Н. Иванова. Гидрогеологические условия развития карста исследовались Н. Д. Будановым, В. Ф. Прейсом, Н. С. Шабалиной, В. П. Новиковым, И. И. Плотниковой, С. В. Палкиным. Разработкой геофизических методов изучения карстопоявлений занимались А. А. Огильви, Л. В. Пинягина, П. В. Вишневский, А. А. Абрамов. Вопросам оценки карстовой опасности посвящены работы З. А. Макеева, В. В. Толмачева, Ф. Ройтера, Х. Молека, И. А. Саваренского, Н. А. Миронова, Г. Н. Дублянкой и В. Н. Дублянским.

Широкий круг ученых, занятых в этой области объясняется чрезвычайно широким распространением и многообразием карстовых проявлений, активно влияющих на безопасность жизнедеятельности людей.

Анализ современного состояния и изученности проблемы опасности карстопоявлений показал, что общепринятой интегральной мерой рассматриваемой опасности до последнего времени являлась среднесуточная интенсивность провалообразования (случаев провалов/км²год), предложенная З.А. Макеевым. Все методы исследования карстоопасного массива существующие на настоящий момент времени, сводятся, как правило, к определению потенциально опасных с точки зрения карстообразования участков и ограничению строительства и эксплуатации объектов недропользования на этих территориях. Методы, позволяющие непосредственно оценивать карстовую опасность для объектов недропользования лишь начинают внедряться в практику проектирования в карстовых районах.

В настоящее время делаются попытки математического моделирования обрушения налегающих пород над карстовой полостью А. К. Федосеевым. Однако в модели развития процесса обрушения используются идеализированные среды, не учитывающие особенностей массива горных пород налегающей толщи и происходящие в ней геодинамические процессы.

В работе исследована роль геомеханических и геодинамических факторов в развитии карстопроявлений, разработана методика диагностики карстопроявлений территорий для безопасного строительства и эксплуатации объектов в различных областях экономики, связанных с недропользованием.

Разработанные технологии предотвращения, снижения риска и тяжести последствий катастроф, связанных с процессами карстопроявлений имеют широкую перспективу использования в различных областях экономики, связанных с недропользованием, а именно:

- добыча всех видов твердых полезных ископаемых;
- добыча и транспортировка нефти и газа;
- строительство;
- транспорт;
- инженерные сети коммунального хозяйства населенных пунктов.

Работа выполнена в рамках фундаментальных исследований: грантов РФФИ № 06-05-66404 (2006-2008 гг.) и № 07-05-00613 (2007-2009 гг.); федеральной целевой программы № 2007-5-1.5-21-03 (2007 г.); приоритетной программы фундаментальных исследований Президиума РАН №13 (2006 г.); интеграционной программы совместных исследований УрО РАН с СОРАН (2009 г.); программ отделения наук о Земле РАН №5 (2006 г.) и №6 (2008 г.); Госконтракта № 02.740.11.0317 (2009 г.).

Объект исследований – карстоопасный массив горных пород.

Предмет исследований – процессы деформирования в карстоопасных массивах и их влияние на объекты недропользования.

Цель исследований. Заключается в исследовании геомеханических процессов и явлений, происходящих в районах распространения поверхностного и подземного карста, а также их влияния на активизацию карстообразования и параметры сдвижения от подземных карстовых пустот для оценки безопасности объектов недропользования в зоне их влияния.

Основные задачи исследований:

- анализ современного состояния и изученности опасности

карстопроявлений, методов изучения карста и прогнозирования вредного влияния на объекты недропользования;

- изучение геомеханических процессов, происходящих на карстоопасном участке, и построение его геомеханической модели для определения параметров сдвижения от карстовых пустот;

- обоснование методов исследования массива горных пород при построении геомеханической модели;

- разработка методики оценки опасности карстопроявлений с точки зрения выхода процесса сдвижения на земную поверхность, а также влияние погребенного карста на устойчивость объектов недропользования;

- промышленные эксперименты по проверке разработанной методики для решения конкретных задач обеспечения безопасности строительства и эксплуатации объектов недропользования на закарстованных территориях.

Основная идея работы заключается в организации комплексного мониторинга геомеханических процессов в приповерхностной части земной коры, основанном на сочетании как традиционных (бурение скважин и геодезические наблюдения за деформациями), так и геофизических методов для прогноза и контроля развития карстообразования и сдвижений горных пород на урбанизированных территориях и изучении геодинамики закарстованной территории.

Основные защищаемые положения:

1. Активизация карстопроявлений происходит в зонах тектонических нарушений, обладающих высоким уровнем современных трендовых и циклических геодинамических движений. Современные движения поддерживают горный массив в дезинтегрированном состоянии, вызывают образование новых и раскрытие существующих трещин, определяющих снижение прочностных характеристик и повышенную водопроницаемость породного массива.

2. Опасность карстопроявлений выражается в развитии деформационных процессов на земной поверхности. Параметры деформации

поверхности зависят от глубины залегания, морфологии и степени заполнения карстовой полости. Современное развитие деформационных процессов определяется степенью изменения геомеханических и гидрогеологических характеристик массива горных пород под воздействием природной и техногенной геодинамической активности геологической среды.

3. Применение систем спутниковой геодезии в сочетании с геофизическими методами изучения приповерхностной части геологической среды (электрметрия, спектральное сейсмопрофилирование, георадарное зондирование) позволяет обосновать объемную модель геологического строения и определить количественные характеристики геодинамической подвижности карстоопасного участка. Полученная структурно-динамическая модель массива горных пород выступает в качестве геомеханической основы достоверного выявления и прогнозирования развития опасных карстопроявлений.

Научная новизна работы определяется следующими основными результатами:

1. Выявлены основные геомеханические факторы, определяющие опасность карстопроявлений, – современная геодинамическая активность тектонических нарушений, трансформация свойств пород в тектонических нарушениях и изменение гидродинамического режима.

2. Обоснованы принципы определения степени карстовой опасности на основании расчета возможности выхода процесса сдвижения от карстовых полостей на земную поверхность.

3. Разработана и успешно опробована новая методика диагностики карстопроявлений и параметров образующихся пустот геофизическими и геодезическими методами.

Практическое значение работы. Разработанная методика диагностики карстопроявлений позволяет обеспечить безопасное освоение закарстованных территорий. Результаты диссертации использованы для решения практических задач определения причин карстопроявлений и

выдачи рекомендаций по безопасной эксплуатации объектов различного назначения на закарстованных территориях Урала и Сибири.

Достоверность научных положений подтверждается положительным результатом большого объема экспериментальных работ в полевых условиях, использования проверенных методов исследования структуры горного массива и геодинамической активности, численного сопоставления результатов промышленных экспериментов с модельными представлениями, использования защищаемых в диссертации положений отделом геомеханики ИГД УрО РАН при решении задач обеспечения безопасности строительства и эксплуатации объектов недропользования на закарстованных территориях.

Личный вклад автора состоит в проведении натурных наблюдений, сборе, анализе и систематизации данных практики и ранее проведенных исследований. Лично автором разработана методика изучения геомеханических параметров карстоопасного массива; установлены критерии устойчивости, деформирования и обрушения земной поверхности от карстовых полостей; установлена взаимосвязь между геодинамической активностью карстоопасной территории и выходом воронок обрушения от карста на земную поверхность.

Реализация работы осуществлена при исследовании процессов сдвижения и решении вопросов охраны объектов, находящихся в пределах развития карста, на Качканарском ГОКе, Высокогорском ГОКе, ОАО «Илецксоль», СУБРе, объектах линейных инженерных сооружений г. Сургута и ОАО «Уралтрансгаз», при производстве инженерных изысканий в Пермском крае и на других объектах недропользования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях «Геомеханика в горном деле» (Екатеринбург, 1999, 2000, 2007, 2009 гг.), «Неделя горняка» (Москва, 2005, 2006, 2007, 2008 гг.), молодежных научно-практических конференциях «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 2007, 2009, 2010 гг.); на технических совещаниях по решению проблем

карстопроявлений (ОАО Высокогорский ГОК, ОАО «Илецксо́ль», Качканарский ГОК, СУБР, ОАО «Уралтрансгаз»).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 30 печатных работ. Основные положения диссертации и методика исследований изложены в 16 работах, в том числе 7 в изданиях рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения. Содержит 189 страниц машинописного текста, в т. ч. 8 таблиц и 72 рисунка. Список использованных источников включает в себя 102 наименования.

Автор выражает благодарность за профессиональное руководство научному руководителю д.т.н. А. Д. Сашурину, за содействие, поддержку и консультации по вопросам диссертации проф., д.т.н. С. В. Корнилкову, а также сотрудникам отдела геомеханики ИГД УрО РАН за сотрудничество и поддержку, оказанные в период выполнения исследований.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАРСТОПРОЯВЛЕНИЙ

1.1 Актуальность задачи защиты объектов недропользования от карстопроявлений

Проблема освоения территорий, осложненных неблагоприятными геологическими процессами и явлениями, наиболее остро встает в настоящее время, в связи с быстрыми темпами промышленного освоения территорий, развития городов и инфраструктуры. О бурном росте городов легко судить по огромному объему строительства, которое ведется повсеместно. Но такая ситуация сохранялась не всегда.

Ранее, в связи с избытком неосвоенных территорий планирование строительства городов и поселений никак не связывалось с геологическими факторами. Как правило, древние города возводили на месте небольших поселений. Это были районы, где реку можно было перейти вброд, или бухты в устье реки, или участки побережья, где береговая линия создавала убежище от штормов. При выборе места для военных поселений с учетом возможной осады определяющим условием оказывалось наличие источников питьевой воды. В возникновении древних поселений немалую роль играла также близость строительных материалов. Практически все они располагались в соответствии с простейшими геологическими суждениями. Термин «геология» стал общеупотребительным лишь с конца XVIII века.

Основным преимуществом того времени являлось наличие возможности выбора наилучшей территории для строительства. Ярким примером этого служит небольшой английский город Солсбери [1]. Как и многие другие древние города Англии, Солсбери был основан римлянами, которые построили укрепления на соседнем холме Олд-Сарум и назвали крепость Сорбиодунум. Однако современный Солсбери расположен на равнине. Перед нами случай, когда целый город вынужден был передвинуться на новое

место по чисто геологической причине – из-за отсутствия удовлетворительных источников воды.

В настоящее время в связи с очень развитой инфраструктурой, в большинстве случаев отсутствует возможность выбора оптимальных участков для строительства, хотя еще в середине XX века, такой проблемы не стояло. В 1969 году американское общество гражданских инженеров публикует «Руководство по городскому планированию» [2], где слабо затрагиваются вопросы геологии в планировании, но там прозвучала фраза, никак не согласующаяся с современными представлениями о строительстве: «Где только возможно, следует избегать мягких грунтов, требующих возведения дорогостоящих фундаментов». Такой подход никак не соответствует нынешней ситуации в градостроительстве, когда буквально каждый квадратный метр территории городов имеет свое предназначение.

Недостаточно и несвоевременно изученные геологические и другие закономерности возникновения и развития грандиозных оползней, обвалов и селевых потоков, например: в Перу в 1970 и 1974 гг. (оползень в 1974 г. в долине р. Ментаро объемом 1,6 км³ привел к гибели 450 чел.); в Таджикистане оползень у пос. Айни, 1964 г. объемом 22 млн. м³; селевые потоки вблизи Алма-Аты в 1963 и 1973 гг. и во многих других районах мира причиняли весьма значительный материальный ущерб, вызывая деформацию сооружений или нарушая нормальную эксплуатацию городских, транспортных и иных объектов.

В этой связи, остро встает вопрос прогнозирования опасных природных и техногенных процессов и явлений. Особое место среди них по степени скрытости протекания процесса, внезапности проявления, катастрофичности последствий и трудности прогнозирования проявлений занимает карст.

Грамотное и своевременное изучение и прогноз активизации и развития карста могут предотвратить чрезвычайные ситуации на объектах строительства и недропользования, а правильный выбор конструкции фундаментов этих сооружений позволит использовать такие земли по

назначению.

Карст является одним из наиболее опасных природных процессов на Земле из-за внезапности проявления в виде провалов и оседаний земной поверхности, иногда достигающих 50-100 метров и более в диаметре и в глубину. Только в России карстовым деформациям подвержено около 13 % территории, в том числе в пределах более 300 городов и тысяч более мелких поселений, в которых проживают 19 % населения страны [3]. По мнению Н. А. Гвоздецкого [4] примерно на третьей части земного шара имеются реальные возможности для развития карста. Суммарный экономический ущерб от карстового и тесно связанного с ним суффозионного процесса составляет в России, по экспертным оценкам, до 45 млрд. руб. в год [3].

Интенсивность карстопроявлений в пределах городских агломераций, в том числе современных карстовых провалов, в десятки и сотни раз превышает интенсивность на других территориях. Города являются исторически сложившимися «Узловыми точками» каркаса повышенных техногенных нагрузок, интенсивного использования всех видов природных ресурсов, особенно территориальных. Большое количество зданий повышенной этажности, создающих высокие нагрузки на грунтовое основание, чрезвычайная плотность городской застройки, расширяющееся использование подземного пространства, концентрация многочисленных промышленных производств, в т.ч. экологически опасных для населения, концентрированные утечки промышленных агрессивных вод, чрезмерный водоотбор подземных вод сформировали новый техногенный тип карста.

Гигантская воронка глубиной 150, а диаметром 20 метров образовалась в марте 2007 г. в одном из жилых районов столицы Гватемалы (рис.1.1). Под землю ушли двенадцать домов, а количество погибших до сих пор уточняется. Основная версия произошедшей в Гватемале катастрофы – карстовый провал, ведь город стоит на известняке, в котором подземные реки вымывают огромные пещеры, плюс, не замеченный вовремя прорыв канализационных труб.



Рисунок 1.1 – Провал домов в Гватемале

На одном из золоторудных месторождений Йоханнесбурга (ЮАР) в 1962-1969 гг. образовался ряд провальных воронок диаметром более 50 м и глубиной до 30 м. В одну из таких воронок провалился завод и погибли 29 человек, а в другую — жилой дом вместе с пятью жильцами.

Провалы почвы, произошедшие по природным или техногенным обстоятельствам, нередки и в России.

Только в Москве за последние 40 лет зарегистрировано около 50 местных провалов, некоторые из которых сопровождались авариями коммуникаций и обрушением жилых конструкций. Потенциально опасной в этом отношении признано до 15% городской территории. Если в XIX веке таковой считалась лишь территория кремлевских холмов (где тогда возникло 10 провалов), то теперь небезопасен практически весь огромный мегаполис, что связано с постоянно растущим вмешательством человека в подземную геологическую среду.

Результатом образования карстовой воронки в 1969 г. на Хорошевском шоссе был разрушен пятиэтажный дом постройки 1950 г.; в апреле 1977 г. на Новохорошевском проезде в густонаселенном районе в 150 м от ТЭЦ-16 в

результате карстовых провалов были полностью разрушены два жилых дома. Однако самым масштабным считается «знаменитый» провал на Большой Дмитровке в мае 1998 г., когда произошло обрушение значительной массы обводненного песчаного грунта, которое вызвало образование на поверхности улицы воронки глубиной более 20 метров и площадью свыше 500 кв. метров. Это привело к полному, в течение нескольких часов, разрушению жилого дома № 18 по Большой Дмитровке и деформации прилегающих строений (рис.1.2). Всего, по данным организации «Мосгоргеотрест», только в 2002 г. на территории Москвы было зафиксировано 636 провалов и просадок грунта.



Рисунок 1.2 – Провал жилого дома по ул. Большая Дмитровка в Москве

Подобная ситуация наблюдается во многих городах России и Зарубежья.

Примером может служить карстовый провал в корпусе №1 на ПНО "Дзержинск-Химмаш" (диаметр 30 м, глубина 10 м), произошедший 15.07.1992 в г. Дзержинск (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Провал здания "Дзержинск-Химмаш"

Из близлежащих городов, постоянно подвергающихся карстовым провалам, можно отметить г. Каменск-Уральский, где регулярно фиксируются провалы в виде воронок обрушения.

Воздействие карстопроявлений не ограничивается жилыми массивами, нередко карст доставляет проблемы линейным сооружениям – железные и автодороги, газопроводы. Ярким примером карстопроявлений на газопроводах является участок газопровода Бухара-Урал в районе г. Красногорский (рис.1.4-1.5), где в результате провалов оказались оголенными трубы. К счастью, небольшая протяженность провисания труб не привела к их разрыву.



Рисунок 1.4 – Карстовые воронки в районе газопровода Бухара-Урал



Рисунок 1.5 – Карстовая воронка в районе газопровода Бухара-Урал

Проблемы карстопроявлений не менее остро затрагивают горно-обогатительные предприятия. Разработка месторождений неизбежно ведет к изменению гидродинамического режима подземных вод, что провоцирует образование карстовых пустот за счет суффозионно-карстовых процессов, что в свою очередь нередко приводит к обрушению земной поверхности. Ярким примером может служить карстовый провал на борту Главного карьера Высокогорского ГОКа в г. Нижний Тагил. Там в результате суффозионно-карстовых процессов провалился значительный участок железной дороги, соединяющей ГОК с внешним миром (рис.1.6-1.7). Для восстановления движения пришлось регулярно подсыпать этот участок щебнем и строить обводную ветвь железной дороги.



Рисунок 1.6 – Воронка обрушения на Высокогорском ГОКе



Рисунок 1.7 – Зона плавных деформаций карстопроявления на участке железнодорожного поста №12 Высокогорского ГОКа

Подобная ситуация наблюдается в г. Североуральске, где в результате карстовых провалов разрушается железобетонная облицовка канала реки Вагран, что в свою очередь ведет к подтоплению подземного рудника речными водами (рис. 1.8).

Не меньше проблем доставляет и соляной карст. Так в 1979 году за счет карста был полностью затоплен 1-й рудник в г. Соль-Илецк. Провалы проявляются по настоящее время в виде воронок на поверхности рудника (рис. 1.9), что говорит о прогрессировании процессов карстообразования на месторождении. Учитывая структурные особенности строения рудника, можно предположить, что такая же участь ждет и второй рудник, расположенный на 130 метров глубже.



Рисунок 1.8 – Карстовый провал в основании канала р. Вагран



Рисунок 1.9 – Карстовый провал на поверхности рудника в г. Соль-Илецк

Подобные проблемы имеют место и на соляных месторождениях восточной окраины Русской платформы около Урала, так называемой «Предуральской депрессии», сложенной мощной толщей соляных, ангидрито-гипсовых, доломитовых, мергелистых и песчаниковых отложений кунгурского яруса пермской системы. Она представляет собой область широкого развития карста. Там пострадали уже несколько соляных рудников (Соляные рудники ОАО "Уралкалий" БКРУ-3, 1986 г., БКРУ-1, 2006 г.), и имеется опасность обрушения целого города, расположенного на поверхности затапливаемого рудника.

Одним из последних событий, произошедших в июле 2007 года, стало обрушение кровли с образованием провала в ОАО «Уралкалий» (Березники, Пермский край). Произошел провал земной поверхности — размером примерно 60 на 40 метров, глубиной около 15 метров (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Карстовый провал на поверхности рудника БКРУ-1

Грунт обрушился вблизи законсервированной фабрики технической соли БКРУ-1, и в течение двух дней размеры воронки увеличились почти на треть, вплотную приблизившись к административно-бытовому комплексу фабрики. Техногенный карст активизировался в связи с аварийным затоплением шахты. Повышенный приток рассолов стал следствием разрыва водозащитной толщи, произошедшего в одной из неразрабатываемых частей рудника. В настоящее время параметры провала существенно возросли.

Современный активный карст в гипсосодержащих толщах в районах городов Дзержинска, Уфы, Альметьевска и других, обусловил провалы, деформации городских и транспортных сооружений, что серьезно осложнило планировочные решения и потребовало дополнительных затрат на освоенных территориях [5].

Однако многие карстовые деформации не фиксируются по причине их образования в малонаселенной местности либо ввиду отсутствия службы карстового мониторинга. Поэтому степень карстовой опасности отдельных крупных по площади территорий России в целом остается практически неизвестной, что чревато серьезными чрезвычайными ситуациями из-за непринятия соответствующих мер по предотвращению возможных ущербов.

Наиболее распространенными из карстоопасных являются карбонатные породы. Они широко развиты во всех областях и входят в состав всех геологических систем, начиная от докембрия и кончая неогеном [6]. По данным А. Б. Ронова [7], в разрезе палеозойских отложений Русской платформы известняки и доломиты составляют 62% их объема, а в разрезе мезозойских – 18%. В Уральской геосинклинали известняков и доломитов около 35%, в Донецкой – 28%, в Кавказской – 23%. Кроме того, здесь не учитывается соляной и гипсовый карст, который хотя и имеет локальное распространение, но может привести к очень серьезным последствиям.

Такое широкое распространение пород, обладающих склонностью к карстообразованию, придает особую важность изучению как самих процессов активизации образования карстовых полостей, так и закономерностей образования провалов и обрушений поверхности, исследованию факторов, активизирующих процессы обрушения.

Проблеме изучения условий и закономерностей развития карста, способам и методам инженерной защиты от него, прогнозированию проявлений карста и оценке карстоопасности при освоении территорий посвящены работы многих известных российских и зарубежных исследователей (Круббер А. А., Максимович Г. А., Родионов Н. В.,

Гвоздецкий Н. А., Соколов Д. С., Ступишин А. В., Саваренский И. А., Кутепов В. М., Молоков Л. А., Газизов М. С., Мартин В. И., Печеркин И. А., Горбунова К. А., Толмачев В. В., Corbel J., Jarin J., Bogli A., и др.). Это объясняется чрезвычайно широким распространением и многообразием карстовых проявлений, активно влияющих на безопасность жизнедеятельности людей.

Интенсивное и несбалансированное использование территориальных, водных ресурсов и недр Земли привели к значительной, а в ряде случаев катастрофической активизации карстовых и карстово-суффозионных процессов, вызвавших разрушение жилых зданий и сооружений, инженерных коммуникаций, объектов жизнеобеспечения, аварии на экологически опасных производствах, утечки из водохранилищ, ухудшение качества подземных и поверхностных вод, используемых для водоснабжения, исчезновение малых и средних рек, родников, деградацию растительных сообществ, изменение ландшафтов, истощение минерально-сырьевой базы регионов. В то же время на закарстованных территориях сосредоточены тройные запасы высококачественных экологически чистых пресных подземных вод, минеральных, столовых и лечебных вод, рассолов, в карстовых озерах - лечебных грязей, большие запасы строительных материалов: известняков, доломитов, гипсов, ангидритов, мела и других.

Поэтому, при возрастающем прогрессе техносферы, разработка методов обеспечения рационального освоения природных ресурсов закарстованных территорий, изучение закономерностей динамики развития карста, механизма образования карстовых деформаций, выявления обратных связей карстового процесса и техносферы, разработка системы противокарстовой инженерной защиты объектов жизнеобеспечения и жизнедеятельности людей становятся одним из наиболее актуальных направлений в современной инженерной геологии.

1.2 Современные методы и подходы к решению задачи обеспечения безопасности от карстопроявлений

Еще недавно карст считался относительно редким явлением, но это убеждение было разрушено при детальном исследовании территорий, представление о которых ранее было поверхностным или отсутствовало вовсе. Кроме того, изначальное представление о карсте, под которым понимался голый карст средиземноморского типа (в пределах бывшего СССР развит в Горном Крыму), было расширено за счет изучения покрытого карста, распространенного на обширных платформенных территориях, тропического карста, карста в некарбонатных породах. Хотя карст в карбонатах составляет примерно 4/5 от всего известного количества случаев, гипсовый карст также имеет большое практическое значение; крупнейшие пещеры в пределах бывшего СССР (в Подолии) – Оптимистическая и Озерная - заложены в гипсово-карбонатных толщах. Небольшая доля закарстованных территорий приходится на соляной карст.

Термин «карст» произошел от названия плато в Словении (Karst), сложенного толстослоистыми известняками и имеющего характерный облик. Безлесный ландшафт, состоящий из отдельных понижений, нередко содержащих в центральной части воронки и пропасти, привлекал исследователей, термин «карст» (немецкое чтение) прочно вошел во многие языки мира, несмотря на то, что и в Чехословакии, и в Словении эти явления называются «крас» (или «краш», «крш» – от наречия).

По Ф. П. Саваренскому, термин «карст» относится к явлениям, которые связаны с деятельностью подземных вод и сопровождаются выщелачиванием растворимых горных пород (известняков, доломитов, гипса и соли), образованием в них пустот (каналов, пещер), провалами и оседанием кровли карстующихся пород, формированием заполненных и незаполненных водой воронок и впадин на земной поверхности.

Наиболее широко карстовые процессы стали изучаться после 1917 г.,

когда перед геологами были поставлены конкретные практические задачи по строительству железных и автомобильных дорог, гидроэлектростанций и других объектов хозяйства. С этого времени стали проводиться специальные исследования карстовых процессов, геологических и гидрогеологических условий их проявления.

Одним из основоположников, а также автором нового термина «карстование», ставшего названием целого направления в науке и созданной научной школы стал Г. А. Максимович. Основанное им в 1947 г. первое в СССР периодическое издание по спелеологии и карсту «Спелеологический бюллетень» в 1961 г. сменило название на «Пещеры» и в течение 30 лет было единственным регулярно выходящим в стране специальным сборником, а также «лицом» советской научной спелеологии за рубежом.

Многие разработанные Г. А. Максимовичем классификации, понятия и термины в области карстования используются его последователями «без привязки» к автору.

Большой вклад в изучение карста внес А. В. Ступишин (1947-1972 гг.), установивший основные географические закономерности развития равнинного карста. В этот же период М. С. Кавеевым [8] был проведен анализ геологических условий развития карста Волго-Камского региона, составлена карта карстовых районов, а также разработана методика инженерно-геологических исследований в районах развития карста.

Примерно в это же время, во второй половине XX века, постепенно формировались фундаментальные теоретические и методические основы современного карстования, в том числе и прогнозной оценки карстовой опасности. Это стало возможным благодаря исследованиям Ф. П. Саваренского, Г. А. Максимовича, И. В. Попова, Н. А. Гвоздецкого, К. А. Горбуновой, В. Н. Дублянского, Г. Н. Дублянской, В. П. Зверева, В. М. Кутепова, И. А. Парабучева, И. А. Печеркина, И. А. Саваренского, Д. С. Соколова, А. В. Ступишина, В. В. Толмачева, Ю. Б. Тржцинского, В. Н.

Андрейчука, В. Н. Катаева, Е. В. Колосова, А. В. Лехова, Н. А. Миронова, А. И. Печеркина, В. П. Хоменко, К. С. Джонсона, Ф. Ройтера, Х. Молека и многих других крупных ученых и практиков. Ими были установлены основные закономерности карстового процесса и роль отдельных факторов в его развитии, разработаны показатели и классификации, как самого процесса, так и его проявлений, созданы методы изучения, оценки устойчивости и районирования карстоопасных территорий.

Важнейшим научным достижением в указанное время стало обоснование Д. С. Соколовым [9] четырех необходимых условий развития карста, включающих: наличие растворимых пород, их водопроницаемости, движущихся вод и их растворяющей способности (агрессивности). Отсутствие любого из этих условий исключает саму возможность развития карстовых пустот в массивах растворимых пород, но, специально подчеркнем, не образование карстовых деформаций земной поверхности при их наличии.

Следует отметить, что в настоящее время очень широко распространена разновидность смешанного суффозионно-карстового механизма образования пустот в нерастворимых породах и провалов на земной поверхности. Этот процесс протекает в пределах активных гидродинамических зон и заключается в выносе несвязных частиц нерастворимых пород в трещины и пустоты карстующейся или уже закарстованной толщи. Такой механизм образования пустот и провалов наиболее распространен в зонах повышенной техногенной нагрузки, он практически не зависит от растворимости пород и агрессивности вод, а приурочен к тектонической нарушенности массива горных пород и изменению гидродинамического режима.

Это представление несколько отличается от принятого механизма развития карста, приуроченного, как правило, к речным долинам и представленного ниже. Это связано с тем, что большинство ученых занимались изучением карста на примере карстовых пещер, их морфологии, которые хотя и имеют огромную научную ценность, но далеки от широко

распространенных в настоящее время суффозионно-карстовых процессов, активизирующихся в связи с повышением техногенной нагрузки.

По характеру движения и режима подземных вод Д. С. Соколов выделяет следующие гидродинамические зоны (рис.1.11): I – зона аэрации, где осуществляется главным образом нисходящее движение инфильтрационных и инфлюационных (лат. "инфлюацио" - втекание) вод, с которыми связано формирование поверхностных карстовых форм; II – зона сезонного колебания уровня трещинно-карстовых вод. При высоком стоянии уровня в этой зоне происходит горизонтальное движение воды, а при низком – вертикальное, в соответствии, с чем осуществляется направленное выщелачивание карстующихся пород; III – зона полного насыщения, находящаяся в сфере дренирующего воздействия местной гидрографической сети, прорезающей массив карстующихся пород. Эта зона имеет наибольшее значение в развитии подземных карстовых пещер и каналов. Но в придолинных участках образуются не только пещеры и каналы, направленные по пути движения подземных вод к руслам рек. Во многих речных долинах бурением и геофизическими методами обнаружено наличие крупных карстовых полостей значительно ниже ложа, что связано с разгрузкой подруслового потока подземных вод (рис. 1.11, IIIa). Местами выражена этажность карстовых пещер. Как было сказано ранее, наблюдаются определенные направленность и цикличность развития речных долин, находящие выражение в наличии надпойменных террас. Каждая из них соответствует длительному эрозионно-аккумулятивному циклу развития речной долины. С такими террасами, расположенными на разных высотах коррелируются (лат. "корреляцио" - соотношение) карстовые пещеры. Зная возраст террас, можно приближенно оценить время формирования пещер.

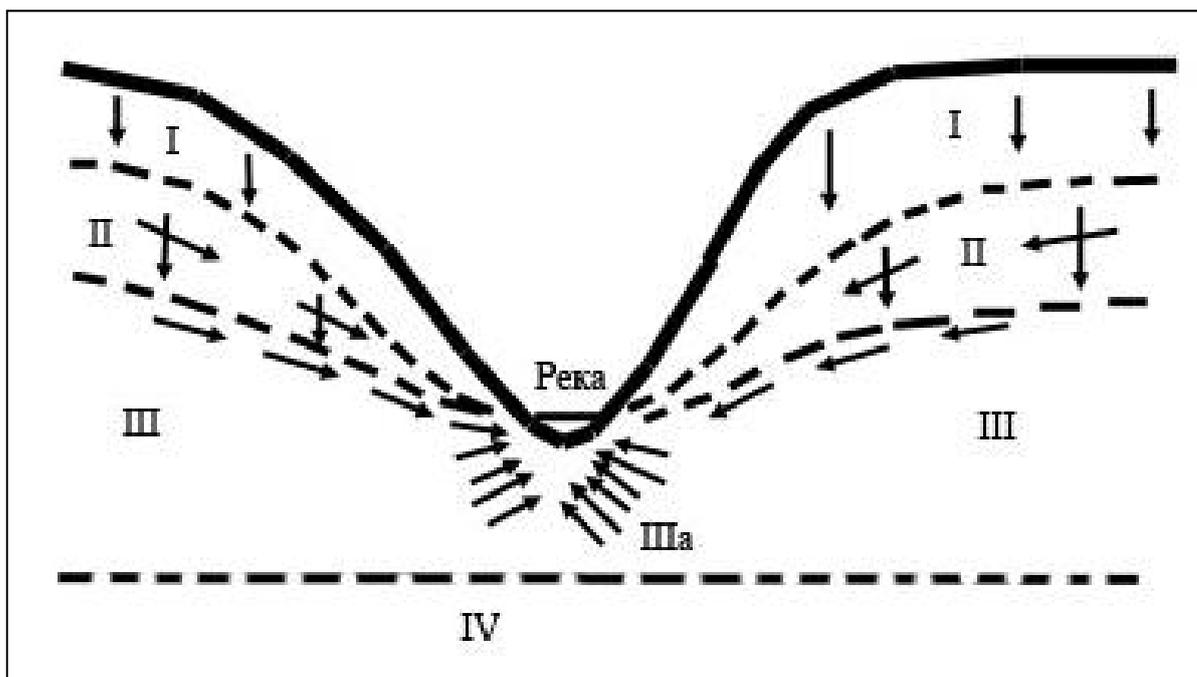


Рисунок 1.11 – Гидродинамические зоны в карстовом массиве

- I - зона аэрации;
- II - зона сезонного колебания уровня подземных вод с периодической сменой горизонтального и вертикального движения подземных вод;
- III - зона полного насыщения, находящаяся в сфере дренирующего воздействия долины реки;
- IIIa - сфера разгрузки подземных вод на дне долины;
- IV - зона глубокой циркуляции подземных вод вне дренирующего воздействия гидрографической сети; стрелками показано направление движения воды

При оценке степени закарстованности массива особо важная роль уделяется истории геологического развития района и классификации карста, хотя эти вопросы больше интересны с точки зрения изучения проявившегося карста и не затрагивают причин современной активизации карста, наиболее интересных с точки зрения планирования строительства и сохранения имеющейся инженерной инфраструктуры.

Вопросы классификации карстового процесса и создаваемых им наземных и подземных карстовых форм с использованием морфологических, генетических, литологических и других признаков, наиболее полно рассмотрены в работах Д. С. Соколова [9], Г. А. Максимовича [10], А. В. Ступишина [11], Н. А. Гвоздецкого [12], В. Н. Дублянского и Г. Н. Дублянской [13].

Одной из ключевых проблем в методике изучения и оценки

закарстованных территорий считается их районирование. Карстологическое районирование и, в частности, на региональном уровне в масштабе 1:50000 - 1:100000 и мельче проводилось на территории Русской равнины Н. В. Родионовым, А. В. Ступишиным, А. Г. Чикишевым, и др.; Башкирии (В. И. Мартин, Н. С. Лиханов, Р. Ф. Абдрахманов и др.); Украины и Молдовы (Г. Н. Дублянская, В. Н. Дублянский); Нижегородской области (ТСН 22-308-98 НН, Е. В. Колосов и др.); Пермской области (К. А. Горбунова, В. Н. Катаев и др.), а также в пределах многих других регионов России.

Вообще, районирование, несмотря на свою значимость, на наш взгляд, представляет наибольшую ценность только с точки зрения выбора дополнительных методов исследования при строительстве на карстоопасных территориях, поскольку отказ от строительства на потенциально опасной территории не всегда является единственно правильным решением. Кроме того, далеко не всегда это возможно. В связи с этим, остро встает вопрос об опасности карстопроявлений.

Для характеристики опасности карстового процесса исследователи использовали различные термины. В 1940 - 1960-е гг. З. А. Макеев, Г. А. Максимович применяли понятие "устойчивость территории". Г. Н. Дублянская и В. Н. Дублянский [14] на основании анализа многочисленной литературы по инженерному карстоведению отмечают, что термин "карстоопасность" был впервые введен и использован в 1970-1980-е гг. Н. В. Родионовым и Б. Н. Ивановым. В 90-е годы XX века понятия устойчивость и карстоопасность становятся синонимами, но до сих пор отмечаются значительные расхождения в понимании содержания этих основных терминов. Часть исследователей понимает под карстовой опасностью быстро протекающее, иногда катастрофическое воздействие карста на земную поверхность [15].

В. В. Толмачев и Ф. Ройтер [16], исходя из того, что основным показателем, учитывающим основные особенности карстовых деформаций, является надежность объекта, т.е. вероятность того, что сооружение

(комплекс зданий и сооружений) за расчетный срок не будет иметь недопустимых деформаций, приводят следующее определение карстоопасности: "характер и степень воздействия карстовых деформаций на грунтовую толщу и сооружения, которые могут привести к затруднению освоения закарстованных территорий".

В свою очередь, И. А. Саваренский и Н. А. Миронов [17] под устойчивостью понимают: "... насколько мала на рассматриваемой территории опасность карстового провала, а также оседаний земной поверхности".

Г. Н. Дублянская и В. Н. Дублянский [13] предлагают понимать под карстоопасностью: "потенциальную опасность освоения закарстованной территории, создающую угрозу инженерным сооружениям, здоровью и жизни людей".

В. Н. Катаев показал, что обсуждаемое понятие, в зависимости от акцентов оценки, может содержать сведения об интенсивности и масштабах карстопроявлений, условиях и факторах развития карстово-суффозионных процессов. Им предлагается следующее определение карстоопасности: "определенное сочетание природных и природно-техногенных условий и факторов развития, карстовых и сопутствующих процессов, способное вызвать динамические явления в основаниях инженерных сооружений на поверхности или внутри карстового массива, в результате которых могут возникнуть аварии, катастрофы и экологические бедствия".

Приведенные выше определения имеют общий характер, тем самым не позволяют количественно оценить карстовую опасность. Общепринятой интегральной мерой рассматриваемой опасности до последнего времени являлась среднемноголетняя интенсивность провалообразования (случаев провалов/км²год), предложенная З. А. Макеевым [18]. Существует несколько классификаций и методов количественной прогнозной оценки карстовой опасности или устойчивости территорий для карстовых провалов,

разработанных И. А. Саваренским, В. В. Толмачевым, Ф. Ройтером, Р. Л. Ху, М. Леи в основном для масштаба 1: 25000 и крупнее.

Методы оценки карстовой опасности (устойчивости), предложенные И. А. Саваренским, В. В. Толмачевым, Ф. Ройтером и Х. Молеком, базируются в основном на вероятностно-статистическом анализе распределения в пространстве "молодых" карстовых воронок, возраст которых обычно не превышает 50-100 лет.

Одним из основных недостатков использования в качестве показателя опасности среднемноголетней интенсивности провалообразования, по мнению Е. В. Копосова [19], является также отсутствие дифференциации карстовых воронок по возрасту. В результате получаются весьма усредненные результаты и необоснованно увеличиваются площади опасных для строительства участков.

По мнению автора, понятие карстовая опасность вообще не может иметь в своей основе показатель среднемноголетней интенсивности провалообразования, так как процесс активизации карстопроявлений совершенно не зависит от количества произошедших на имеющейся площади за определенное время провалов. Основную роль, как уже подчеркивалось выше, следует отводить геомеханическим особенностям карстоопасного массива, его тектонической нарушенности, геодинамическим характеристикам, гидрогеологическому строению и возможности изменения гидродинамического режима.

Гидрогеологические условия развития карста изучались, в основном, на примерах разведки месторождений подземных вод, связанных с карбонатными и сульфатными породами. Такие исследования выполнены Н. Д. Будановым, В. Ф. Прейсом, Н. С. Шабалиной, В. П. Новиковым, И. И. Плотниковым, С. В. Палкиным.

В своей работе Н. Д. Буданов [20] отмечает сложные условия нахождения источников водоснабжения в карстовых районах. Так у подножья Башкирского Кара-Тау (Южный Урал) в бассейне Яман-Елги

(Плохой реки) территория площадью в 2 тыс. км² до последнего времени фактически не была населена, так как источники водоснабжения на земной поверхности отсутствуют. Сложная система глубоких карстовых каналов в нижнепермских и каменноугольных известняках полностью поглощает сток атмосферных осадков на их площади и отводит его в соседний бассейн р. Уфы.

Несколько иная ситуация наблюдается на Северном Урале в районе г. Карпинск. Проблема аварийных утечек реки Турьи из обводного канала и катастрофических нарушений водоснабжения городов Карпинска и Краснотурьинска, возникла сразу после строительства обводного канала и нерешена на протяжении более 50 лет его эксплуатации. Это связано с сильной тектонической нарушенностью участка и активизацией карстопроявлений в местах пересечения канала разломами. Не малую роль здесь играет и техногенное изменение гидродинамического режима.

Вместе с тем сосредоточенные потоки трещинно-карстовых вод вызывают большие затруднения при разработке обводненных месторождений полезных ископаемых. По данным С. В. Ильина [21] шахта Капитальная №1 в Кизеловском бассейне проходила в зоне водообильных карстовых полостей и пещер. Приток воды в шахту в условиях цементации ее ствола при углубке достигал 300 м³/час. Для заполнения карстовых полостей, вскрытых в процессе углубки шахты до 100 м, было израсходовано около 56 тыс. бочек цемента и 40 тыс. бочек глины.

Позднее строительство Южно-Уральского бокситового рудника в районе мощных карстовых водостоков по долине р. Ай, где учитывались особенности распределения подземных вод в карстах, было осуществлено при проходке ствола шахты до глубины 270 м в монолитном блоке известняков в условиях водопритока не более 20 м³/час с применением небольших цементационных работ.

На Североуральском бокситовом руднике из-за карстовых процессов происходит разрушение бетонной облицовки канала р. Вагран, что

способствовало проникновению поверхностных вод в и без того сильно обводненную шахту [22].

В ряде случаев потоки трещинно-карстовых вод успешно используются для водоснабжения, хороший опыт которого имеется в Магнитогорске, Каменск-Уральском и других городах.

Существуют и применяются методические рекомендации по изучению карста при строительстве и наблюдению за устойчивостью существующих инженерных сооружений. Результаты инженерно-геологического изучения карстующихся пород нашли отражение в работах В. Д. Ломтадзе, В. С. Лукина, Б. Н. Иванова, А. Г. Чикишева и др.

Отношение строителей к карстам и пльвунам более или менее устоявшееся. Считается, что наличие их увеличивает вероятность разрушения возводимых над ними сооружений. Однако влияние их на сооружения признается только в тех случаях, когда глубина залегания этих объектов не велика, менее 10 м. По этой причине до сих пор, с 1903 года обсуждаются причины внезапного разрушения Трансконского (Канада) элеватора, карст под которым был глубже, чем на 20-метровой глубине.

Исследования последних лет отчетливо показывают, что карст, расположенный на глубинах, превышающих зону влияния сооружений, может при активизации процессов выноса заполнителя повлечь за собой разрушения зданий и сооружений, провалы линейных объектов, таких как железная и автодорога, газопровод и т.п. В связи с этим, проблема достоверного прогнозирования процессов карстообразования и как следствие, предотвращение аварий и катастроф, связанных с провалами основания сооружений имеет огромное значение, как с точки зрения безопасности жизнедеятельности, так и с экономической точки зрения.

Анализ современного состояния и изученности проблемы опасности карстопроявлений показал, что приведенные выше определения имеют общий характер, тем самым не позволяют количественно оценить карстовую опасность. До последнего времени общепринятой интегральной мерой

опасности карстопроявлений является среднемноголетняя интенсивность провалообразования. Т.е. все методы исследования карстоопасного массива, существующие на настоящий момент времени, сводятся, как правило, к определению потенциально опасных с точки зрения карстообразования участков и ограничению строительства и эксплуатации объектов недропользования на этих территориях.

Методы, позволяющие непосредственно оценивать карстовую опасность для зданий и сооружений (например, путем определения вероятности того, что проектируемый объект за данный период времени не будет поражен карстовым провалом определенного размера), лишь начинают внедряться в практику проектирования в карстовых районах.

В настоящее время делаются попытки математического моделирования обрушения карстовой полости А. К. Федосеевым, ГИ УрО РАН [23].

По полученным им результатам математического моделирования выделяется три сценария обрушения карстовой полости: обрушение в краевой части, высыпание пород в центральной части и полное обрушение кровли полости.

Необходимым условием реализации того или иного сценария является «геометрическая» возможность обрушения породы. Так, условием образования карстового провала над краевой частью полости будет выполнение неравенства:

$$h = \frac{V_a + V_b - k_{\text{раз}} V_a}{r} > 0, \quad (1.1)$$

где h – высота полости, образующейся на верхней границе сульфатных отложений, V_a – объем высыпающейся в краевой части породы, V_b – объем полости в краевой части, $k_{\text{раз}}$ – коэффициент разуплотнения обрушающейся породы, r – максимальная ширина области пластических деформаций.

Результаты численных экспериментов показали, что глубина залегания сульфатов практически не влияет на величину h .

Таким образом, А. К. Федосеевым была построена модель карстовой полости, учитывающая изменение ее формы в процессе роста. Модель описывает пластический характер деформирования карстообразующих пород и обрушение кровли карстовой полости. Определенные в первом приближении необходимые «геометрические» критерии возможности того или иного сценария, позволили предположить, что их реализация практически не зависит от глубины залегания карстующихся отложений.

Полученная А. К. Федосеевым математическая модель обрушения карстовой полости описывает карстовый провал идеальной среды, не зависящей от трещиноватости, нарушенности, геодинамической активности вмещающего массива и требует значительной доработки.

Методы изучения карста очень разнообразны, они включают в себя как поверхностные наблюдения за процессами карстообразования, так и глубинные исследования.

К поверхностным исследованиям относятся выявление карстовых структур по географо-геоморфологическим признакам, результатам исследования карстовых проявлений с поверхности с изучением обнажений, старых горных выработок, полых карстовых полостей (пещер) и т.п.

Глубинные же методы исследований заключаются в непосредственном изучении карстоопасных областей с помощью геофизических исследований и исследований керна скважин, горных выработок, обнажений карьеров и т.п.

Большой вклад в разработку методов геофизических исследований карста внесли А.А. Огильви, А.А. Абрамов, П.В. Вишневский, Л.В. Пинягина.

Породы карстовых районов достаточно дифференцированы по физическим свойствам, что создает благоприятные предпосылки для применения всех геофизических методов кроме магниторазведки (осадочные породы мало различаются по магнитным свойствам) [24]. С их помощью могут быть решены такие задачи, как:

- расчленение разреза по составу, влажности, трещиноватости и

каверзости (электроразведка, сейсморазведка, радиоактивные методы);

- изучение погребенного карстового рельефа (электроразведка, сейсморазведка, гравиразведка);

- определение мощности карстующейся толщи (электроразведка, сейсморазведка);

- обнаружение и картирование пустот и полостей (электроразведка, гравиразведка и сейсморазведка);

- изучение трещинно-карстовых вод (электрокаротаж, расходометрия, резистивиметрия и термометрия).

С нашей точки зрения к данным задачам при прогнозировании карстопроявлений следует отнести также определение тектонической нарушенности массива, выявление простирания и ширины разломов и контактов карстующихся пород с вмещающим массивом. Такие задачи успешно решаются с помощью площадной электроразведки.

На основании многолетнего опыта проведения геофизических работ установлено [25, 26, 27, 28, 29], что наилучшие результаты по картированию кровли ненарушенных карбонатов и выделению участков поверхностного и внутреннего карста достигается путем комплексирования электроразведки с гравиразведкой и малоглубинной сейсморазведкой. Изучение гидрогеологических особенностей закарстованных карбонатных залежей осуществляется, в основном, по данным ВЭЗ, СГ и ЕП.

Нельзя не отметить широкое развитие аппаратной базы, также используемой для исследования карста.

Подобные исследования выполняются с помощью георадиолокатора 17-ГРЛ-1, в котором реализован метод моноимпульсного радиолокационного зондирования с дискретным съемом информации на каждой точке наблюдений. Таким методом удается расчленить разрез по слоям. Но при этом карстовые полости обнаруживаются не по прямым, а по косвенным признакам, основной из которых – отсутствие отражений радиоимпульсов [30].

Разработанная НПФ «Геофизпрогноз» аппаратура для спектрального сейсмопрофилирования успешно используется для поиска карстовых полостей на достаточно больших глубинах.

Пример использования аппаратуры ССП для обнаружения карстовых пустот приведен на рис. 1.12, где показан ССП-разрез, полученный при профилировании вдоль газопровода «Уренгой – Новопсков», в 80 км от Уфы. Массив представлен карбонатными породами.

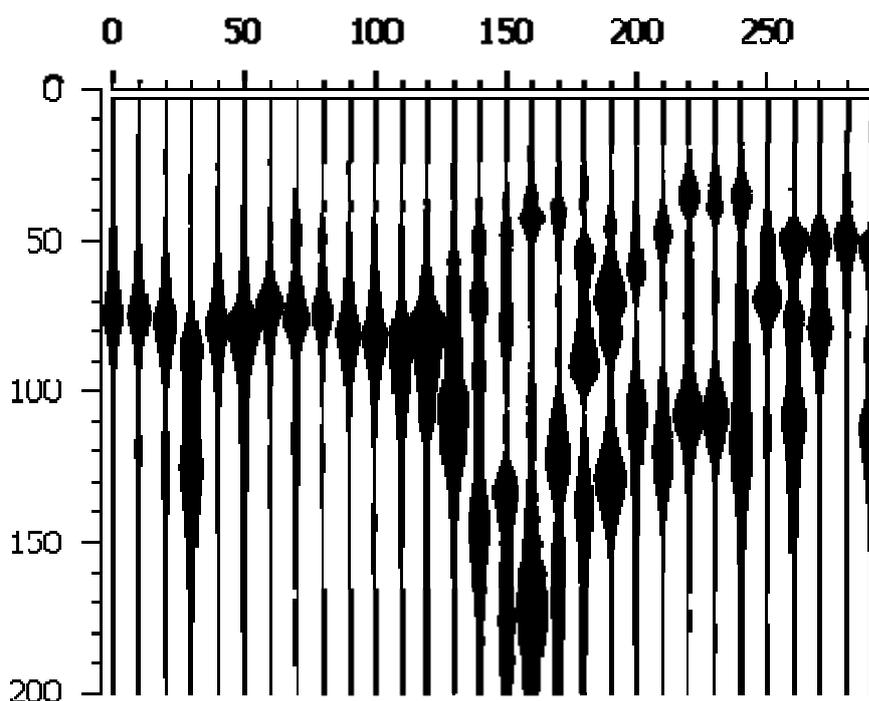


Рисунок 1.12 – Спектральный разрез по профилю

На участке профиля 0–110м на глубине 70–80м видна граница. По ее четкости и характерным изломам (на 30-м и 60-м метрах профиля) можно судить, что граница эта обусловлена наличием известняковой плиты. На участке 120–160м прорисована левая образующая воронкообразного объекта. Правых образующих как бы две, и находящийся в пределах воронкообразного объекта ореол поделен одной из этих двух образующих на две части. В пределах этого ореола находится карст. Возник он в результате воздействия на известняк грунтовыми водами, имеющими кислотный

характер. Мигрируют грунтовые воды в зонах тектонических нарушений, поэтому карсты всегда приурочены именно к воронкообразным объектам.

Верхняя граница карста находится на глубине 40м, однако это не помешало тому, что грунт на участке 130–250м профиля обладает пониженной несущей способностью. Это проявилось провисанием газопроводной трубы.

Получили развитие и многие другие новые методы изучения верхней части разреза: это структурные методы – георадарное зондирование, технология для малоглубинного зондирования становлением в ближней зоне (ЗСБ), аудио-МТЗ и ядерно-магнитный резонанс.

Более подробно о возможностях и применении методов исследований карстоопасного массива рассматривается ниже, в отдельной главе, поскольку эти методы дают возможность изучить массив с целью построения геомеханической модели, что в свою очередь является основным в настоящей работе.

При изучении карста необходим системный подход, геоморфологические исследования должны сочетаться с геофизическими, гидрологическими и геохимическими, только относительная полнота информации может дать почву для реалистичной реконструкции строения территории, ее истории и происходящих в настоящее время процессов, цель которой – составление достоверных прогнозов при поиске полезных ископаемых, при инженерно-геологической оценке территории, при оценке запасов карстовых подземных вод и т. д.

Происходящее последние несколько столетий увеличение антропогенного воздействия ставит новые задачи по изучению карста в техногенной обстановке. Вмешательство человека способно в некоторых случаях катастрофически увеличить скорость карстообразования, например, при постройке водохранилищ в закарстованной зоне, что может привести к крупным катастрофам, не говоря уже об обрушении карстовых полостей под действием техногенной вибрации. Правильная оценка последствий

техногенного воздействия возможна только при хорошем понимании механизмов активизации процессов карстообразования.

Подытоживая все вышесказанное, следует отметить тот факт, что все перечисленные методики исследования карстоопасного массива существующие на настоящий момент времени, сводятся как правило, к определению потенциально опасных с точки зрения карстообразования участков и ограничению строительства и эксплуатации объектов недропользования на этих территориях.

На современном этапе развития цивилизации, одним из основных требований, предъявляемых при строительстве и эксплуатации объектов недропользования, является рациональное использование земель. Все больший объем строительных работ ведется на землях, ранее отнесенных к потенциально опасным для строительства с точки зрения развития процессов карстообразования. Несмотря на это не стоит забывать о возможных последствиях внезапного обрушения карстовых полостей. Некоторые примеры подобных обрушений наглядно продемонстрированы выше. Недоучет любого из факторов, влияющих на активизацию карста, может привести к необратимым последствиям.

Исследования последних лет, проводимые коллективом лаборатории с непосредственным участием автора диссертационной работы, показали необходимость разработки методики изучения карстоопасного массива с точки зрения развития процессов сдвижения от карстовых полостей. Имеющаяся в настоящее время аппаратная база и наработанные методы интерпретации данных позволяют с достаточной степенью надежности определять структурные и геометрические параметры карстовых полостей, состав заполнителя и прочие параметры, требуемые для расчета параметров сдвижения карстоопасного массива с образованием воронок обрушения. Методы исследования тектонического строения, гидродинамического режима и геодинамических характеристик позволяют прогнозировать возможность активизации карстовых процессов, сопровождающихся

суффозионным выносом мелкодисперсного материала заполнителя карстовых полостей, особенно опасного, с точки зрения обрушения вышележащей толщи.

Таким образом, цель диссертационной работы заключается в создании методики, направленной на прогнозную оценку потенциальной опасности выхода обрушения карстовых пустот на поверхность и прогнозе вида и формы деформирования поверхности.

1.3 Задачи исследований диссертационной работы

Идея диссертационной работы заключается в диагностике (прогнозировании) опасности карстопроявлений на основе геомеханической модели массива горных пород. Отсюда вытекает значимость основных ее составляющих. Для создания геомеханической модели требуется исследовать закономерности процесса карстообразования во взаимосвязи с геомеханическими факторами и свойствами массива горных пород. Это является отправной точкой для решения последующих задач.

Основными геомеханическими факторами, влияющими на активизацию процессов карстообразования, являются:

- многоуровневое зонально-блоковое строение Земной коры, определяемое линейными и площадными различно-активными геодинамическими структурами [31]. Геодинамические зоны - структурные элементы горного массива, с локально измененным напряженно-деформированным состоянием горных пород на границах тектонических (геодинамических) блоков. ГДЗ в горном массиве проявляются дезинтеграцией пород, локальным изменением тектонической и литологической структуры пород и сопровождаются аномалиями физических полей. Геодинамика тектонических нарушений определяет трещиноватость и фильтрационные свойства карстующихся пород в таких зонах, что, несомненно, влияет на предрасположенность массива горных пород к

карстопроявлениям;

- гидрогеологическое строение массива горных пород и гидродинамический режим на карстоопасном участке. Как правило, именно техногенное изменение гидродинамического режима приводит к активизации процессов карстообразования с последующим образованием провалов и обрушений;

- геоморфологические особенности строения карстоопасного участка, наличие поверхностных водотоков, площадь водосбора, направление разгрузки поверхностных и грунтовых вод.

Для создания геомеханической модели карстоопасного участка потребуется выбрать наиболее эффективные методы изучения структурных неоднородностей массива горных пород. Аномалии физических полей над геодинамически активными тектоническими нарушениями позволяют их выделять геофизическими методами. Методы геофизики дают объемную информацию о массиве, позволяют оценить весь объем в целом и отдельные его части с любой необходимой детальностью. Это производится без бурения скважин и дорогостоящих лабораторных испытаний. Любые изменения состояния сооружений и грунтов оснований сооружений сопровождаются изменениями параметров геофизических полей. Параметры геофизических полей в геодинамических зонах изменяются аномально (особенно в период структурных изменений материала сооружений и грунтов оснований сооружений, в частности, при их разрушении) и надежно фиксируются современными высокочувствительными геофизическими приборами.

С целью выбора оптимального набора методов для изучения карстоопасного массива, рассмотрен мировой опыт исследований, накопленный с момента изучения карста, как геологического процесса. Проанализированы возможности разных геофизических методов изучения, как самого карста, так и структурных неоднородностей массива, связанных с тектонической деятельностью (тектонические нарушения, разломы разных порядков).

Кроме того, следует оценить возможности прогнозирования и методы исследования гидрогеологического и гидродинамического режима поверхностных и подземных вод. От правильной оценки изменения режима с течением времени зависит достоверность прогноза развития процессов карстообразования на исследуемом участке. Как уже упоминалось выше, изменение гидродинамического режима на карстоопасном участке, неизменно приводит к активизации суффозионно-карстовых процессов на участках с высокими фильтрационными показателями. Изменения режима обычно связаны с техногенным вмешательством в геологическую среду, это приводит к изменению направления и скорости фильтрационных потоков, выносу песчано-глинистого заполнителя из карстовых полостей, их увеличению и обрушению.

Решение вышеупомянутых задач позволит произвести прогнозную оценку развития карстопроявлений на интересующих объектах недропользования, что в свою очередь поможет предотвратить пагубное воздействие провальных процессов и разработать методы борьбы с ними.

Таким образом, создание методики, направленной на прогнозную оценку потенциальной опасности выхода обрушения карстовых пустот на поверхность и прогнозе вида и формы деформирования поверхности ставит перед диссертационной работой следующие задачи:

- анализ современного состояния и изученности опасности карстопроявлений, методов изучения карста и прогнозирования вредного влияния на объекты недропользования;
- изучение геомеханических процессов, происходящих на карстоопасном участке, и построение его геомеханической модели для определения параметров сдвижения от карстовых пустот;
- обоснование методов исследования массива горных пород при построении геомеханической модели;
- разработка методики оценки опасности карстопроявлений с точки зрения выхода процесса сдвижения на земную поверхность, а также влияние

погребенного карста на устойчивость объектов недропользования;

– промышленные эксперименты по проверке разработанной методики для решения конкретных задач обеспечения безопасности строительства и эксплуатации объектов недропользования на закарстованных территориях.

Выводы

1. Прогнозирование карстопроявлений является актуальной задачей. Только в России карстовым деформациям подвержено около 13 % территории, в том числе в пределах более 300 городов и тысяч более мелких поселений, в которых проживают 19 % населения страны. Суммарный экономический ущерб от карстово-суффозионных процессов составляет в России, по экспертным оценкам, от 30 до 45 млрд. руб. в год.

2. Анализ современного состояния и изученности проблемы опасности карстопроявлений показал, что опасность карстопроявлений, на настоящий момент времени, оценивается на вероятностно-статистической основе, без учета геомеханических условий и факторов.

3. Методы, позволяющие непосредственно оценивать карстовую опасность только начинают внедряться в практику проектирования объектов недропользования в карстоопасных районах, в том числе делаются попытки компьютерного моделирования процесса сдвижения от карстовых пустот, которые рассматривает идеализированную среду без учета реальных структурных особенностей массива горных пород налегающей толщи.

4. В исследовании карстов широко используются геофизические методы. С точки зрения прогноза деформирования земной поверхности наибольший интерес представляют методы, позволяющие изучить структурно-тектоническое строение карстоопасного участка. Эта задача успешно решается с помощью методов электроразведки, спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования.

2. ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МОДЕЛЬ КАРСТООПАСНОГО УЧАСТКА МАССИВА

2.1 Основные факторы, определяющие карстоопасность массива горных пород

С освоением закарстованных территорий тесно связано понятие карстоопасность, которое относительно решаемой в работе задачи представляется как определенное сочетание природных и (или) природно-техногенных условий и факторов развития, карстовых и сопутствующих процессов, способное вызвать динамичные явления в основаниях инженерных сооружений на поверхности или внутри карстового массива, в результате которых могут возникнуть аварии, катастрофы, экологические бедствия.

С точки зрения оценки опасности карста для различных объектов, выделяются следующие типы карстовых деформаций земной поверхности:

- обрушение налегающей толщи пород над карстовыми пустотами с образованием на земной поверхности, в зависимости от параметров и условий залегания пустот, провалов или локальных зон оседаний с плавными деформациями;

- постепенные длительные оседания (коррозия) земной поверхности в местах выхода растворимых пород на поверхность за счет их растворения, суффозионного выноса, а также перехода некоторых типов пород в тиксотропное и квазитиксотропное состояние;

- комбинированные и промежуточные типы (плавные оседания, осложненные провалами).

Таким образом, во всех случаях опасность карстопроявлений связана, прежде всего, с геомеханическими факторами и геомеханическими процессами, происходящими в массиве горных пород.

Четыре условия развития карста, обоснованные Д.С. Соколовым, а

именно – наличие растворимых пород, их водопроницаемости, движущихся вод и их растворяющей способности (агрессивности), определяют лишь возможность развития карста, но отнюдь не последствия.

Поставленная перед диссертационной работой задача диагностики опасности карстопроявлений требует, именно, ответа на вопрос – каковы будут последствия от развития карста для конкретных объектов.

В связи с этим, возникает необходимость рассмотреть геомеханические факторы, определяющие закономерности поведения пород, вмещающих карстовые полости (развитие процесса сдвижения над карстовой полостью).

Важнейшими факторами являются:

- параметры имеющейся или возможной карстовой полости, ее размеры и форма;

- глубина ее заложения от земной поверхности или от сооружения, расположенного в зоне возможного негативного влияния;

- прочностные и структурные особенности вмещающих пород и налегающей толщи;

- уровень геодинамической активности участка недропользования.

Исходя из условий карстообразования и определяющих геомеханических факторов опасности карста, перед диагностикой опасности карстопроявлений возникают следующие задачи:

1. изучение иерархически блочной структуры и параметров ее характерных зон, определяющих параметры карстов;

2. оценка уровня геодинамической активности массива и ее распределение по структурным нарушениям, определяющей фильтрационные свойства массива и возможность его перехода в тиксотропное состояние;

3. выявление степени трансформации свойств пород в геодинамически активных зонах, определяющих фильтрационные свойства и способность к суффозионным процессам и др. (тиксотропия и т.п.);

4. изменение гидрогеологических и гидродинамических режимов,

определяющих скорость и параметры карстово-суффозионных процессов.

2.2 Иерархически блочная структура и характерные зоны массива горных пород

В соответствии с основными положениями теории глобальной тектоники плит, литосфера Земли представляет собой относительно жесткую оболочку, "плавающую" на поверхности достаточно вязкой мантии. Эта оболочка разбита региональными тектоническими нарушениями на ряд крупных литосферных блоков, линейные размеры которых достигают нескольких тысяч километров; эти, так называемые, мегаблоки находятся в постоянном движении относительно друг друга. Каждый литосферный блок, в свою очередь, разбит на множество более мелких структурных блоков системами региональных и локальных тектонических нарушений, по которым также происходят тектонические подвижки. Таким образом, реальный массив горных пород представляет собой сложную иерархически-блочную среду, каждая структурная единица которого находится в постоянном движении относительно окружающих ее структурных единиц. Уже установлено, что тектонические нарушения даже невысокого ранга обладают достаточной подвижностью, которая носит как трендовый направленный характер, так и представлена циклическими полигармоническими колебаниями с различной продолжительностью циклов. В настоящее время достаточно хорошо известно о движениях литосферных плит, происходящих по таким крупным живущим разломам как Сан-Андреас в Калифорнии, Северо-Анатолийский в Турции и др. На остальной же территории Земли массив горных пород в большинстве случаев остается малоисследованным и представляется как среда статическая и незыблемая.

Различные дефекты строения пород приповерхностной части литосферы имеют самые разные размеры – от микроскопических до многих сотен и даже тысяч километров (рис. 2.1-2.2).



Рисунок 2.1 – Обнажение закарстованного массива как пример иерархически блочной структуры

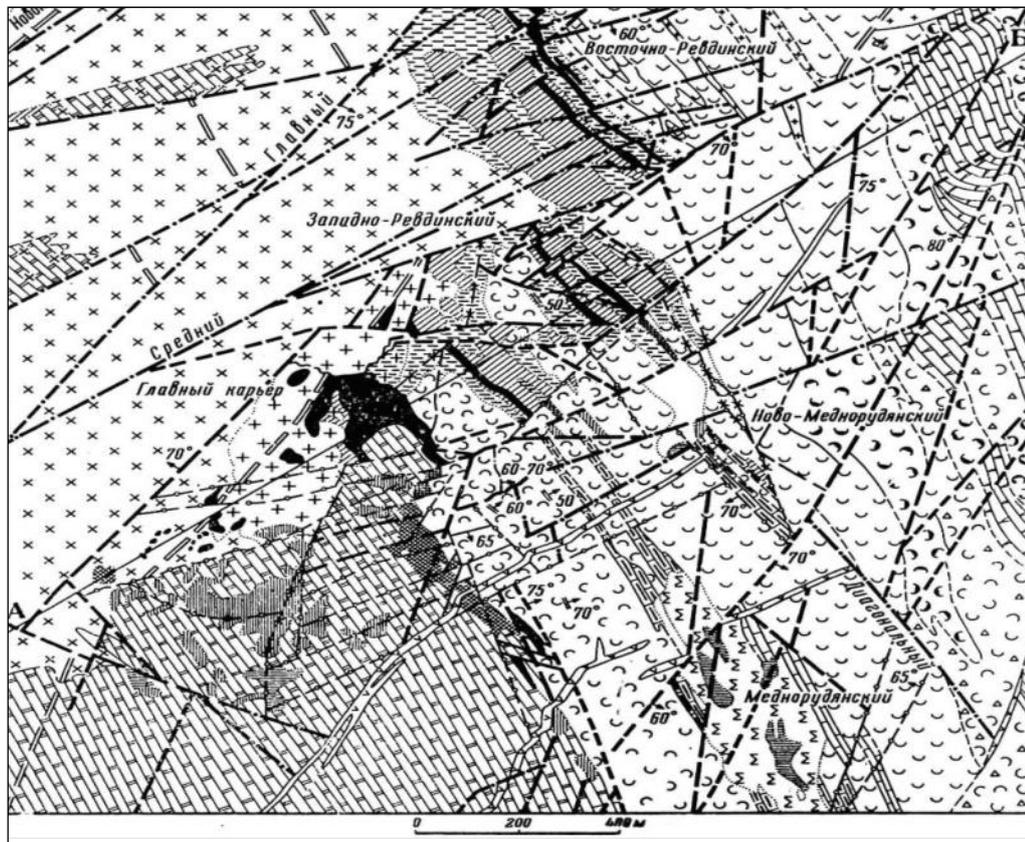


Рисунок 2.2 – Схематическая геологическая карта Высокогорского месторождения как пример блочно структурированного массива

По размеру дефектов выделяют пять уровней [34], примерно соответствующих уровням неоднородности [35].

IV – Дефекты кристаллической решетки минералов, составляющих породу: вакансии, межузельные атомы, дислокации и т.п. изучаемые в физике твердого тела.

III – Микротрещины, разбивающие отдельные кристаллы и небольшие участки горной породы. Размер их может быть условно ограничен величинами 0.01 мм – 10 см (по длине).

II – Макротрещины, видимые в обнажениях и изучаемые в ряде отраслей геологии. Условно их линейные размеры ограничиваются интервалом 10 см – 100 м.

I – Разрывы, разбивающие массивы горных пород и связанные обычно с локальными складчатыми структурами. Условно их линейные размеры принимаются в интервале 100 м – 10 км.

0 – Крупные тектонические разрывы, связанные с региональными полями тектонических напряжений и разбивающие целые участки литосферы – вплоть до глубинных разломов.

Анализ неоднородности горных пород в массиве позволяет ввести достаточно строгое определение понятия структуры массива, удобное для инженерных приложений. Под структурой можно понимать совокупность «закономерных» изменений свойств пород в массиве [36]. При этом неоднородность высшего порядка и эффективная характеризуется как свойства материала, из которого построен массив. Массив есть естественная конструкция, созданная природой из этого материала.

Тектонические нарушения, выполняющие роль швов между соседними блоками, всегда имеют определенную толщину (мощность), зависящую, как правило, от их ранга. Она может изменяться от нескольких сантиметров до нескольких метров, а у крупных разломов она может достигать десятков и сотен метров.

При использовании обычных методов исследования, принятых в инженерной геологии и при обычных размерах крупных инженерных сооружений (порядка сотен метров или первых километров) возникает следующая характерная ситуация. Дефекты уровней IV и III, т.е. дефекты кристаллической решетки и микротрещины, выступают в роли неоднородности высшего порядка и вносят свой вклад в формирование свойств пород как материала. Дефекты уровней 0 и I определяют инженерно-геологические условия территории строительства в целом (региональные разрывы) или выступают в роли крупных, относительно немногочисленных элементов структуры массивов горных пород. Дефекты II уровня (макротрещины) занимают промежуточное положение, обуславливая, во-первых, крайне нерегулярный характер изменчивости свойств пород в массиве и, во-вторых, различие между свойствами пород в образце и в массиве. Поэтому проблема учета макротрещиноватости является основной в комплексе задач инженерной геомеханики массивов горных пород.

Структура, прочностные и деформационные свойства массива горных пород в тектонических нарушениях резко отличаются от пород в блоках. Они, как правило, сильно трещиноваты, часто перетерты до дресвяно-песчано-глинистого состояния, вследствие чего в массиве имеют низкие прочностные и деформационные характеристики, хотя отдельные образцы пород по этим показателям могут немногим отличаться от аналогичных пород в блоках.

Второй важной особенностью иерархически блочного массива горных пород является взаимная подвижность блоков. По своему происхождению ее можно разделить на два вида: естественные движения, обусловленные природными процессами, протекающими в массиве горных пород; техногенные, вызванные процессами недропользования.

Истоки природной подвижности, именуемой современными геодинамическими движениями, пока до конца неясны. Причиной ее может служить большое число факторов эндогенного и экзогенного характера. Для

практических целей решения проблемы снижение риска техногенных катастроф важен факт ее существования, возможность изучения параметров проявления и влияния на безопасность объектов недропользования.

С точки зрения активизации процессов карстообразования, наибольший интерес представляют границы блоков, т.е. тектонические нарушения различного порядка, представленные сильнотрещиноватыми дезинтегрированными породами, имеющими повышенные фильтрационные характеристики, особенно в окраинных частях. Кроме того, локальные водоупоры, представленные неизменными блоками, провоцируют изменения направления движения подземных вод, что чревато усилением гидродинамической нагрузки на слабые карстующиеся породы.

Примером влияния тектонических нарушений на активизацию процессов карстообразования может служить участок газопровода Бухара-Урал Красногорского ЛПУ.

Исследуемый участок газопровода Бухара-Урал находится северо-западнее поселка Красногорский Челябинской области.

Активные карстовые процессы до провалов, образовавшихся в 2000 году, не отмечались. В семидесятые годы по информации работников Красногорского ЛПУ севернее исследуемого участка на пересечении I-ой нитки газопровода с разломной зоной возникал провал небольшого размера, был ликвидирован путем засыпки глинистым грунтом и больше не проявлялся.

Кроме того, на юго-западном фланге карстоопасной зоны, установленной исследованиями данной работы, в рельефе поверхности отмечаются два мульдообразных понижения, которые по своим параметрам могут идентифицироваться как остаточные мульды затянувшихся процессов прошлых лет.

Таким образом, инженерно-геологическое и гидрогеологическое строение исследуемого участка благоприятствует образованию карстов в самих известняках и, особенно, в разломных зонах, выполненных рыхлыми

обломочными и глинистыми отложениями. Однако активных процессов карстообразования, кроме отмеченных выше, за период эксплуатации газопровода до 2000 года не происходило. Следовательно, причина активизации карста более вероятно в изменениях условий, происшедших за последние годы. Схема образования карстовых провалов представлена на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Схема развития карста на участке газопровода

Карстовые полости образуются путем вымывания мелкодисперсной фракции песчано-глинистых грунтов в трещины скального трещиноватого массива известняков. Вынос происходит за счет гидродинамического режима подземных вод, связанного с искусственно созданной депрессионной воронкой и изменением направления движения подземных вод (рис. 2.4).

Как видно из рисунка, исходное направление движения подземных вод совпадает с простиранием тектонического нарушения. В связи с началом работы водозабора образовалась депрессионная воронка, которая на настоящий момент приблизила уровень подземных вод к отметке -30 метров

от уровня земной поверхности. При этом направление движения подземных вод сменилось с субмеридионального на субширотное.

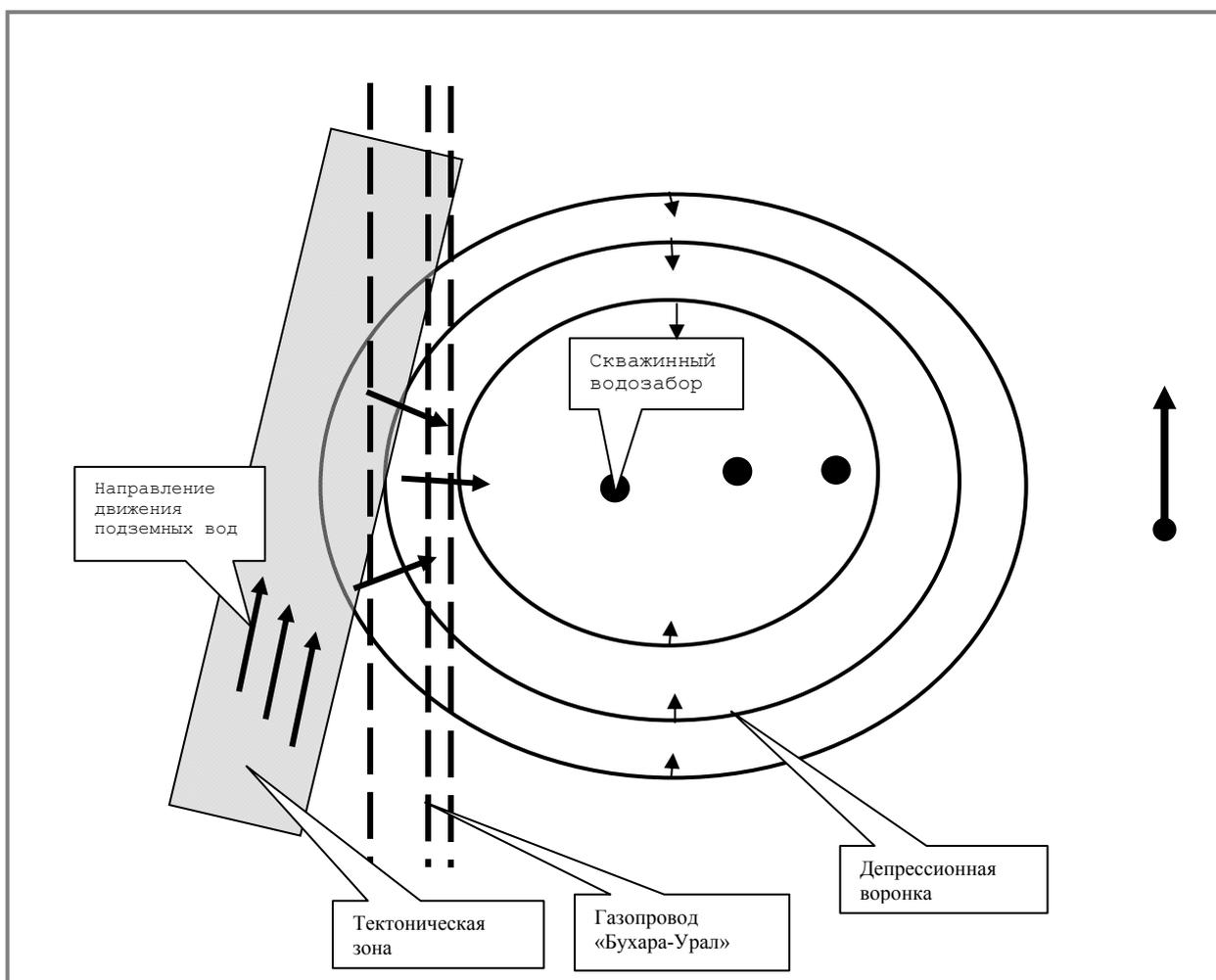


Рисунок 2.4 – Гидродинамическая ситуация на участке газопровода

Учитывая уровень залегания подземных вод, глубина образования карстовых полостей находится в пределах глубин 30-40 метров от земной поверхности.

В геомеханическом отношении наиболее активным карстоопасным участком является область распространения песчано-глинистых отложений на границе с трещиноватыми скальными известняками, попадающими в тектоническую зону. Глубина образования карстовых полостей напрямую связана с гидродинамическим режимом подземных вод, т.е. с уровнем и направлением движения последних, так и с иерархически блочным строением массива горных пород. Это подтверждает образование провалов

именно в зоне тектонического нарушения, а не на всей территории депрессионной воронки. Исследованиями был выявлен высокий уровень современных циклических геодинамических движений, спровоцировавший образование воронок обрушения за счет разрушения потолочины кровли.

На основании выше приведенных примеров, а также опыта многолетних исследований на горно-обогатительных комбинатах и в пределах городской инфраструктуры иерархически блочное строение, а в частности, активные тектонические нарушения являются основными факторами, определяющими устойчивость оснований сооружений и подверженность развитию процессов карстообразования.

2.3 Современная геодинамическая активность и закономерности ее распределения в массиве горных пород

Из отмеченных выше современных представлений о динамике земной коры следует, что она расчленена на структурные блоки и микроблоки. Блоки находятся в стадии неустойчивого равновесия, постоянно нарушаемого эндогенными и экзогенными процессами. Следовательно, они находятся в непрерывном движении, которое характеризуется различной направленностью и интенсивностью.

Собственно зоны разломов – это совокупность оперяющих главный сместитель разрывов, трещин и приразломных складчатых деформаций. В научной литературе эти зоны именуется по-разному и сопоставляются с подзонами аномальной трещиноватости и тектонических клиньев [37] либо с зонами динамического влияния разлома [38]. Ширина таких зон изменчива и зависит от кинематики и геометрии разлома, а также от возраста и физико-механических свойств вмещающих пород. Так, ширина наиболее раздробленной части зоны Таласо-Ферганского разлома в разных сегментах колеблется от десятков до сотен метров, при этом позднечетвертичное смещение сосредоточено в узкой полосе вдоль одного сместителя.

Разломы образуют основной тектонический каркас, который определяет динамику земной коры. Эти границы получили название геодинамические зоны. Они могут иметь либо аномально напряженное состояние, либо представлять собой структуры, по которым происходили или происходят тектонические подвижки.

Многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых доказано наличие движений в земной коре. Эти движения, как правило, приурочены к тектоническим нарушениям.

Наличие знакопеременных смещений в разломной зоне может существенно повлиять на фильтрационные свойства массива. Изменение фильтрационных свойств массива горных пород тектонического нарушения в сочетании с изменением гидрогеологического режима может явиться причиной активизации карстовых процессов.

История изучения геодинамических движений берет свое начало с начала 20 века, и активно прогрессирует в настоящее время.

Вот основные этапы познания современных геодинамических движений:

- начало XX века – гипотеза А. Вегенера о дрейфе континентов, которая уже во второй половине столетия обрела статус теории тектоники литосферных плит [39]. Эта теория по своей сути впервые сдвинула литосферные плиты и материки в горизонтальной плоскости и наделила их современными движениями. Появление спутниковых технологий геодезии позволило экспериментально определить численные значения этих перемещений;

- 60-е – годы XX века – теория тектоники литосферных плит;

- конец XX века – внутриплитовые современные циклические геодинамические движения в разломных зонах (амплитуды до 70 мм, продолжительность циклов 0,1-1 год и более) Ю.О.Кузьмин [40] (рис. 2.3);

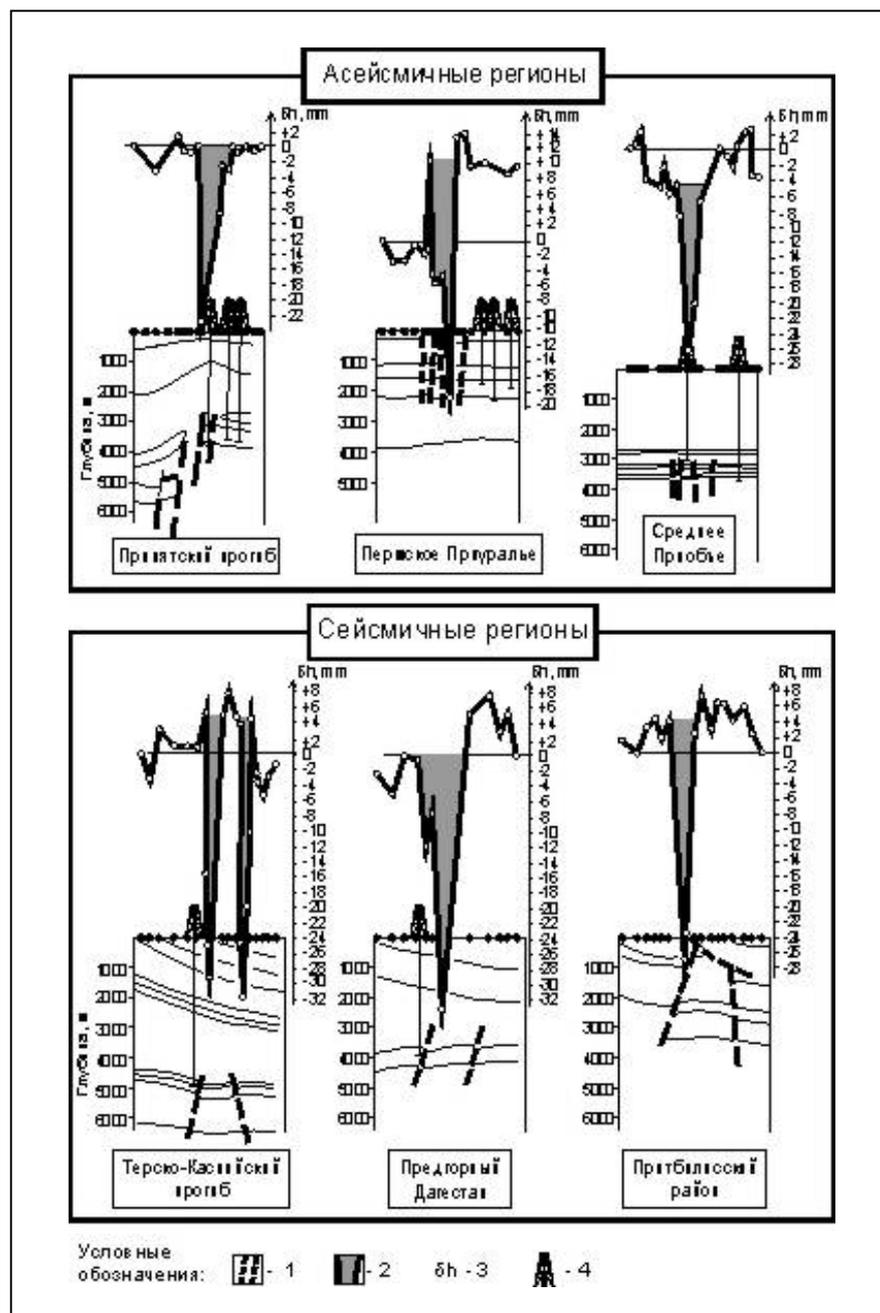


Рисунок 2.3 – Суперинтенсивные современные геодинамические движения в разломных зонах по активные зоны по Ю.О. Кузьмину

– конец XX начало XXI веков – короткопериодные циклические современные геодинамические движения (амплитуды: вертикальные до 100-110 мм, горизонтальные до 50-65 мм; продолжительность циклов от нескольких секунд до минуты, часа, нескольких часов и более) ИГД УрО РАН (рис. 2.4).

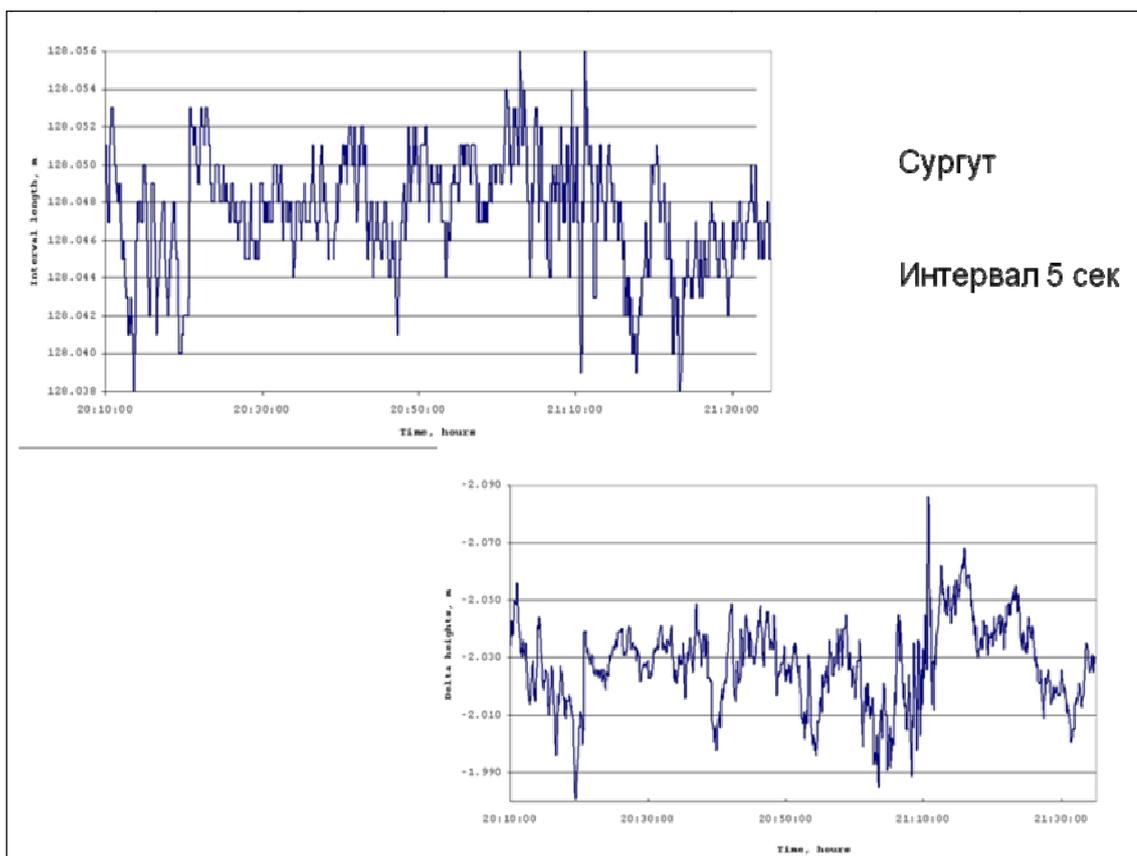


Рисунок 2.4 – Короткопериодные циклические современные геодинамические движения по ИГД УрО РАН

Экспериментальное изучение геодинамических движений массива горных пород и земной поверхности, играющих основную роль в формировании напряженно-деформированного состояния, до недавнего времени представляло собой сложнейшую научную проблему, так как было сопряжено с необходимостью проведения высокоточных измерений смещений на базах в десятки километров в миллиметровом диапазоне точности. Практическая возможность постановки серьезных экспериментов в этой области открылась с внедрением в практику проведения научных исследований GPS – технологий – технологий спутниковой геодезии.

Исследованиями выявлены два вида геодинамических движений: циклические и трендовые. С точки зрения развития процессов карстообразования, оба вида движений способствуют изменению прочностных и фильтрационных свойств массива горных пород, что, с одной

стороны, приводит к активизации карстово-суффозионных процессов, с другой, способствует развитию деформаций вплоть до образования провалов.

Деление современных геодинамических движений на циклические короткопериодные, циклические длиннопериодные и трендовые производится весьма условно. Пока нет четко отработанных временных критериев, позволяющих однозначно производить классификацию получаемых экспериментальных данных.

В рамках данной работы к короткопериодным циклическим движениям отнесены такие движения, продолжительность циклов которых укладывалась один и более раз в сеанс непрерывных наблюдений. То есть, с учетом продолжительности сеанса, составляющего обычно несколько часов, короткопериодными считаются циклические движения с продолжительностью циклов от нескольких секунд до нескольких часов.

К длиннопериодным циклическим движениям отнесены движения, циклы которых выявлялись при повторных наблюдениях, проводимых, обычно, через полгода или год.

К трендовым движениям отнесены смещения, получаемые при повторных определениях координат геодезических пунктов, установленных ранее. Чаще всего период от оборудования геодезических пунктов до повторного определения их координат составлял 10-15 лет и более.

Таким образом, из приведенных понятий следует, что принятое деление современных геодинамических движений не имеет жестких критериев и нередко допускает неоднозначность в их разделении. Особенно это характерно для длиннопериодных и трендовых, когда циклы выходят на продолжительности в несколько лет и более.

При определении параметров длиннопериодных и трендовых движений использовались методические приемы, как определения взаимных смещений парных реперов, так и полных смещений каждого репера.

Рассматривая всю гамму наблюдаемых циклических знакопеременных и трендовых движений, можно заключить, что основным свойством

геологической среды, особенно в разломных зонах, является нахождение ее в непрерывном движении.

Места проявления геодинамических движений в большей мере тяготеют к активным тектоническим структурам и непосредственно прилегающим к ним объемам пород и участкам земной поверхности. Экспериментально в этих зонах установлены наибольшие амплитуды смещений. С удалением от тектонических структур вглубь структурных блоков наблюдается снижение уровня деформаций. По данным, полученным в работе А.Е. Балека [41] установлено, что поведение массива на базах 20-30 и более метров соответствует поведению сплошной среды при условии введения в расчетные значения деформации, полученные решением упругой задачи, корректирующих коэффициентов $K_{\text{погр}}=3,0\pm 0,3$ – для пространственно протяженных зон концентрации деформаций (тектонические нарушения); $K_{\text{конс}}=0,5\pm 0,06$ – для относительно стабильных участков массива, находящихся между этими зонами.

Тектонические структуры с выраженным трендовым характером естественных движений встречаются довольно редко, но часто иницируются техногенной деятельностью. Так, например, на шахте Магнетитовой, разрабатывающей Высокогорское железорудное месторождение, в 2000 году произошла подвижка по взбросо-сдвигу Среднему на 25 – 30 см, зафиксированная в подземных горных выработках, а 1 октября 2009 г. произошла на поверхности, нарушив железнодорожную станцию Гора Высокая.

Циклические движения более распространенные и воздействие их более многогранно и проявляется как в непосредственном влиянии циклических деформаций на сам объект, так и через изменение свойств массива горных пород в разломных зонах под влиянием переменных циклических нагрузжений.

Изменение свойств массива горных пород в разломных зонах под влиянием переменных циклических нагрузжений довольно распространенное

явление, и впервые отмечено, пожалуй, в работах НТФ «Геофизпрогноз» на основе изучения разломных зон методами сейсмопрофилирования [42]. Было установлено, что в разломных зонах образуются области с существенными отклонениями прочностных и деформационных свойств в массиве горных пород. Структурные блоки и изготовленные из них образцы пород при испытаниях имеют те же или близкие показатели, что и аналогичные литологические виды пород, примыкающие к разломной зоне. А в массиве горных пород разломной зоны свойства существенно отличаются.

Было высказано предположение, что в разломной зоне массив горных пород находится в тиксотропном состоянии. На основе этой гипотезы были решены многочисленные практические задачи, высказаны представления по механизму и природе многих техногенных аварий и катастроф, в том числе и по известной катастрофе метрополитена в г. Санкт-Петербурге.

Тиксотропия в разломных зонах, сложенных во многих случаях скальными породами с более нарушенной структурой, проявляется в размытой форме на протяжении длительных промежутков времени, а возможно и постоянно в историческом плане. Это явление более точно следует охарактеризовать термином – квазитиксотропия.

Предположительно, причиной квазитиксотропного состояния пород разломной зоны являются знакопеременные циклические смещения. Вызванные этими смещениями знакопеременные циклические нагрузки приводят к изменению прочностных и деформационных свойств, то есть к квазитиксотропии, способствуя развитию процессов обрушения над сформировавшимися карстами с образованием провалов на поверхности. Такие явления имели место в жилом микрорайоне Красная горка г. Каменск-Уральского [43] и на уже упомянутом выше газопроводе Бухара-Урал на участке Красногорского ЛПУ на Южном Урале в районе г. Красногорский [44]. На обоих участках проводились непрерывные наблюдения за короткопериодными геодинамическими смещениями. Максимальные значения горизонтальных и вертикальных смещений и деформаций

приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Исследуемый объект	Вид наблюдений	Максимальные смещения, мм		Максимальные деформации, 1/1000	
		Горизонт.	Вертик.	Горизонт.	Вертик.
Каменск-Уральский	Непрерывные	8	22	0,08	0,37
Красногорский, газопровод Бухара-Урал	Непрерывные	38	63	0,18	0,17

Причиной образования карстовых провалов явилось воздействие переменных нагрузок на породы разломных зон и переход их в квазитиксотропное состояние, снижающее их прочностные свойства и активизирующее суффозионные процессы. Серия карстовых воронок, образовавшаяся в разломной зоне, пересекающей газопровод, вызвала обнажение третьей нитки газопровода, создавая угрозу ее сохранности.

Не менее интересные материалы были получены при исследовании аварии канализационного коллектора в г. Сургуте.

Механизм разрушения коллектора происходил в следующей форме:

- песчано-глинистые породы разломных зон под влиянием знакопеременных смещений и деформаций находятся в квазитиксотропном состоянии, имея по отношению к окружающим породам аномально пониженные несущие свойства;

- сборная железобетонная тубинговая крепь канализационного коллектора с внутренней монолитной железобетонной обделкой, обладающая достаточным весом и находясь под нагрузкой от налегающей толщи, не встречает в квазитиксотропном массиве достаточной опоры, проседает и прогибается, получая нештатное нагружение, не предусмотренное ее конструкцией;

- нештатную нагрузку крепи вызывают непосредственно и сами короткопериодные геодинамические движения;

- под действием этих двух факторов монолитная железобетонная обделка коллектора разрушается с образованием кольцевых трещин разрыва, превращая монолитный коллектор в обособленные секции длиной 5 – 7 м;

- на последнем этапе к процессу разрушения подключаются грунтовые воды, уровень которых находится выше заложения канализационного коллектора; устремляясь в образовавшиеся трещины внутрь коллектора, который теперь уже выполняет функции дренажного устройства, они выносят с собой песчано-глинистые породы, находящиеся в квазитропном состоянии, образуют суффозионные карстовые полости, реализующиеся выходом провалов на земную поверхность и окончательным разрушением коллектора.

Экспериментально было установлено, что в разломных зонах и на примыкающих к ним территориях действуют современные геодинамические циклические смещения с широким спектром частот и амплитуд [45]. Наиболее контрастными среди них являются смещения с продолжительностью циклов около одной минуты и около одного часа. Имеются и другие менее выраженные циклы. Уровень напряжений и деформаций, вызванный этими смещениями, превышает допустимые значения для монолитной железобетонной внутренней обделки коллектора, закрепленного железобетонными тубингами.

Таким образом, в основе приведенного примера техногенной аварии лежит комплексное проявление короткопериодной геодинамики, реализуемое как через непосредственное воздействие смещений и деформаций на сооружение, так и опосредованно через изменение свойств пород разломной зоны.

2.4 Взаимосвязь гидрогеологических характеристик карстоопасных участков со структурой и геодинамической активностью массива горных пород

Гидрогеологические условия карстовых массивов, в общем, сходны с условиями, присущими другим водопроницаемым породам, но подземные воды в них, особенно в верхнем этаже, находятся в более интенсивном движении.

Своеобразный рельеф закарстованных массивов, быстрое проникновение атмосферных и речных вод на глубину создают особые черты режима карстовых вод.

Главной особенностью их режима являются резкие колебания уровня, амплитуда колебаний зависит от глубины залегания подземных вод и от условий их питания. Карстовые воды подвержены воздействию эпизодических факторов режима (ливневые осадки, бурное снеготаяние), причем реакция на их воздействие происходит так быстро, что требуются очень частые наблюдения, чтобы уловить все колебания, происходящие в карстовых водах.

Для геомеханических и гидрогеологических характеристик горных пород определяющими являются их структура, выраженная во взаимосвязи минеральных зерен, кристаллических решеток, агрегатных состояний, блоков, разделенных иерархией пустот трещин различного масштаба и уровня, начиная от крупных тектонических нарушений и кончая пустотами и трещинами внутри отдельных минеральных зерен и кристаллов горных пород, от десятков километров до долей микрона. Установлено, что разноуровневая пустотность и трещиноватость горных пород и массивов при анализе геомеханической модели горного массива является центром и причиной снижения прочностных физико-механических параметров для отдельных уровней и масштабов этого массива, соответствующих, различным по определенным размерам, системам порово-трещинного

пространства. Математически и экспериментально описаны два вида взаимосвязи геомеханических параметров со структурой порово-трещинного пространства. Если система трещин не образует замкнутой сети, полностью разделяющей массив на отдельные блоки, тогда, чем выше объем трещин, тем меньшей прочностью обладает горная порода. Зависимость имеет линейный обратно пропорциональный характер. В момент, когда трещины смыкаются, образуя замкнутое пространство, и отдельные блоки горных пород теряют связь друг с другом, представляя собой набор обломков, физико-механические параметры снижаются резко, скачкообразно, даже при незначительном изменении объема трещиноватости. В этом проявляется структурная чувствительность геомеханических параметров к трещиноватости, зависимости имеют нелинейный характер.

В гидрогеологической модели системы порово-трещинного пространства являются основными водопроводящими каналами, т.е. по своей сути играют главную роль в формировании водопроводящих свойств массива горных пород. Таким образом, “элементы разупрочнения” в геомеханической модели горных пород и массивов, а также “элементы водопроводимости” в гидрогеологической модели физически, вещественно представлены одними и теми же объектами, трещинами и пустотами различного уровня с различным составом заполнителя.

Следовательно, взаимосвязь между геомеханической и гидрогеологической моделью горных пород и массивов очевидна, ее теснота должна быть высокой, хотя знак этой зависимости будет в значительной степени зависеть от состава трещинного заполнителя.

Наибольшей трещиноватостью, и как следствие, водопроводимостью обладает массив горных пород в зонах тектонических нарушений, к этим же зонам приурочены области прогрессивного развития карстовых полостей, сопровождающихся образованием провалов и мульд сдвижения на земной поверхности.

Следует отметить, что трещиноватость и дезинтеграция массива горных

пород формируется не только, в процессе подвижек, произошедших не только в древнее время, но и за счет современных геодинамических движений земной коры как трендовых, так и циклических, причем за счет последних, трещиноватость развивается еще в большей степени.

Активность, в первую очередь, зависит от структуры горного массива. Максимальные колебания фиксируются в зонах тектонических нарушений, что объясняет приуроченность тексотропии горного массива к тектонике, а как следствие, обводненность и водопроницаемость горного массива также жестко привязаны к короткопериодным колебаниям, как и к структуре.

Выводы

1. Основными геомеханическими факторами, определяющими карстоопасность массива горных пород, являются:

- параметры карстовой полости, ее размеры и форма;
- глубина ее заложения от земной поверхности;
- структурно-тектоническое строение налегающей толщи;
- уровень геодинамической активности тектонических нарушений.

2. Массив горных пород имеет иерархически блочное строение. Свойства пород в зонах тектонических нарушений резко отличаются от свойств горных пород, находящихся внутри структурных блоков. Тектонические нарушения представлены сильнодислоцированными грунтами и характеризуются низкой прочностью и устойчивостью. Важной особенностью иерархически блочного массива горных пород является взаимная подвижность блоков.

3. Места проявления современных геодинамических движений в большей мере тяготеют к активным тектоническим структурам и непосредственно прилегающим к ним объемам пород и участкам земной поверхности. Экспериментально в этих зонах установлены наибольшие амплитуды смещений. С удалением от тектонических структур вглубь

структурных блоков наблюдается снижение уровня деформаций. Доказано, что расчетные значения деформации для зон тектонических нарушений в 4-6 раз превышают деформации в относительно стабильных участках массива, находящихся между этими зонами.

4. Взаимосвязь гидрогеологических, структурно-тектонических и геодинамических характеристик карстоопасного массива имеет большое значение при прогнозировании карстопроявлений. Фильтрационные свойства горного массива, отвечающие за процессы карстообразования в массиве, полностью зависят от степени его трещиноватости и тектонической нарушенности. Современная геодинамическая активность тектонических нарушений, в свою очередь, провоцирует активизацию трещиноватости и переход массива в тиксотропное состояние, предопределяя развитие обрушений над карстовой полостью.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОСТРОЕНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

3.1 Обоснование методики исследования карстоопасного массива

Карстоопасный массив представляет собой сложный по своей структуре, строению, гидро- и геодинамическим характеристикам массив горных пород, требующий индивидуального подхода при выборе методов и методики его изучения. Возможность использования методов исследования массива горных пород для построения геомеханической модели оценивается наличием взаимосвязи физических полей, параметров и свойств массива горных пород, с геомеханическими и гидрогеологическими свойствами, состоянием, процессами и явлениями [46-51].

Структурно-вещественный состав горных пород и массивов во всей своей совокупности твердотельной, жидкой, газообразной фракции и агрегатных состояний неразрывен с многочисленными гранями физических свойств, определяющих те или иные физические явления и физические поля. Один и тот же структурно-вещественный комплекс горных пород и массивов обладает одновременно широким диапазоном изменения магнитных, электрических, геомеханических, тепловых, радиоактивных, гравитационных, сейсмоакустических, плотностных, емкостных и других видов параметров, свойств и полей. Среди них для решения задач, изучения структуры и строения горного массива, важную роль играют следующие основные комплексы параметров: электрические, магнитные, гравитационные, радиационные, тепловые, геомеханические, сейсмоакустические, гидрогеологические.

Выделенные восемь комплексов параметров по их взаимоотношению с родственными полями и источниками возбуждения делятся на две группы. В первую группу входят магнитное, радиационное, энергетическое (тепловое) и гравитационное поля, для создания которых достаточно наличия самого

вещества горных пород, обладающих массой покоя, без привлечения дополнительного возбуждающего источника поля.

Гравитационное поле свойственно любому физическому телу. Тепловое поле также свойственно любому физическому телу, только энергия может быть положительной, когда ее расходует и отрицательной, когда оно ее получает. Магнитное поле также свойственно любому физическому телу. Тела отличаются по своей способности накапливать и отдавать энергию магнитного поля. В радиационном поле, тела отличаются по способности отдавать и принимать радиоактивное излучение.

Эти четыре комплекса параметров свойственны любому физическому телу, обладающему массой покоя, которое само формирует напряженность и потенциал соответствующего физического поля. Физические тела взаимодействуют друг с другом через физические поля. В этом смысле целесообразно говорить о существовании, соответственно, гравитационных, тепловых, магнитных и радиационных масс горных пород и массивов.

Во вторую группу входят такие параметры, поля и явления физических тел, которые не могут существовать без фактических или потенциальных внешних воздействий. К ним относим электрические, сейсмоакустические, гидрогеологические и геомеханические параметры, поля и явления.

Среди этих четырех типов параметров полей и явлений, электрические, гидрогеологические и геомеханические связаны с переносом вещества, воды или заряженных частиц через горные породы и массивы под действием тех или иных энергетических сил и полей, природа которых, является внешней по отношению к массиву. В сейсмоакустических параметрах осуществляется перенос колебаний или энергии колебаний горных пород и массивов также от внешнего по отношению к массиву источника. Следовательно, электродинамические, гидрогеологические, геомеханические и сейсмоакустические поля, параметры и явления являются отражением энергии перемещений – кинетической энергии, а гравитационные, магнитные, радиационные, тепловые и электростатические поля являются

носителями потенциальной энергии. Можно вести речь о круговороте преобразований видов энергии друг в друга через различные физические параметры, явления и поля (рис. 3.1.).

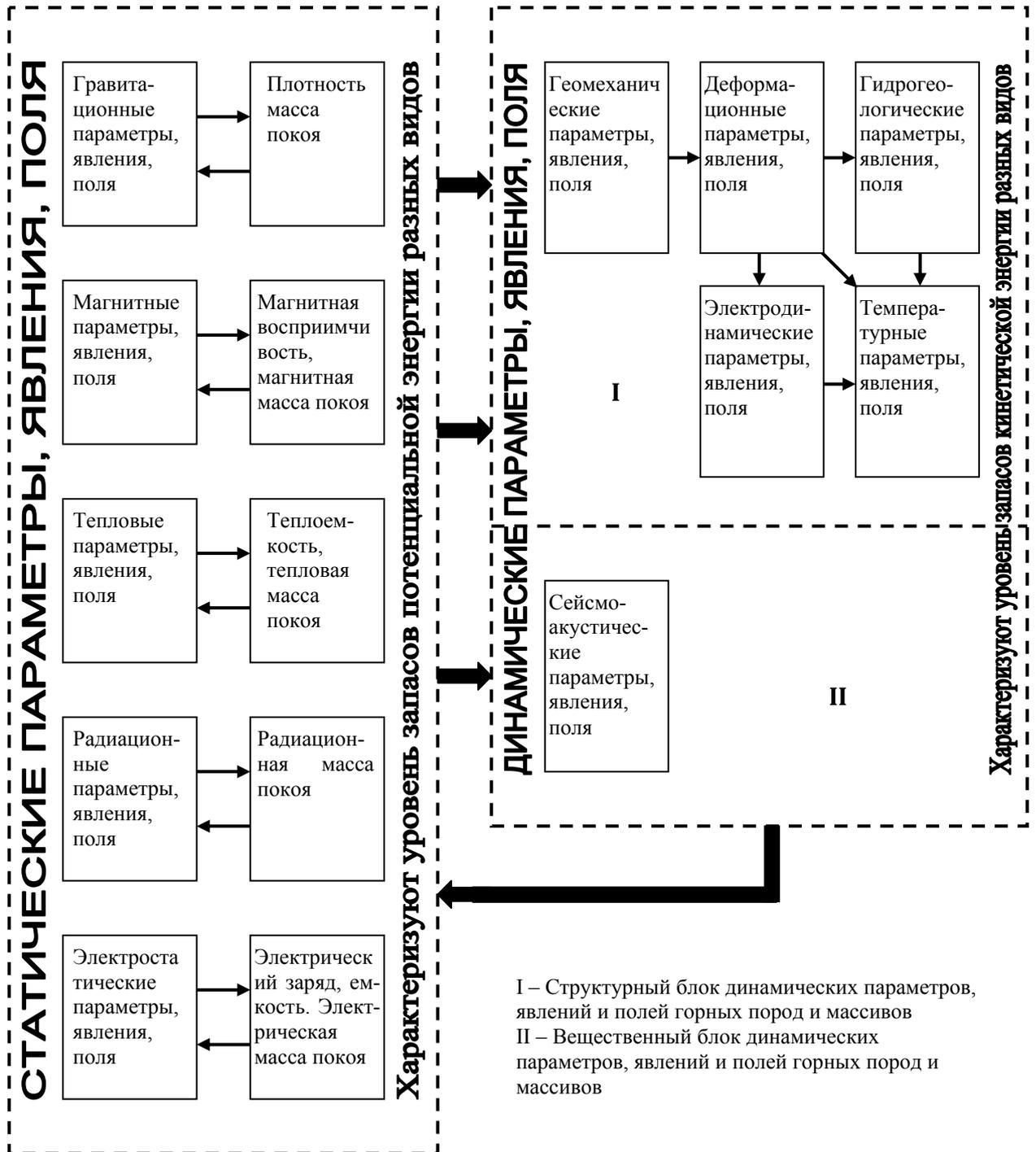


Рисунок 3.1 – Схема группирования физических параметров, явлений и полей горных пород и массивов.

В таблице 3.1 представлена взаимосвязь между геомеханическими, гидрогеологическими и геоэлектрическими характеристиками горного массива.

Таблица 3.1

№№ п/п		Характеристика физической природы геомеханических, гидрогеологических и геоэлектрических полей, явлений и параметров.		
		Геомеханические	Гидрогеологические	Геоэлектрические
1	Параметры	а) устойчивый каркас из неизменных горных пород массива окружающей пустоты и трещин	а) водоупорный каркас из неизменных горных пород массива окружающей пустоты и трещин	а) неэлектропроводный каркас из неизменных горных пород массива окружающей пустоты и трещин
		б) Геометрические параметры пустот и трещин образующихся от энергетического воздействия в соотношений со свойствами вмещающих	б) Геометрические параметры пустот и трещин образующихся от энергетического воздействия в соотношений со свойствами вмещающих	б) Геометрические параметры пустот и трещин образующихся от энергетического воздействия в соотношений с электрическими
		в) плотность трещин и пустот на единицу объема и массы горного массива	в) плотность трещин и пустот на единицу объема и массы горного массива	в) плотность трещин и пустот на единицу объема и массы горного массива
		г) характер связи пустот и трещин друг с другом и с вмещающими породами горного массива	г) характер связи пустот и трещин друг с другом и с вмещающими породами горного массива	г) характер связи пустот и трещин друг с другом и с вмещающими породами горного массива
2	Поля	а) естественное энергетическое поле напряжений прошлых и ныне действующих	а) естественный энергетический потенциал гидрогеологического поля (в основном гравитационного)	а) естественный энергетический потенциал естественного геоэлектрического поля гидрогеологического
		б) естественное энергетическое поле деформаций прошлых и ныне действующих	б) естественные поля водопроницаемости горных пород и массивов деформированного характера	б) естественное поле удельных электрических сопротивлений или электропроводностей горных пород массивов
3	Явления	а) образование систем трещин и пустот	а) канализация грунтовых вод по системе трещин структурно-вещественного характера	а) распределение электрического тока по системам пустот и трещин структурно-вещественного характера
		б) давление горных пород и массивов (оплзни, сдвигения, обрушения)	б) движение горных пород и массивов под действием суммарного влияния гравитационных полей и явлений смачивания	б) возникновение геоэлектрических неоднородностей под действием гравитационных и

Карстоопасный массив представляет собой производную нескольких составляющих, входящих в геомеханическую модель участка

недропользования. Исходя из характеристик, представляющих наибольший интерес с точки зрения ее построения (структурно-тектоническое строение, глубина и площадь распространения карстовых полостей, гидродинамические и геодинамические характеристики), исследования наиболее целесообразно производить с помощью геофизических и геодезических методов.

Глубинное строение карстоопасного участка следует изучать методами наземной геофизики.

Геофизические методы существенно отличаются друг от друга глубиной исследований, разрешающей способностью и кругом решаемых с их помощью задач. Поэтому включаемые в комплекс геофизические методы, полезно разделить на основные и вспомогательные.

К основным методам следует относить методы, которые позволяют получить максимальный объем информации о составе, строении и свойствах грунтов при оптимальных затратах средств и времени. С помощью основных методов выполняется основной объем геофизических работ.

Вспомогательные методы должны обеспечивать получение дополнительной информации для устранения неточности и неоднозначности решений, получаемых основными методами. Они также должны обладать высокой надежностью и точностью.

Выбор основных и вспомогательных методов осуществляется в каждом случае в соответствии с кругом решаемых задач и учетом всех характерных для района природных факторов. В рамках диссертационной работы, задача заключается в выявлении структурного строения массива горных пород, его гидродинамических параметров и геометрии карстовых полостей для создания геомеханической модели карстоопасного участка. Геометрия полостей, требуется для определения возможности обрушения кровли земной поверхности, что является заключительным этапом при определении опасности карстопроявлений.

Для решения поставленных задач, на основании опыта проведения

исследований карстоопасных участков [52-55], используются следующие основные геофизические методы, рекомендуемые для создания геомеханической модели исследуемого участка.

К основным методам, в первую очередь, относится электрометрия в площадных разновидностях, поскольку электрические свойства пород закарстованных районов отличаются высокой неоднородностью и позволяют расчленивать массив закарстованный и нетронутый процессами карстообразования. Кроме того, этими методами с высокой детальностью и надежностью определяются структурные неоднородности массива, в частности тектонические трещины и разломы, которые в свою очередь являются неотъемлемой частью участка развивающегося карста.

Следующим методом, отнесенным автором к основным методам изучения глубинного строения карстоопасного массива, является спектральное сейсмопрофилирование. С его помощью имеется возможность оценить структуру карстоопасного массива с высокой детальностью и глубиной исследования. Метод позволяет выявлять как структурные неоднородности самого массива, так и геометрию карстовых полостей, глубину их залегания.

Небольшие глубины распространения карстовых полостей, как правило, связанные с возможностью обрушения при строительстве на них инженерных сооружений целесообразно изучать с помощью георадарного зондирования. Метод обладает высокой разрешающей способностью, но ограничен глубиной зондирования до 25-30 метров. Он также относится к основным при выборе методов исследования при инженерных изысканиях в карстоопасных областях.

Ниже более подробно рассмотрен каждый из методов исследования.

3.2 Изучение глубинного строения массива горных пород

3.2.1 Построение геоэлектрической модели массива

К наиболее дифференцированным свойствам карстующихся пород следует отнести удельное электрическое сопротивление. Как уже описывалось выше, электрические параметры горного массива хорошо взаимосвязаны с геомеханическими и гидрогеологическими параметрами, что представляет наибольший интерес при построении геомеханической модели. Таким образом, электрометрию следует относить к основным методам изучения карстоопасного массива горных пород.

Электрические зондирования используются для изучения карстового рельефа кровли растворимых пород, их расчленения по литологическим признакам, выделения в разрезе тектонических, трещиноватых и закарстованных зон, изучение карстовой зональности, определения глубины залегания подземных вод и базиса коррозии, а также для решения многих других задач, связанных с вертикальным расчленением разреза.

По способу измерений и характеру решаемых задач электроразведка подразделяется на электропрофилирование (ЭП) и вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ).

Основным показателем закарстованности массива горных пород является сильно развитая трещиноватость и пустотность.

Анализируя зависимость электрических параметров, в частности удельного электрического сопротивления горных пород, во взаимосвязи с пустотностью и трещиноватостью горного массива, отметим, что последние являются главной причиной изменения электрических свойств горных пород и массивов. Характер этой взаимосвязи определяется составом заполнителя трещин и, если они заполнены электропроводным материалом (минерализованная вода, рудные элементы, глины и суглинки и т.д.), то с ростом трещиноватости удельное сопротивление в целом уменьшится, если состав заполнителя отличается низкой электропроводностью (нефть, газ,

воздух, вторичный кварц, кальцит и т.д.), то с ростом трещиноватости удельное сопротивление в целом возрастает. Пока трещины не образуют замкнутой сети, не прерывая связи между отдельными блоками (элементами) горных пород и массивов, между электрическими параметрами и, в частности, удельным электрическим сопротивлением и величиной интенсивности трещиноватости, сохраняется, в зависимости от заполнителя трещин, прямо или обратно пропорциональная зависимость. Явление описывает объемную чувствительность электрометрии к трещиноватости. Как только трещины смыкаются, и связь между отдельными частями горных пород теряется, электрические свойства горной породы или массива в целом изменяются резко, скачком и также в зависимости от заполнителя, в сторону увеличения или уменьшения. Это явление характеризует структурную чувствительность электрометрии к пустотности и трещиноватости горных пород и массивов. Трещиноватость и пустотность различного уровня, масштаба, а также различных электрических свойств вещества заполнителя в горных породах и массивах, при характеристике их геоэлектрической модели, названы “элементами проводимости”.

Таким образом, “элементы разупрочнения” в геомеханической модели горных пород и массивов, а также “элементы проводимости” в геоэлектрической модели физически, вещественно представлены одними и теми же объектами, трещинами и пустотами различного уровня с различным составом заполнителя. Характер взаимосвязи геомеханической и геоэлектрической моделей с моделью горных пород по трещиноватости имеет одинаковый характер, представляя собой сочетание объемной и структурной чувствительности этих моделей к трещиноватости. Гидрогеологические параметры также зависят от степени трещиноватости.

В качестве примера и практического подтверждения высказанной структурно-вещественной модели, объединяющей геоэлектрические, геомеханические и гидрогеологические поля использованы материалы вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), выполненного перед

проходкой скважин водоснабжения на Среднем Урале. Электроразведочные работы методом ВЭЗ и срединного градиента (СГ) выполнены по 297 участкам с последующим бурением на них скважин водоснабжения. Полученные результаты приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Кол-во скважин	Удельное электросопротивление водовмещающих пород, Омм	Дебит скважин, л/сек	Глубина обсадной колонны, %
42	1000-4000	0-0,05	10
96	400-1200	0,05-0,35	10-20
118	250-800	0,3-8,0	20-50
41	50-200	Более 4,0	75-95

Зависимость между трещиноватостью горного массива, водообильностью и удельным электрическим сопротивлением представлена на рис. 3.2.

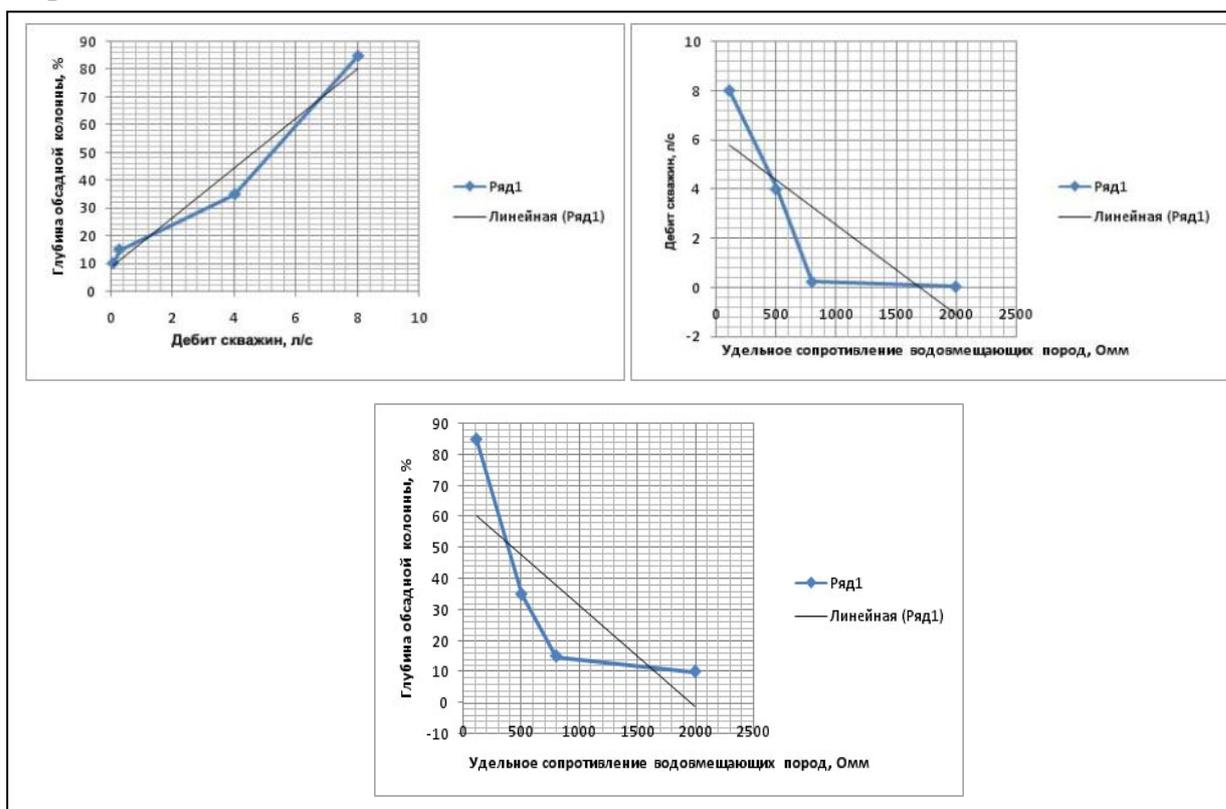


Рис. 3.2 – Графики зависимостей между трещиноватостью горного массива (глубина обсадной колонны), водообильностью (дебит скважины) и удельным электрическим сопротивлением

Как видно из представленных графиков, водообильность горных пород прямо пропорциональна трещиноватости горного массива и обратно пропорциональна удельному электрическому сопротивлению.

На основе выявленных электрических соотношений между электрическими, геомеханическими и гидрогеологическими параметрами, методами электроразведки, удастся достаточно грамотно и надежно картировать зоны тектонических нарушений и приуроченные к ним области повышенной закарстованности.

Алгоритмам решения прямых (расчет поля по совокупности электрических параметров среды) и обратных (оценка электрических параметров среды по ее электрическому полю) хорошо освещены в теории электрических полей [56].

Решается задача соответствия между электрическими параметрами горных пород и массивов с вариантами электрических полей и явлений. При этом принимается упрощенная модель строения горных пород и массивов исходя из однородности их по электрическим параметрам. Исходя из этой модели, подбирается и разрабатывается алгоритм или аналитические зависимости, связывающие электрические параметры массива в целом, при различной ориентировке предполагаемых электрических полей относительно массива, однородных, но отличающихся по электрическим параметрам друг от друга. Собственно, в этом и состоит понимание геоэлектрической модели горных пород и массивов.

Задача преобразования геоэлектрической в структурно-вещественную модель массива горных пород состоит:

- в расшифровке строения горного массива, связанного с выявлением пространственного положения контактов, границ между геоэлектрическими элементами, соответствующих контактам и границам элементов структурно-вещественного характера;

- в определении вещественного состава горных пород, естественным образом отличающихся друг от друга по электрическим параметрам.

Одним из основных методов непосредственного выделения поверхностных и подземных карстовых нарушений является электрическое профилирование. Наблюдения должны характеризовать геологическую ситуацию на разных глубинах. При малых разносах получают сведения о толще пород в пределах зоны аэрации. При больших питающих линиях основная информация должна поступать о породах в зоне полного водонасыщения. Размер установок выбирают, исходя из особенностей кривых рекогносцировочных зондирований, предварительно выполненных в различных точках обследуемого участка.

При изучении карстовых нарушений широко используется также профилирование по методу срединных градиентов (АВ неподвижно). Его преимуществом является заметно пониженный уровень ложных аномалий и недоступная для других методов высокая производительность работ. Недостаток метода — крайняя условность оценки глубины исследований, которая к тому же меняется по мере изменения расстояния приемного диполя от питающих электродов.

Автором, для исследования структурного строения карстоопасного массива, согласно имеющимся наработкам, электроразведка применяется в вариантах вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и срединного градиента (МСГ).

Вертикальное электрическое зондирование позволяет изучить глубинное строение земной коры путем использования зависимости удельного электрического сопротивления, измеренного при различных разностях питающих (токовых) электродов “А” и “В”. Чем больше расстояние между этими электродами, тем глубже в землю протекает электрический ток и величина удельного сопротивления, измеренного на одном и том же участке земной коры с помощью пары приемных (измерительных) электродов “М” и “N” путем изменения разности потенциалов при стабилизированном токе, будет зависеть и стремиться к удельному электрическому сопротивлению более глубоких слоев земной коры.

Удельное электрическое сопротивление горных пород определяется их составом, строением и свойствами гидрогеологического характера, поэтому при интерпретации удастся в целом восстановить состояние и свойства горных пород изучаемого участка.

При постановке таких электроразведочных работ используется комплект аппаратуры переносного типа «Березка», включающий в себя генераторный блок со встроенным в него блоком питания, состоящим из набора аккумуляторов и измерительный блок, имеющий так же в своем составе аккумуляторный блок питания (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Комплект аппаратуры для электроразведки «Березка»

Частота питающего тока 4,8 Гц, измеритель настроен также на частоту 4,8 Гц, что позволяет устранить влияние промышленных помех, кратных частоте 50 Гц.

Метод ВЭЗ позволяет исследовать глубинное строение земной коры в каждой конкретной точке и, чтобы получить строение площади, следует

поставить много стоянок ВЭЗ, что требует больших затрат времени и средств.

Чтобы уменьшить стоимость работ и увеличить их эффективность и производительность, в дополнение к электроразведочным работам методом вертикального электрического зондирования, выполняют работы площадного характера – электроразведочный метод срединного градиента, который позволяет на неизменном конкретном разnose питающих электродов “А” и “В” изучить распределение удельного электрического сопротивления по площади. Исследуемый участок работ изучается по площади путем последовательного перемещения приемных электродов “М” и “N”, удаленных друг от друга на 5-10 метров по профилям, параллельным линии АВ, расположенным в 5-15 метрах друг относительно друга. Измеренные на местности разности потенциалов пересчитываются в параметр кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_k) по формуле:

$$\rho_k = K \cdot \Delta U / I, \text{ где:} \quad (3.1)$$

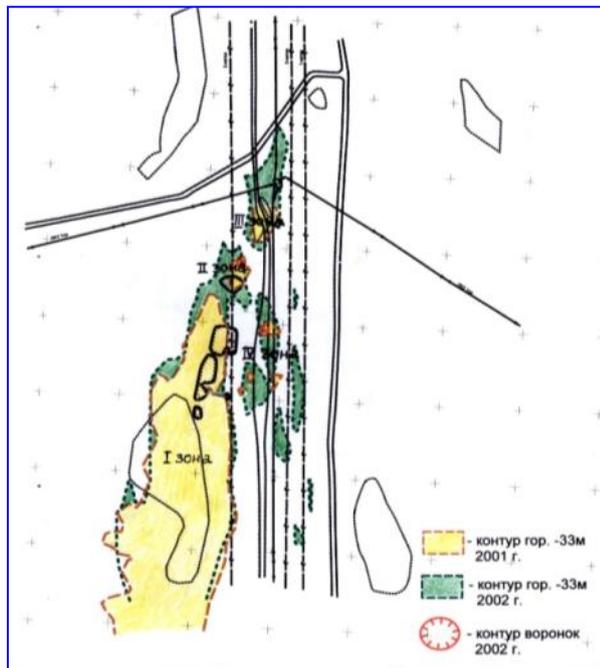
K – коэффициент установки равный:

$$K = 2\pi(1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN) \quad (3.2)$$

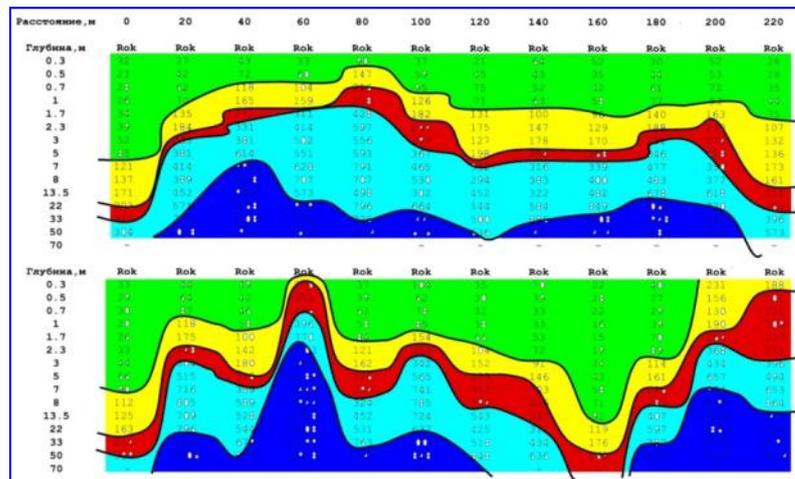
ΔU – разность потенциалов, измеренная с помощью приемных электродов M и N ; I – сила стабилизированного тока в цепи AB .

Рассчитанные значения удельного электрического сопротивления (ρ) выносятся на планы требуемого масштаба, где в изолиниях строится карта распределения удельного электрического сопротивления, на которой выявляются зоны высокого и низкого относительно друг друга сопротивления, соответствующие в геологическом и гидрогеологическом отношениях различным по составу, строению и водоносности горным породам, объединенным в пласты, зоны, дайки, контакты и т. д.

Пример использования методов электрометрии для исследования карстоопасного участка приведен на рис. 3.4.



а – метод СГ



б – метод ВЭЗ

Рисунок 3.4 – Пример исследования карстовых провалов на участке газопровода Бухара-Урал на Красногорском участке

Красногорский участок это один из первых объектов, где решалась комплексная задача определения причин образования карстовых провалов, диагностики массива горных пород как с точки зрения структуры и гидродинамического режима, так и геодинамической активности.

3.2.2 Выявление структурных особенностей массива с использованием спектрального сейсмопрофилирования

Аппаратурно-методический комплекс ССП позволяет выявлять зоны тектонических нарушений и расположение карстовых полостей. Сущность метода описана по материалам его разработчика [42].

В результате ряда исследований, удалось выяснить, что принятая как очевидность модель земной толщи как совокупности отражающих границ, не полностью отражает ее свойства. Наряду с отражающими границами земная толща по акустическим свойствам является совокупностью колебательных систем. Поэтому акустический импульс, возникающий в результате ударного воздействия, уже в самой зоне удара исчезает, превращаясь в гармонический (синусоидальный) затухающий сигнал.

Так происходит всегда, когда импульс воздействует на колебательную систему – он превращается в затухающую синусоиду, частота которой равна собственной частоте колебательной системы. Причем совершенно не имеет значения, что именно в данном случае выполняет функции колебательной системы. Это может быть камертон, маятник, струна и т.д. Или, если воздействующий импульс – электрический, электрический колебательный контур. Если так случилось, что импульсному воздействию подверглись сразу несколько колебательных систем, то этот импульс превратится в совокупность такого же количества гармонических затухающих процессов.

Или можно сказать иначе. Если воздействующий на объект импульс превратился в затухающий колебательный процесс, представляющий собой одну или несколько затухающих синусоид, значит, этот объект есть не что иное как одна или несколько колебательных систем.

Поэтому, когда при проведении сейсморазведочных работ удалось установить, что именно такое превращение импульса происходит при ударном воздействии на земную толщу, начались поиски тех колебательных систем, без наличия которых такое преобразование было бы невозможным.

Оказалось, что такими колебательными системами являются практически любые объекты из подавляющего большинства твердых сред. В том числе, и из горных пород. В простейшем случае, если объектом воздействия является плоскопараллельная структура, например, геологическая, когда имеем дело с принципиально слоистым массивом осадочных пород, то собственная частота ее f_0 зависит от толщины h . Таким образом, если померить величину возникающей при ударе затухающей синусоиды, то можно определить толщину исследуемой структуры (пластины, слоя).

А поскольку, в общем случае, осадочный массив является многослойным, то реакция на удар будет содержать несколько гармонических составляющих. Зависимость их частот от строения такого массива имеет следующий вид:

$$h_i = \frac{V_{sh}}{f_{0i}}, \quad (3.3)$$

где V_{sh} - скорость поперечного (сдвигового) упругого процесса. На основании акустических исследований с применением специально разработанных и запатентованных способов установлено, что величина V_{sh} в горных породах (и грунтах) не более чем на 10% отличается от 2500м/с.

На рис. 3.5 приведена схема, из которой видна зависимость между строением слоистой среды и возникающими при ударном воздействии на нее частотами гармонических составляющих, входящих в сейсмосигнал.

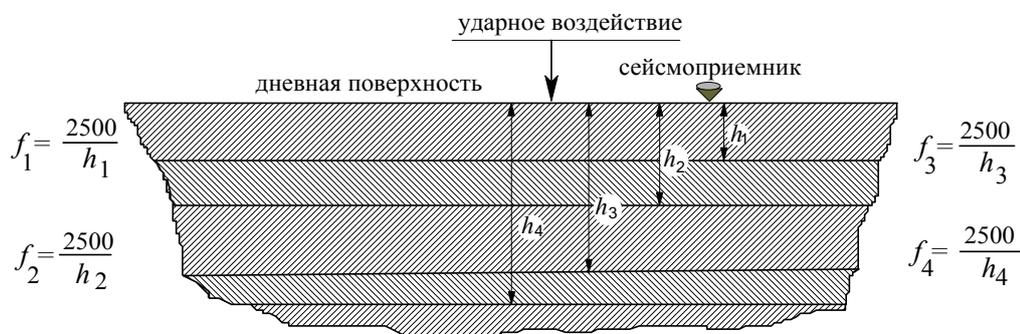


Рисунок 3.5 – Схема исследования массива методом ССП

Как видно из рисунка, из всех слоев-резонаторов, частоты которых

регистрируются сейсмоприемником, только слой h_1 – простой. Все остальные – составные. То есть, собственные колебания остальных простых слоев-резонаторов, находящихся внутри массива, сейсмоприемник не регистрирует. Дело здесь в следующем.

Сейсмоприемник «слышит» собственные колебания только тех слоев, которых он непосредственно касается. Этот эффект оказался очень кстати, так как если бы мы регистрировали все частоты, которые возникают в слоистом массиве, то установить порядок очередности слоев, то есть, построить истинный разрез массива с помощью спектрально-акустических измерений вряд ли удалось бы.

Более подробно физика эксплуатируемых при спектрально-сейсморазведочных работах эффектов и явлений описана на сайте разработчика оборудования <http://newgeophys.spb.ru> в работе «Физика и практика спектральной сейсморазведки» и «Спектральная сейсморазведка - истоки и следствия».

Рассмотрим схему перехода от сеймосигнала к разрезу исследуемого массива. На рис.3.6 показан произвольно взятый, реальный сеймосигнал на оси времени. То есть, в том виде, в каком мы его видим на осциллографе.

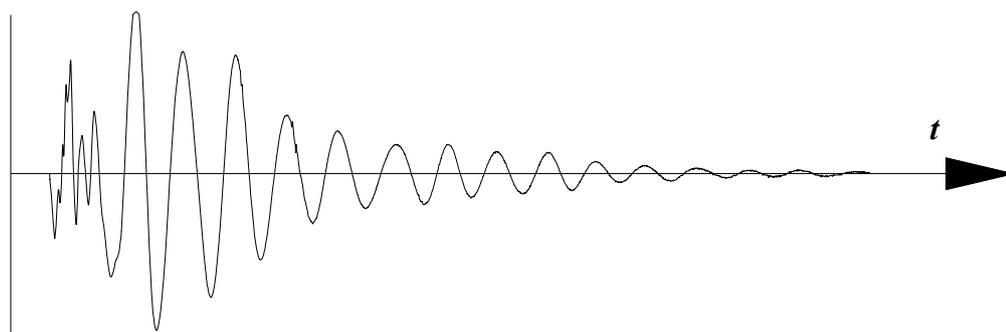


Рисунок 3.6 – Вид получаемого при измерениях сеймосигнала

Колебательный процесс, приведенный на рисунке, содержит, как минимум, две составляющие – более высокочастотную в начале, и более низкочастотную в конце. Здесь нельзя говорить, сколько именно гармонических составляющих содержит сеймосигнал. Для того чтобы сказать определенно, каков состав спектра сеймосигнала, следует

осуществить преобразование Фурье. С помощью преобразования Фурье любой изменяющийся во времени процесс может быть изображен на оси частот или, иначе говоря, в спектральном виде.

На рис. 3.7 приведена геометрическая фигура, подобная спектральному изображению того же самого сейсмосигнала.

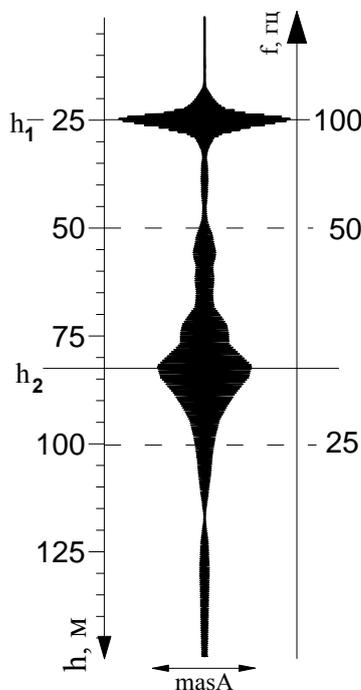


Рисунок 3.7 – Схема преобразования сейсмосигнала

Правая вертикальная ось – в частотах, левая – в метрах. Пересчет герцы-метры осуществлен по формуле (3.3). Величина «masA» пропорциональна плотности спектра. Условно мы ее в дальнейшем будем называть усилением.

Количество гармонических составляющих соответствует количеству экстремумов на приведенной на рис. 3.7 фигуре. Наиболее четкие, ярко выраженные экстремумы соответствуют глубинам $h_1=25\text{м}$ и $h_2=82\text{м}$. На этих глубинах находятся наиболее четкие границы (в соответствии с рис.3.7).

Неравномерность оси частот приводит к тому, что с глубиной разрешающая способность метода уменьшается.

Более определенно можно классифицировать выявляемые границы и даже давать им геологическое истолкование при многократных измерениях, смещая место измерения от точки к точке. То есть путем спектрально-

сейсморазведочного профилирования (ССП).

И, наконец, о важнейшем для любого геофизического метода моменте. А именно, о характеристиках границ, выявляемых с помощью ССП.

Согласно известным представлениям, границы, выявляемые с помощью традиционных акустических методов, представляют собой поверхности, на которых происходит скачок удельной акустической жесткости, которая определяется произведением плотности на скорость распространения упругих колебаний. Спектрально-акустические измерения выявляют совершенно иные границы.

Границы, выявляемые с помощью спектрально-акустических (спектрально-сейсморазведочных) методов, представляют собой поверхности, по которым возможно взаимное проскальзывание соседних сред. Это весьма существенное отличие. Так, сомкнутая трещина для спектральной акустики является границей, тогда как при использовании традиционных методов она границей не является и, стало быть, выявлена не будет. Основными объектами, выявляемыми методом ССП, являются именно сомкнутые трещины и их совокупности, то есть зоны трещиноватости.

Основными объектами, выявляемыми методом ССП, являются поверхности скольжения, а также сомкнутые трещины и их совокупности, то есть зоны трещиноватости.

Поверхности скольжения в земной толще формируются в тех случаях, когда соседние породы не диффундируют одна в другую. Или, можно сказать, не прилипают одна к другой. Таким свойством обладают, например, поверхности, по которым контактируют карбонатные породы с терригенными. Поэтому методом ССП надежно выявляются в земной толще известняки. Кроме того, такими свойствами обладает граница между породами кристаллического фундамента и залегающими на них осадочными породами при небольшой мощности осадочных пород. Во многих случаях поверхности скольжения формируются на контактах с находящимися под землей объектами типа труб, фундаментов, свай, бетонных и металлических

плит и т.д. В этих случаях эти объекты выявляются методом ССП.

Зоны повышенной трещиноватости формируются в результате разного рода подвижек. В первую очередь, источником и стимулятором постоянно протекающих микроподвижек в осадочных породах являются находящиеся в породах кристаллического фундамента тектонические нарушения. В связи с этим, метод ССП оказался инструментом, с помощью которого могут выявляться зоны тектонических нарушений.

ССП-разрез представляет собой совокупность спектральных изображений непосредственно сейсмосигналов, то есть является изображением первичной информации, неискаженной какой бы то ни было интерпретацией. Следствием этого момента является то, что результат ССП не может быть изменен под влиянием любой априорной информации, в том числе, полученной при помощи разведочного бурения. И это также коренным образом отличает метод ССП от других геофизических методов.

Получаемые в результате компьютерной обработки распечатки представляют собой изображение спектров сейсмосигналов, и одновременно, изображение конкретных геологических объектов в геомеханическом аспекте либо изображение разного рода подвижек.

Каждый исследовательский метод по-своему уникален, так как позволяет получать информацию, которую нельзя получить с помощью других методов. Так, например, электроразведочные методы позволяют определять электропроводность горных пород, чего нельзя выявить никакими другими геофизическими методами. Уникальность метода ССП заключается в том, что с его помощью можно выявлять зоны с повышенным уровнем нарушенности пород. Эта информация выводит на возможность оценки и прогноза несущей способности грунта, и, следовательно, на возможность прогноза разного рода аварий и разрушений инженерных сооружений.

Там, где породы обладают повышенной проницаемостью, а именно, в зонах тектонических нарушений образуются пльвуны и карсты.

Карсты образуются там, где в условиях залегания карбонатных пород мигрируют кислотные грунтовые воды. Природа происхождения пlyingунов непонятна, но, как и карсты, они представляют собой как бы полужидкую субстанцию, находящуюся в твердой среде. На ССП - разрезах пlyingуны и карсты выглядят одинаково – как ореолы.

Пример выявления пlyingунов и карстов показан на рис. 3.8 [42].

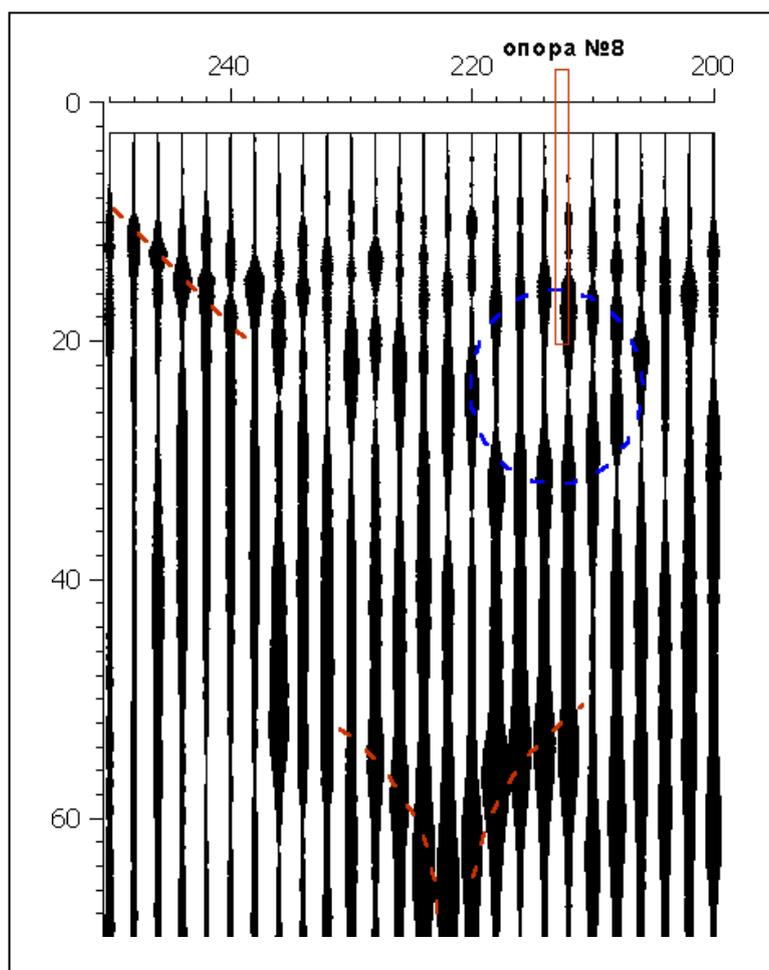


Рисунок 3.8 – Пример спектрального разреза в районе формирования пlyingуна

На ССП - разрезе показан пlyingун (голубым цветом), обнаруженный при профилировании вдоль пр. Стачек, в СПб, вдоль трассы будущего виадука. При установке опор виадука, которые представляют собой железобетонные столбы, заглубленные на 20 м, необходимо избежать попадания в пlyingун.

Как пльвуны, так и карсты обычно находятся не в центре воронкообразного объекта, обозначающего пределы тектонического нарушения, а сбоку.

Пример использования и интерпретации метода для исследования развития карста на затопленном руднике №1, ОАО «Илецксо́ль» представлен на рис. 3.9.

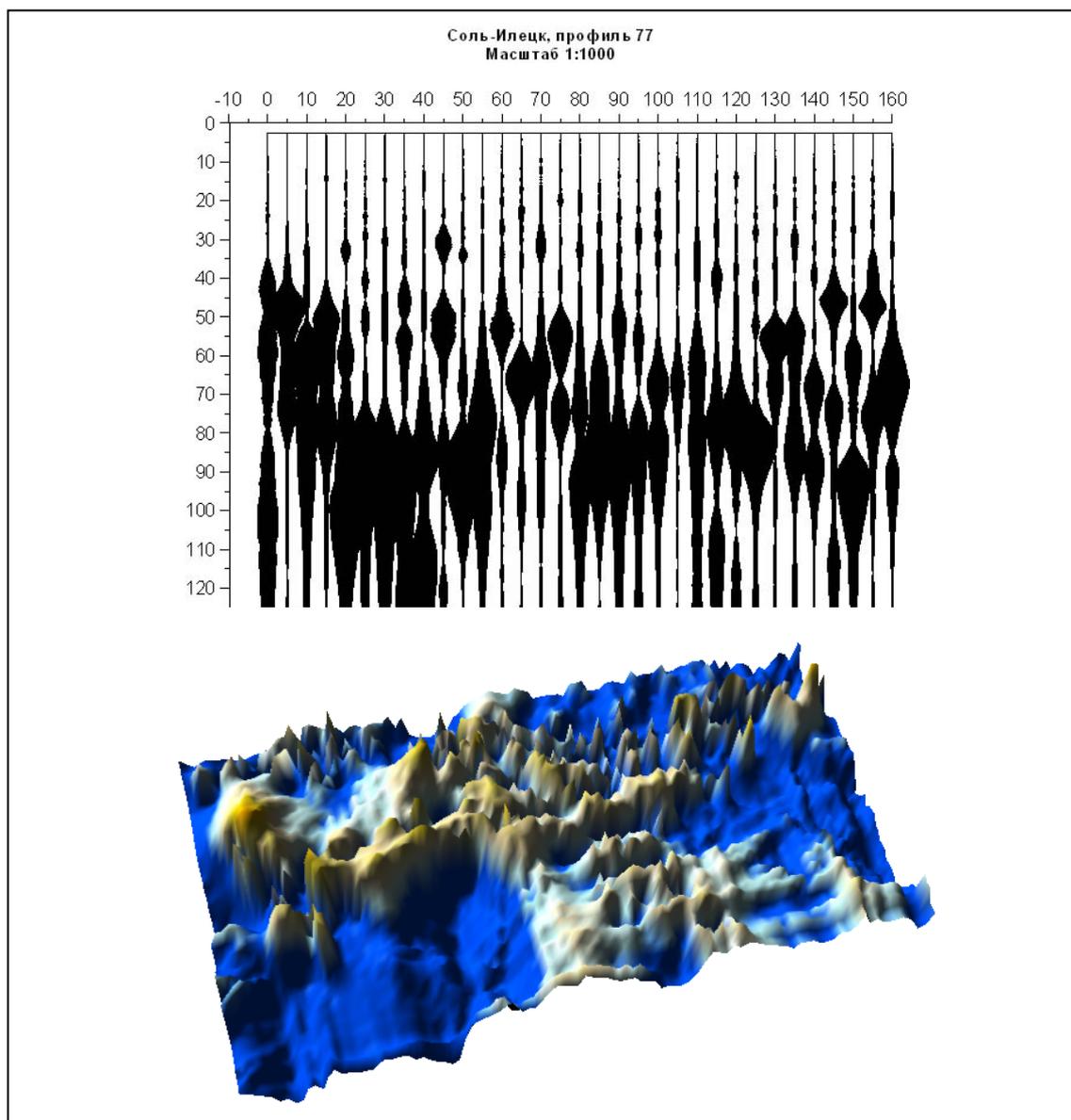


Рисунок 3.9 – Пример спектрального разреза и полученных результатов по исследованию морфологии кровли затопленного рудника №1 ОАО «Илецксо́ль» с поверхности методом ССП

Следует отметить, что на этом объекте впервые были использованы методы ССП и георадарного зондирования для исследования закарстованного массива.

3.2.3 Определение параметров и морфологии георадарным зондированием

Основой метода радиолокации является отражение электромагнитной волны от границ между средами, имеющими различные электрические свойства [57]. Расположенная на поверхности земли передающая антенна излучает импульс радиоволн. Проходя в землю через приповерхностные слои, некоторая часть энергии волны отражается от границ между слоями и устремляется обратно к поверхности, а остальная часть энергии проникает глубже.

Глубины залегания слоёв (объектов) пропорциональны времени, которое требуется радиоволновому импульсу, чтобы «пробежать» от располагающейся на поверхности передающей антенны до отражающей границы и обратно на поверхность к приёмной антенне. Оно зависит от электрофизических свойств среды, через которую проходит радиоволновой импульс.

Наиболее важными параметрами, характеризующими возможности применения метода георадиолокации в различных средах, являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн в среде, которые определяются её электрическими свойствами. Удельное затухание определяет глубину зондирования, а знание скорости распространения радиоволн необходимо для пересчёта временной задержки отражённого импульса в расстояние до отражающей границы.

Практически все вещества, кроме чистого металла, могут быть отнесены к классу диэлектриков с конечной проводимостью. В связи с этим вводится

комплексная относительная (относительно вакуума, где диэлектрическая проницаемость равна ϵ_0) диэлектрическая проницаемость:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3.4.)$$

где ϵ – комплексная относительная проницаемость, ϵ' – действительная часть, связанная с поляризацией диэлектрика под действием приложенного поля, ϵ'' – мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика σ в (См/м):

$$\sigma = \omega\epsilon''\epsilon_0 \quad (3.5)$$

где ω – частота приложенного электромагнитного поля.

Большое значение для радарных исследований в широком диапазоне частот имеет дисперсия диэлектрической проницаемости, то есть её зависимость от частоты приложенного электромагнитного поля. Это весьма сложная зависимость, если учесть различные способы поляризации компонент, которые составляют агрегат породы. Для практического использования эта зависимость определяется экспериментально.

Скорость распространения электромагнитной волны в диэлектрике - V зависит от его диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемостей, однако для большинства горных пород значение магнитной проницаемости, близко к 1 и не зависит от частоты поля. С учётом этого, фазовая скорость распространения волны будет:

$$V = c / \sqrt{\epsilon} = c / \sqrt{\epsilon'} \quad (3.6)$$

где c - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме. Это одно из наиболее важных для радарных исследований соотношение, поскольку V - измеряемая величина, а ϵ' – свойство вещества.

Из материалов многочисленных исследований следует, что в диапазоне метровых волн действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ϵ' , а, следовательно, и скорость распространения электромагнитных волн V , незначительно зависят от частоты и типа грунтов,

но очень сильно зависят от их весовой влажности W . Для перехода от значений W к значениям ε' существует целый ряд эмпирических формул.

Глубина проникновения электромагнитных волн определяется главным образом электрическим сопротивлением и диэлектрической проницаемостью грунта. Если электрическое сопротивление грунта мало и составляет десятки Ом/м, то глубина зондирования может ограничиться глубиной 1 - 1.5 метра за счет большого затухания сигнала. Диэлектрическая постоянная грунта влияет на скорость распространения и длину электромагнитных волн. Для определения истинной глубины залегания границ раздела сред и объектов необходимо знать скорость распространения волны в соответствующей среде.

Электромагнитные волны отражаются от границ сред имеющих разные скорости распространения волн и соответственно диэлектрические проницаемости. Коэффициент отражения можно определить по формуле:

$$\rho = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}, \quad (3.7)$$

где: ε_1 - удельная диэлектрическая проницаемость первого;

ε_2 - удельная диэлектрическая проницаемость второго слоя.

При увеличении влагосодержания почвы удельная диэлектрическая постоянная также увеличивается. Электропроводность почвы возрастает. Если вода насыщена минеральными солями, то проводимость ее становится очень высокой и значительно ухудшаются условия распространения электромагнитных волн.

Задача дешифровки (реконструкции среды) по георадарным данным остается одной из актуальных задач. Импульсные георадары – это одна из областей в которой практика (создание наносекундной аппаратуры) обогнала теорию.

Георадар для подповерхностного зондирования состоит из передатчика, генерирующего широкополосный сигнал (импульс), и приемного устройства, регистрирующего диффрагированный (рассеянный) подповерхностными

слоями радиоимпульс. Как передатчик, так и приемник можно перемещать по поверхности земли. Отраженный (рассеянный) сигнал содержит информацию о подповерхностных слоях, которую следует представить в наглядной для пользователя форме. Задача реконструкции подповерхностных слоев – это задача определения распределения электродинамических характеристик среды по глубине на основе наблюдения отраженного и рассеянного радиоимпульса.

Решение обратной задачи, независимо от способа ее решения, предполагает решение прямой задачи, то есть задачи моделирования динамики электромагнитного поля во времени при заданном (известном) распределении характеристик электродинамических характеристик среды по глубине. Она сводится к решению системы уравнений Максвелла при определенных упрощающих предположениях, совместимых с требованиями реализуемости модели (умении ее эффективно решать) и ее адекватности фактическому процессу.

Ограниченность сигналов во времени, наличие фронтов сигналов – одно из основных положений при эмпирической интерпретации данных зондирования, которая в настоящее время добилась больших успехов, чем численное моделирование. Это обстоятельство указывает, что успешные модели должны максимально использовать информацию, заключенную в ограниченности сигнала по времени.

При решении обратной задачи возможны два подхода: первый, когда мера разности между экспериментальным и модельным сигналами строится в пространстве функций, зависящих от времени, и второй, когда для этого используются спектры сигналов. При использовании первого пути осциллирующий характер сигналов во времени приводит к целевым функциям с большим числом локальных минимумов. В пределах монохроматических волн сигналы, отраженные от поверхностей, отстоящих на длину волны, не отличаются. Второй путь более перспективен, однако требует данных, позволяющих вычислять преобразование Фурье с

достаточной точностью. Ограниченность сигналов во времени позволяет при построении целевой функции использовать преобразование Лапласа наблюдаемого сигнала, т.е. функцию двух переменных, а не одной (частоты). Это дает свободу для маневра и позволяет строить эффективные методы минимизации. Хотя непосредственно преобразование Лапласа наблюдаемого сигнала может быть вычислено только в левой полуплоскости, аналитическое продолжение в правую полуплоскость может позволить зафиксировать особенности преобразования Лапласа, что дает прямую информацию о коэффициенте диэлектрической проницаемости – *КДП*.

Если качество данных не позволяет строить преобразование Лапласа, что может быть связано с грубой оцифровкой слабых сигналов, то единственно возможным остается первый путь. Он может позволить добиться результата при использовании простой параметризации. Однако для его применения надо уметь быстро рассчитывать временные формы сигналов. Использование при этих расчетах преобразования Лапласа дает возможность переходить от интегрирования по оси частот к интегрированию по контурам в комплексной плоскости, что повышает эффективность численного счета.

Пример использования метода георадарного зондирования для исследования карстовых провалов приведен на рис. 3.10.

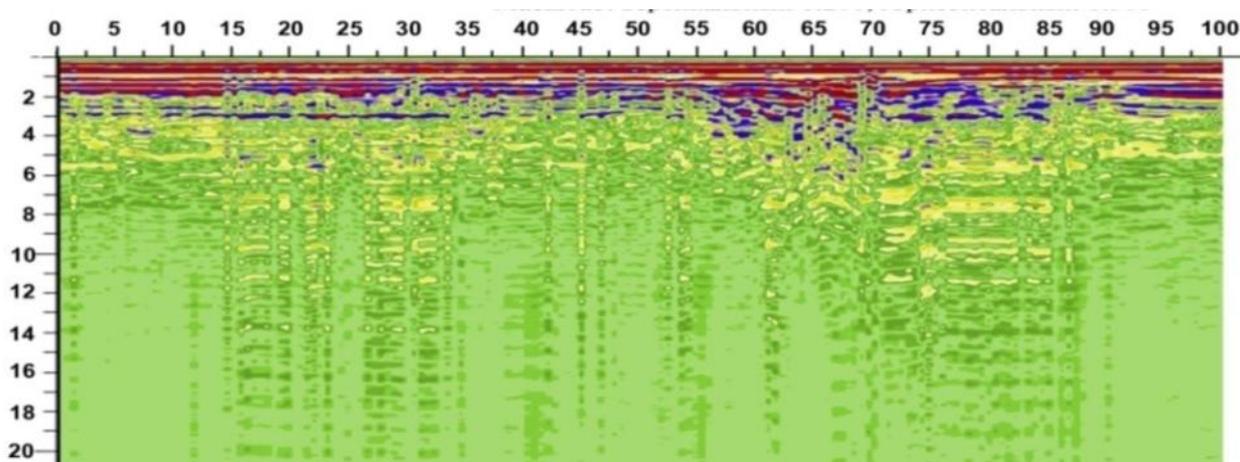


Рисунок 3.10 – Результаты исследований карстовых провалов методом георадарного зондирования в г. Североуральске, канал р. Вагран

На объекте в г. Североуральске геофизические исследования проводились тремя методами (электроразведка, спектральное сейсмопрофилирование и георадарное зондирование), причем в последних двух методах измерения проводились непосредственно через железобетонную облицовку канала р. Вагран, что значительно усложняло задачу, но полученные результаты показали состоятельность методов, даже в таких условиях.

Следует отметить, что описанные выше методы используются авторским коллективом не только для изучения структуры карстоопасного массива, в настоящее время они широко используются для определения возможности строительства на подработанных территориях г. Березовский [58-61], г. Н-Тагил, г. В-Пышма и г. Краснотурьинск [62].

Исследования карста с помощью георадаров проводятся и другими организациями. Пример обнаружения карста сотрудниками ВНИИСМИ совместно с Московской обследовательской станцией по земляному полотну и центром "Диагностика" службы пути Горьковской железной дороги с помощью георадара «Лоза-Н» (рис. 3.11) <http://www.geo-radar.ru>.

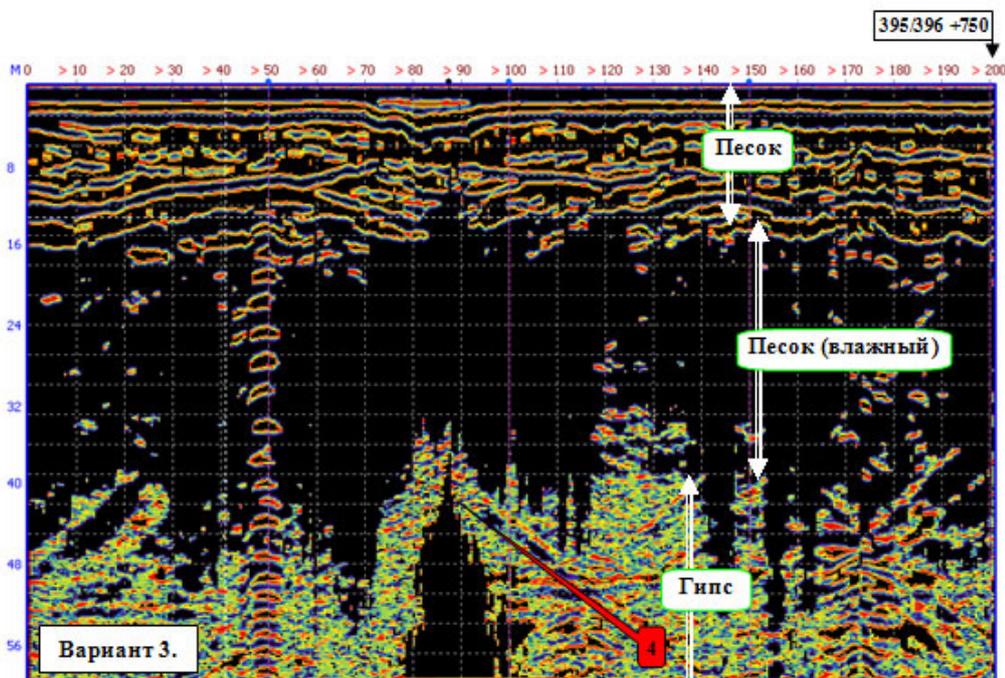


Рисунок 3.11 – Пример геолокационного разреза закарстованного Участка, 4 – зона развития карста, заверенная бурением

3.3. Методы диагностики современных геодинимических движений

В последнее время в мире получают все большее развитие новые совершенные технологии. В этот ряд входят Глобальные Навигационные Спутниковые Системы: американская GPS и российская ГЛОНАСС. Особенно широкое гражданское применение получила американская система GPS.

Глобальная система позиционирования GPS (Global Positioning System) обеспечивается функционированием, на орбитах набора видимых из любой точки Земли спутников, непрерывно передающих высокоточные измерительные сигналы [63, 64]. Тем самым, вокруг нашей планеты создано информационное координатно-временное поле, находясь в котором пользователь с помощью специального приемника может черпать из него данные о своем положении в пространстве и во времени.

Система GPS состоит из трех сегментов: космического, управляющего и пользовательского.

Космический сегмент состоит из 24 навигационных спутников NAVSTAR, которые вращаются вокруг Земли на высоте около 20 тыс. км с периодом 12 часов (рис. 3.12).

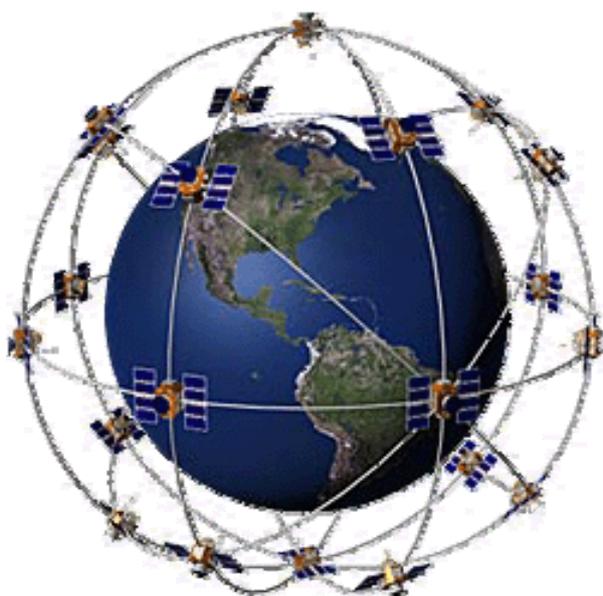


Рисунок 3.12 – Космический сегмент системы GPS

Параметры спутниковых орбит подобраны таким образом, что в любой точке земного шара обеспечивается возможность одновременного приема радиосигнала как минимум от четырех спутников. Каждый спутник имеет на борту четверо высокоточных атомных часов и постоянно посылает радиосигналы, используя собственный уникальный идентификационный код.

Управляющий сегмент состоит из четырех наземных мониторинговых станций, расположенных в разных частях земного шара, и главной управляющей станции. Мониторинговые станции принимают радиосигналы от спутников и по ним отстраивают орбитальные модели для каждого спутника. По этим моделям рассчитываются точные параметры орбиты (эфемериды) и коэффициенты коррекции бортовых часов спутников.

Пользовательский сегмент состоит из большого числа GPS-приемников, которые конвертируют спутниковые радиосигналы в пространственные координаты, скорость перемещения приемника и сигналы точного времени. Для расчета четырехмерной координаты местоположения приемника (X, Y, Z, Time) требуется принять радиосигнал как минимум от четырех спутников. GPS-приемники используются для целей навигации, определения точных пространственных координат, определения точного времени и для других исследований.

Спутниковое навигационное сообщение содержит описание GPS спутниковых орбит, коэффициенты коррекции бортовых часов спутников и другие системные параметры. Эти декодированные данные также называют эфемеридами спутников. Эфемериды используются при планировании работ с применением GPS оборудования и для определения координат.

Радиосигналы, принятые от спутников, служат для определения расстояния между фазовым центром спутникового радиопередатчика и фазовым центром GPS – приемника. Для определения этого расстояния при помощи алгоритма псевдослучайного шифрования вычисляется время прохождения радиосигнала от спутника до приемника. Зная время прохождения радиосигнала и скорость распространения радиоизлучения в

вакууме, по известным формулам вычисляются расстояния от приемника до спутников. Координаты фазового центра GPS-приемника определяются пространственной линейной геодезической засечкой от спутников с известными координатами, как показано на рис. 3.13.

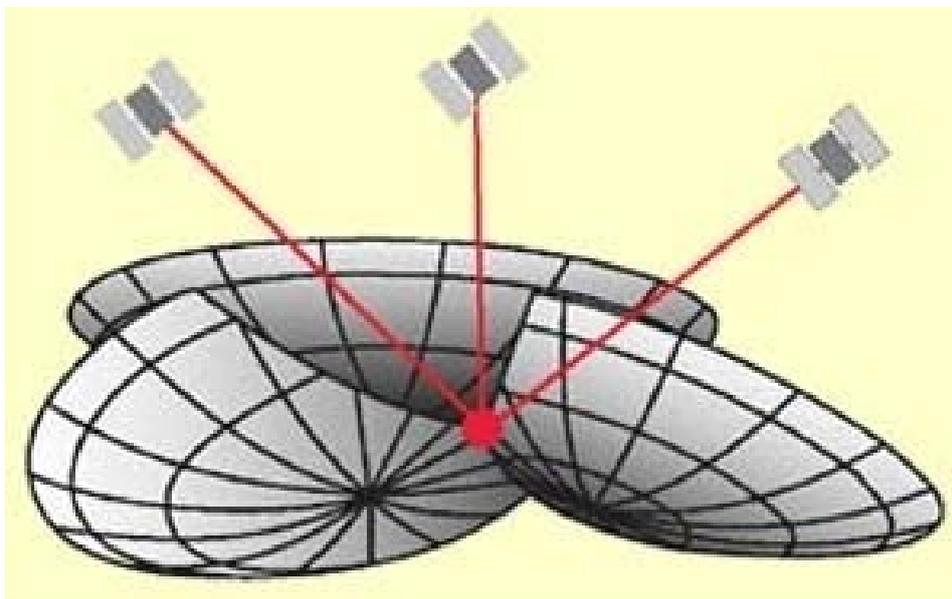


Рисунок 3.13 – Схема определения пространственных координат точки комплексом спутниковой геодезии

Хотя теоретически для определения координат точки достаточно выполнить только три измерения расстояния до спутников с известными координатами, на практике используется четыре измерения. Четвертое измерение вводится, чтобы при помощи алгоритма обработки псевдодальностей устранить влияние неточности хода кварцевых часов приемника.

Точность такого определения координат одиночным приемником, использующим только C/A код, будет составлять ± 100 метров, что является неприемлемым для измерений в геодезической практике. Причина такой низкой точности определения координат обусловлено тем, что при прохождении через ионосферу Земли радиосигнал от спутника претерпевает искажения, основное из которых – ионосферная задержка радиосигнала. Исключить влияние задержек радиосигнала можно двумя способами: либо

использованием довольно дорогих двухчастотных приемников, (точность до ± 10 см), либо применением технологии дифференциальной GPS (точность до $\pm 1 \div 3$ мм), схематично представленной на рис. 3.14.

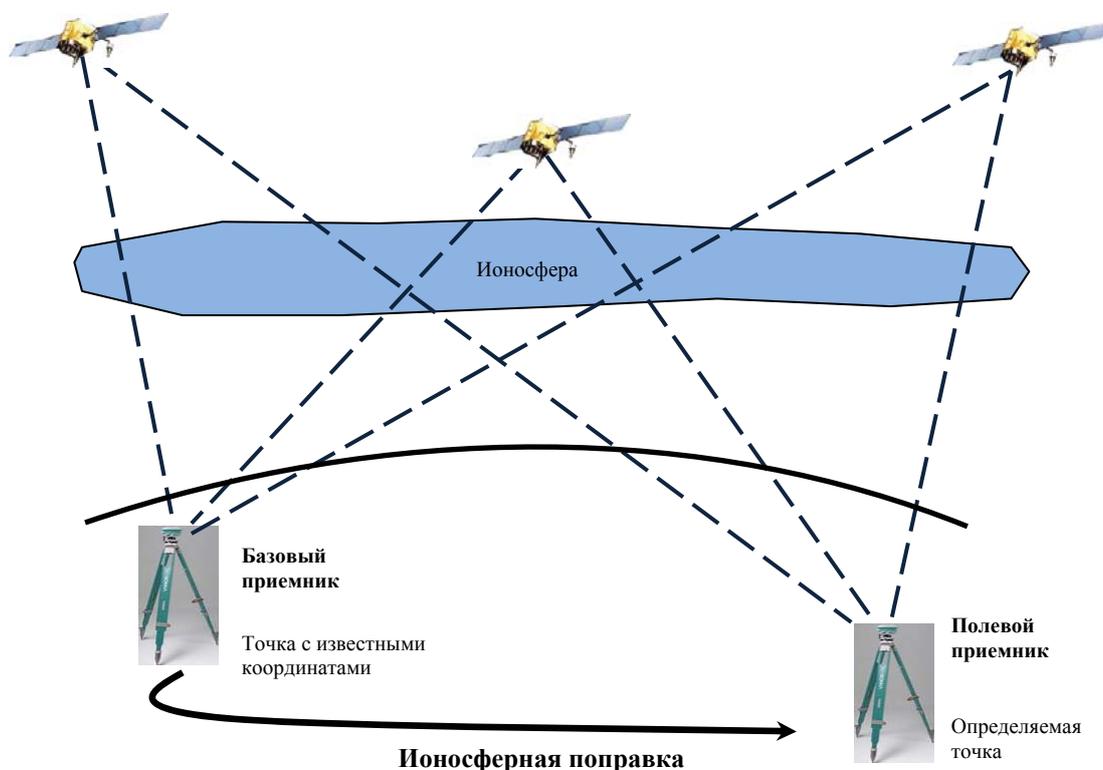


Рисунок 3.14 – Применение технологий дифференциальной GPS для определения точных координат точки

Основная идея этой технологии состоит в том, что один из приемников (базовый приемник) помещается на точку с заранее известными координатами, так называемую базовую станцию, и ведет непрерывные спутниковые наблюдения весь сеанс GPS съемки. В результате такого наблюдения определяется величина ионосферной поправки, равная разнице заранее известных координат точки и ее координат, полученных в результате сеанса спутниковых наблюдений. Полученная величина ионосферной поправки вводится в результаты спутниковых наблюдений на определяемых точках. При этом главным условием работы в режиме дифференциальной GPS является обеспечение одновременного приема сигнала от общих спутников базовым и полевым приемниками. Так как величина ионосферной

поправки является постоянной на довольно обширных территориях, то технологию дифференциальной GPS возможно использовать без снижения точности определения координат для наблюдения базовых линий длиной от 1 метра до 100 км, обеспечивая точность $\pm 1-3$ мм.

Наблюдения за смещениями и деформациями земной поверхности осуществлялись с помощью спутниковых приемников фирмы Trimble США модели 4600LS и 4000SSE, фирмы Carl Zeiss модели GePoS RD24. Технические характеристики приемников приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Характеристика спутниковых приемников

Технические характеристики	Модель приемника		
	4600LS	4000SSE	GePoS RD24
1. Рабочие частоты	$L_1=1575,42$ МГц	$L_1= 1575,42$ МГц $L_2= 1227,60$ МГц	$L_1= 1575,42$ МГц $L_2= 1227,60$ МГц
2. Количество каналов слежения	12	18	24
3. Точность определения координат (дифференциальная технология)	$5 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм/км}$	$5 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм/км}$	$5 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм/км}$
4. Максимальный радиус действия (база измерения)	10 км	2000 км	2000 км
5. Рабочая температура	-40°C до $+60^\circ\text{C}$	-20°C до $+55^\circ\text{C}$	-20°C до $+55^\circ\text{C}$
6. Влажность	водонепроницаем	водонепроницаем	водонепроницаем

Метрологический контроль приемников осуществляется на тестовом полигоне. Приемники сертифицированы в качестве измерительных приборов на территории Российской Федерации.

Обеспечение высокой точности определения смещений двух точек, ограничивающих исследуемый отрезок, в GPS-технологиях достигается также за счет тщательного планирования спутниковых наблюдений. Фирменные программы позволяют заблаговременно оценить такие факторы, как количество видимых спутников, их расположение, значение специального коэффициента PDOP, маску угла возвышения видимых

спутников. Учет их позволяет выбрать благоприятное время выполнения экспериментальных работ с необходимой точностью.

В процессе проведения измерений проводится дополнительный внутренний контроль над работой всей системы, путем оценки точности замыкания треугольников, образуемых одновременно работающими приемниками.

Как показали исследования последних лет [65, 66] использование GPS-технологий при определении геодинамических параметров горного массива существенно повышает информативность геодезических исследований и позволяет выявлять активные тектонические нарушения, параметры деформаций и смещений на определенных временных интервалах.

Наличие знакопеременных смещений в разломных зонах существенно влияет на фильтрационные свойства горного массива. Изменение фильтрационных свойств массива горных пород в области влияния тектонического нарушения в сочетании с изменением гидрогеологического режима является одной из основных причин активизации карстовых процессов с выходом воронок обрушения от карстовых полостей на земную поверхность.

Подтверждением данного предположения служат проведенные исследования на объектах подверженных как суффозионному карсту в песчаных грунтах г. Сургута, [67, 68], дамбы хвостохранилища Качканарского ГОКа [69], так и в массиве известняков на газопроводе Бухара-Урал в Красногорском районе Челябинской области [70].

На всех этих объектах проводились геодинамические исследования на площадках с известными тектоническими условиями, определенными геофизическими методами, рассматривался так же и гидродинамический режим. При этом все три компонента оказались неразрывно связаны между собой.

Выводы

1. Основными исходными характеристиками при построении геомеханической модели карстоопасного участка являются:

- структурно-тектоническое строение территории;
- размеры, форма и глубина залегания карстовых пустот;
- степень заполнения и состав заполнителя;
- гидрогеологическое строение и гидродинамический режим;
- современная геодинамическая активность тектонических нарушений.

2. Основные исходные характеристики карстоопасного массива при построении диагностической модели наиболее целесообразно определять с помощью геофизических и геодезических методов исследования.

3. С точки зрения информативности, производительности и себестоимости основными методами для изучения геомеханических исходных свойств карстоопасного массива являются геофизические методы – электроразведка, спектральное сейсмопрофилирование и георадарное зондирование; параметры современной геодинамической активности следует определять с использованием технологий спутниковой геодезии.

4 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ КАРСТОПРОЯВЛЕНИЙ

4.1 Методы оценки опасности воздействия пустот на земную поверхность

Процессы сдвижения горных пород и земной поверхности изучают в натуре путем инструментальных наблюдений, на моделях из так называемых эквивалентных материалов и путем проведения теоретических исследований.

При изучении процесса сдвижения горных пород непосредственно в натуре, т.е. в районе горных разработок, на исследуемом участке закладывают наблюдательную станцию, состоящую из большого количества реперов. Чаще такую наблюдательную станцию закладывают на поверхности земли. Путем геометрических измерений, которые производят систематически, следят за положением реперов станции во времени и пространстве. При подработке пунктов станции наблюдают их смещение. Сопоставляя наблюденные смещения реперов станции с произведенными горными работами, устанавливают необходимые закономерности развития процесса сдвижения. Более подробно методика натуральных инструментальных наблюдений процесса сдвижения горных пород и земной поверхности рассматриваются в предыдущей главе.

Результаты натуральных инструментальных наблюдений дают богатый и достоверный материал для понимания процесса сдвижения горных пород. Однако проведение таких наблюдений требует длительного времени. Кроме того, в натуре трудно найти условия для изучения отдельных сторон процесса.

При изучении процесса сдвижения горных пород в лабораторных условиях создают плоские и объемные модели исследуемого участка, на которых имитируют выемку полезного ископаемого и вызываемый ею процесс сдвижения. Этот метод предложен доктором технических наук Г. Н. Кузнецовым и др. [71]. В основу каждой модели берут определенный

геологический разрез, для основных горных пород которого предварительно определяют физико-механические свойства. Задаваясь масштабом модели (1:100—1:200), подбирают материалы, механические свойства которых были бы эквивалентны одноименным свойствам пород природы. Показатели механических свойств материалов модели определяют по формуле Г.Н. Кузнецова, вытекающей из общего закона подобия Ньютона:

$$N_m = \frac{l}{L} \times \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \times N_n, \quad (4.1)$$

где N_m – определяемая механическая характеристика (сопротивление сжатию, растяжению, изгибу и т. п.) эквивалентного материала модели;

N_n – соответствующая характеристика пород природы;

γ_m, γ_n – объемные веса материалов модели и пород природы;

$\frac{l}{L}$ – масштаб модели.

Из подобранных эквивалентных материалов создают модель на специальном стенде. Толщина такой модели 15—20 см, а потому она должна рассматриваться как плоская, имитирующая заданный геологический разрез. Затем из модели вынимают намеченную часть «месторождения», образуя «выработанное пространство». В окружающей толще пород начинает развиваться процесс сдвижения, за которым ведут периодические или непрерывные наблюдения.

Хотя в таких моделях нарушены естественные условия, при которых любая частица горного массива подвержена всестороннему сжатию, они позволяют изучать не только количественную, но и качественную сторону процесса сдвижения горных пород.

Оптическое и центробежное моделирование, описанные в специальной литературе, сравнительно редко используются в практике маркшейдерского дела.

Теоретические исследования процесса сдвижения основаны на предположении, что толща горных пород представляет собой сплошную среду, в которой под действием горных разработок возникают пластические деформации. В настоящее время при изучении процесса сдвижения горных пород применяют математическую теорию пластичности, а также теорию механики сплошной среды и тем самым делают попытки создать теоретически обоснованный способ расчета параметров сдвижения. Этот способ изучения процесса сдвижения горных пород требует дальнейшего совершенствования

Изучение процессов сдвижения от карстовых пустот в целом имеет такой же физический смысл, что и сдвижение горных пород от подземных горных работ, только в качестве выработанного пространства выступают карстовые полости различного размера и формы.

Существует несколько методик, позволяющих рассчитать предельное состояние массива горных пород, при котором образовавшаяся пустота может выйти на поверхность в виде воронки обрушения.

В «Правилах охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана» [71, 72] условием, при котором земная поверхность не претерпевает опасных деформаций при разработке слепых изолированных рудных тел и крепостью пород $5 \leq f \leq 18$, является (рис. 4.1):

$$H'_3 > H_p = 55 \times l_3 \times f^{-1.3} , \quad (4.2)$$

где H'_3 - фактическая глубина верхней границы выработанного пространства от контакта коренных пород с наносами, м;

H_p - расчетная предельная глубина от верхней границы рудного тела до наносов, начиная с которой земная поверхность не претерпит опасных деформаций, м;

l_3 - эквивалентный пролет, м.

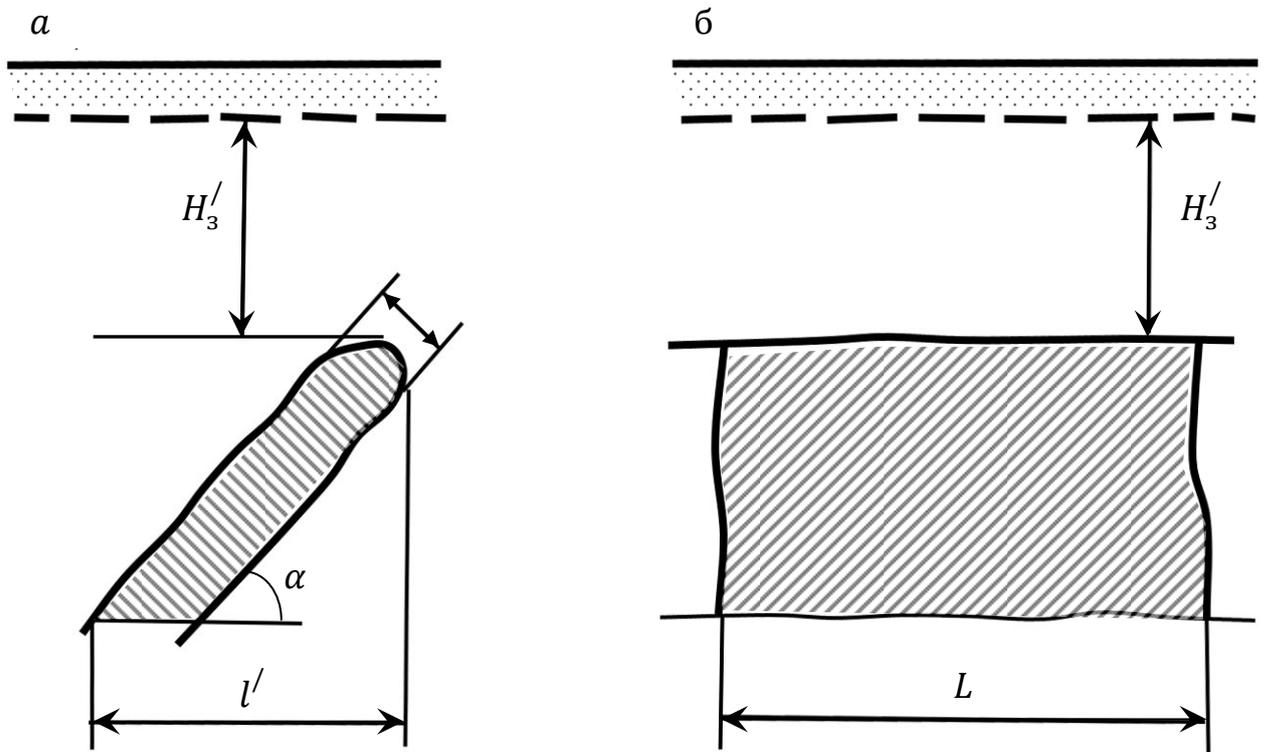


Рисунок 4.1 – Схема к определению устойчивого состояния земной поверхности: а – разрез вкрест простирания; б – проекция на вертикальную плоскость

Для обнажений, где длина по простиранию (L) меньше двукратной величины проекции обнажения вкрест простирания на горизонтальную плоскость (l'), т.е. $L \leq 2l'$, значение эквивалентного пролета определяется по формуле:

$$l_3 = \frac{L \times l'}{\sqrt{L^2 + (l')^2}}. \quad (4.3)$$

В рудных телах большой длины, удовлетворяющих условию $L > 2l'$, можно принять, что $l_3 = l'$.

$$f = \frac{f_1 m_1 + f_2 m_2 + \dots + f_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}, \quad (4.4)$$

где f - средневзвешенное значение коэффициента крепости пород по мощности слоев отдельных литологических разностей ($f^{-1.3}$ приведены в табл. 4.1);

f_1, f_2, \dots, f_n - коэффициенты крепости основных литологических разностей коренных пород по шкале М.М. Протоdjяконова;

m_1, m_2, \dots, m_n - мощности отдельных литологических разностей по вертикали над серединой выработанного пространства, м.

Таблица 4.1

f	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$f^{-1.3}$	0,123	0,097	0,080	0,067	0,058	0,050	0,044	0,040	0,036	0,032	0,030	0,028	0,025	0,023

При тонкослоистых породах, сильнотрещиноватых неслоистых породах, а так же при сильно рассланцованных и перемятых породах расчетную предельную глубину следует увеличить в 2 раза.

При невыполнении указанного выше условия земная поверхность может претерпеть опасные деформации, но без образования воронок обрушения, если выполняются следующие условия:

для слоистых пород с $f \leq 5$, тонкослоистых, сильнотрещиноватых неслоистых пород с любым f , а также сильно рассланцованных и перемятых пород:

$$\frac{H'_3 \times S_{пл}}{V} > 8.5;$$

$$\text{для слоистых пород с } f > 5 : \frac{H'_3 \times S_{пл}}{V} > 6;$$

$$\text{для неслоистых пород с } f > 8 : \frac{H'_3 \times S_{пл}}{V} > 5;$$

где $S_{пл}$ - площадь выработанного пространства в плане, м²;

V - объем выработанного пространства, м³.

При наличии в налегающей толще мощных обводненных слоев, крупных тектонических нарушений и других значительных плоскостей ослабления пользоваться данной методикой не рекомендуется.

В связи с этим для использования данной методики при расчетах устойчивости кровли карстовых полостей требуется значительная доработка методики, так как развитие процессов карстообразования всегда

инициируется высокой обводненностью массива горных пород и наличием активных тектонических нарушений.

Следует отметить, что представленная методика не единственная и существуют другие методические решения для определения параметров процесса сдвижения.

Кроме того, для расчетов сдвижения от карстовых пустот подходит методика, разработанная М.А. Кузнецовым и В.В. Громовым [73] для разрушения сводов естественного равновесия в толще пород для слепых залежей. Условия, принимаемые для решения этой задачи, также подходят для расчета параметров процесса сдвижения от карстовых полостей, ограничением является, как впрочем, и у других методов расчета, плохая адаптация метода к наличию тектонических нарушений.

Сущность методики заключается в рассмотрении условия сводообразования и условия устойчивости земной поверхности на примере отработки слепых рудных залежей в неслоистых вмещающих породах. Как известно, неслоистые породы отличаются большой крепостью и незначительной деформируемостью, и поэтому их сдвижения и деформации в зоне опорного давления при малых и средних глубинах разработки слепых залежей, особенно крутопадающих, невелики [74] и, следовательно, по этой причине, земная поверхность не должна претерпевать опасных сдвижений и деформаций.

Таким образом, безопасная глубина разработки при выемке слепых залежей в неслоистых породах определяется условиями формирования свода равновесия. Свод равновесия представляет собой часть массива горных пород с нижней криволинейной поверхностью, образовавшейся естественным путем при определенном пролете выработки после отрыва и обрушения крупных блоков пород в выработанное пространство.

Условие предельного состояния пород над выработкой можно записать в виде:

$$|P \times \cos \Delta_{cp} - Q|_{max} = 0, \quad (4.5)$$

где P — сумма сил отрыва; Q — сумма удерживающих сил, направленных по нормали к поверхности отрыва; Δ_{cp} — средний угол наклона к горизонту поверхности отрыва.

Выражение (4.5) соответствует следующей системе:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\delta F}{\delta h_1} = 0 \\ P * \cos \Delta_{cp} - Q = 0 \end{array} \right\} \quad (4.6)$$

где $F = P * \cos \Delta_{cp} - Q$; h_1 — высота первичного свода обрушения.

В общем случае на вертикальных разрезах контуры свода обрушения имеют вид кривой второго порядка, например, параболы, полуокружности или полуэллипса. Обычно принимают параболическое очертание свода. С учетом этого вес пород в пределах свода над выработкой длиной 1 м:

$$P = 2/3 l_1 h_1 \gamma, \quad (4.7)$$

где l_1 , — предельный пролет выработки, при превышении которого образуется свод обрушения; γ — средний удельный вес пород.

Без ущерба точности расчетов полагаем, что сумма удерживающих сил:

$$Q = \sigma_p \sqrt{l_1^2 + 4h_1^2}, \quad (4.8)$$

где σ_p — среднее сопротивление пород отрыву (растяжению) в массиве.

Величину $\cos \Delta_{cp}$ можно определить по формуле:

$$\cos \Delta_{cp} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4h_1^2/l_1^2}}, \quad (4.9)$$

Решая систему уравнений (4.6) с учетом выражений для P , Q и $\cos \Delta_{cp}$, получим формулы для определения параметров l_1 и h_1 :

$$l_1 = 6\sigma_p/\gamma, \quad (4.10)$$

$$h_1 = \gamma l_1^2 / 12\sigma_p, \quad (4.11)$$

По формуле (4.10) вычисляют ширину предельного пролета только за счет действия растягивающих напряжений. Между тем в кровле выработки возникает сжатие в горизонтальной плоскости за счет бокового давления и растяжение в вертикальной под влиянием собственного веса пород, что влияет на параметры сводообразования.

Условие разрушения пород путем отрыва, при совместном воздействии растягивающих и сжимающих усилий, направленных перпендикулярно растягивающим, можно получить из аналитического выражения условия прочности по теории Мора:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_c} \sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_p, \quad (4.12)$$

где σ_1, σ_3 — наибольшее нормальное напряжение сжатия и растяжения соответственно; σ_p и σ_c — предел прочности пород на растяжение и сжатие соответственно.

Из выражения (4.12) следует, что для разрушения пород путем отрыва при сжатии в горизонтальной плоскости необходимо приложить растягивающее усилие $\sigma_{пр}$ меньшее, чем предел прочности на растяжение σ_p , на величину:

$$\Delta\sigma_{пр} = \frac{\sigma_p}{\sigma_c} \sigma_{пс}, \quad (4.13)$$

т. е. остаточное разрушающее напряжение растяжения составит:

$$\sigma_{пр} = \sigma_p \left(1 - \frac{\sigma_{пс}}{\sigma_c}\right), \quad (4.14)$$

приложенное сжимающее напряжение будет равно:

$$\sigma_{пс} = \lambda H \gamma, \quad (4.15)$$

где H — глубина расположения горной выработки; λ — коэффициент бокового распора, определяемый через коэффициент Пуассона ν как $\lambda = \nu / (1 - \nu)$.

Подставив в уравнение (4.10) вместо σ_p значение $\sigma_{пр}$ из выражения (4.14), получим формулу для расчета величины предельного пролета обнажения плоской формы на большой глубине:

$$l_1 = \frac{6\sigma_p}{\gamma} \left(1 - \frac{\sigma_{пс}}{\sigma_c}\right). \quad (4.16)$$

Из формулы (4.16) видно, что она имеет смысл при $\sigma_{\text{пс}} \leq \sigma_c$. И тогда кровля, находясь в сложном напряженном состоянии, будет разрушаться как за счет растягивающих усилий, обусловленных собственным весом пород кровли; так и за счет сжимающих напряжений, действующих в горизонтальной плоскости. При $\sigma_{\text{пс}} \geq \sigma_c$ кровля будет разрушаться от сжатия при минимальном пролете. Если напряжения сжатия на порядок меньше прочности пород, то величину l_1 определяют из выражения (4.10).

Визуальными и инструментальными наблюдениями в камерах очистных блоков и в подготовительных выработках, а также в результате промеров по скважинам и наблюдениями с помощью глубинных реперов в скважинах, пробуренных с поверхности в сторону выработанного пространства, установлено, что процесс обрушения пород развивается в основном в вертикальном направлении с образованием приближающихся к земной поверхности временно устойчивых сводов. Есть основания предположить, что процесс обрушения пород над выработанным пространством слепых залежей ограниченных размеров развивается циклично (периодически), и на конечной стадии внезапно разрушается толща пород (потолочина) около земной поверхности.

Таким образом, вопрос о раскрытии свода равновесия на заключительной стадии сдвижения и обрушения пород сводится к оценке устойчивости (несущей способности) потолочины. Б.П. Юматов [75] рекомендует способ расчета устойчивости потолочины, основанный на методах строительной механики. Потолочину рассматривают как толстую балочную плиту, защемленную по контуру и изгибающуюся под собственным весом. Поэтому за основную прочностную характеристику в расчете принимают предел прочности пород при растяжении.

С учетом вида потолочины на вертикальных разрезах ее работа может быть уподоблена работе арки (рис. 4.2).

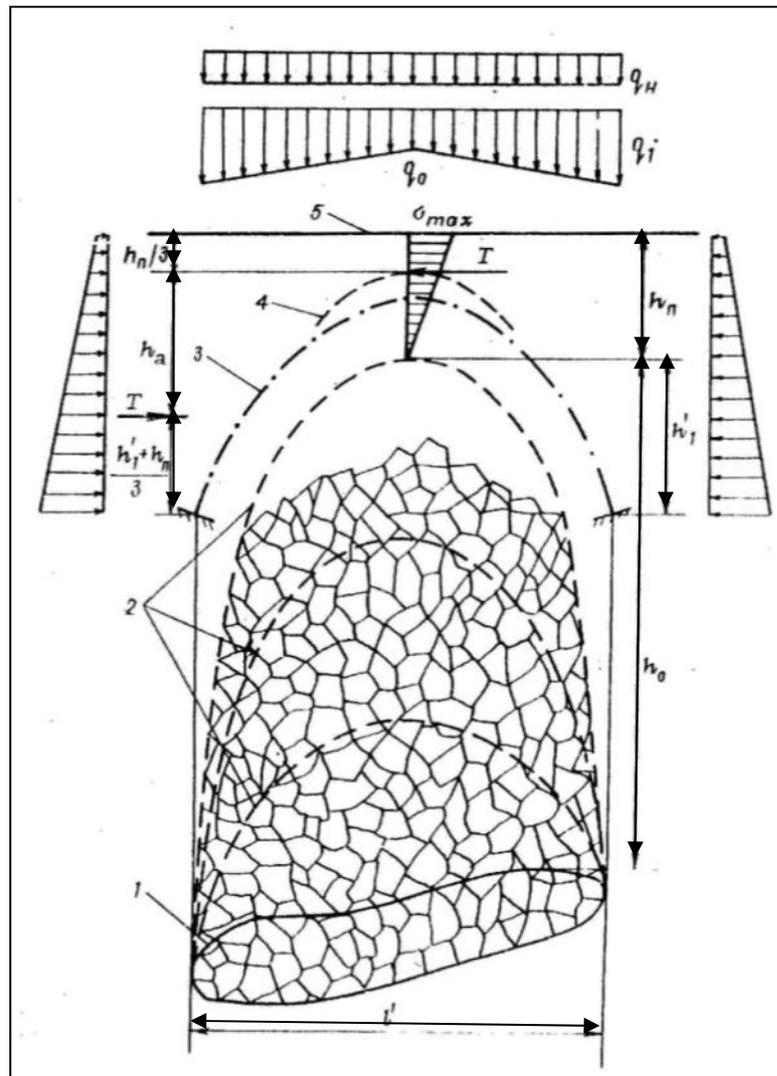


Рисунок 4.2 – Схема, применяемая для расчета воронки обрушения

1 – контуры выработанного пространства; 2 – своды обрушения; 3 – средняя линия свода равновесия (арки); 4 – кривая давления свода; 5 – земная поверхность

Под влиянием боковых усилий массива пород возникает распор в замке арки (свода). Если допустить, что нагрузка на свод симметрична, то образующийся распор будет горизонтальным. Его величина может быть определена по известной из курса строительной механики формуле [76]:

$$T = ql^2/8h_a, \quad (4.17)$$

где T — равнодействующая сил горизонтального распора в замке свода или горизонтальная составляющая опорной реакции; q — интенсивность нагрузки, действующей на свод шириной 1 м, от его собственного веса и веса рыхлых отложений; l — параметр свода равновесия, равный расстоянию

между точками приложения распора у его пят; h_a — стрела (высота) подъема арки, равная расстоянию между линиями, определяющими положение равнодействующей сил распора в пятах и замке арки.

Сила T вызовет появление максимальных сжимающих напряжений в замке свода. Если принять, что кривая давления [77] проходит через крайние точки ядра сечения этого свода, а эпюра распределения напряжений в сечении замка свода описывается по закону треугольника, что допустимо для хрупких крепких горных пород, будет иметь место зависимость:

$$T = \frac{1}{2} \sigma_{max} h_{п} , \quad (4.18)$$

где σ_{max} — наибольшее сжимающее напряжение; $h_{п}$ — толщина свода в замке.

Сопоставив правые части выражений (4.17) и (4.18), получим условие устойчивости арки:

$$\sigma_{max} = ql^2 / 4h_a h_{п} \leq \sigma_{с.м} , \quad (4.19)$$

где $\sigma_{с.м}$ — расчетная характеристика прочности пород на сжатие в массиве, равная:

$$\sigma_{с.м} = K_{осл}^c \sigma_c , \quad (4.20)$$

где $K_{осл}^c$ — коэффициент структурного ослабления пород на сжатие в массиве.

Распределенную нагрузку от собственного веса пород в своде и веса рыхлых отложений принимаем по трапеции (см. рис. 4.3). Тогда интенсивность нагрузки в замковом сечении определим из выражения:

$$q = q_0 + q_n$$

или

$$q = \gamma h_n + \gamma_n h_n , \quad (4.21)$$

где γ, γ_n — средний удельный вес коренных пород и рыхлых отложений соответственно; h_n - мощность рыхлых отложений.

Наиболее трудно определяемой величиной является высота подъема арки (кривая давления) h_a . С увеличением высоты, h_a уменьшается распор в замке арки и, следовательно, снижаются сжимающие напряжения.

При исследовании условий сводообразования на моделях, имитирующих неслоистый породный массив, установлено [78], что в породах прочностью $\sigma_c = 50—90$ МПа отношение $h_1/l_1 = 0,2—0,5$. Учитывая пределы изменения отношения h_1/l_1 и тот факт, что обрушившиеся породы создают боковой отпор необрушенному массиву пород, в результате чего происходит как бы перемещение опор каждого нового свода вверх по мере сводообразования, принимаем подъем свода $h'_1 = 0,3l'$.

Величина стрелы подъема арки (см. рис. 4.2) составит:

$$h_a = (2h'_1 + h_n)/3 . \quad (4.22)$$

При выполнении условия (4.16) земная поверхность должна сохранить устойчивость за счет горизонтального распора, возникновение которого в толще пород непосредственно под земной поверхностью является условием равновесия свода.

При выходе кривой давления за пределы сечения свода или даже при прохождении ее через верхнюю треть в своде возникают растягивающие напряжения. В области растягивающих напряжений раскрываются естественные трещины, особенно вертикальные, и образуются новые за счет разрушения пород в виде хрупкого отрыва. Увеличение количества трещин отрыва и раскрытие их на большую глубину значительно снижают сумму удерживающих сил, в результате чего повышается вероятность разрушения потолочины вследствие сдвига (сползания) пород под действием собственного веса, т. е. на заключительной стадии толща пород около земной поверхности будет деформироваться как анизотропное тело.

Таким образом, если в процессе сдвижения и обрушения пород на небольшой глубине от земной поверхности сформируется свод равновесия и его параметры (пролет и подъем) будут такими, что со временем в своде

появятся растягивающие и сдвигающие напряжения, превышающие допустимые, то произойдет нарушение устойчивости толщи пород около земной поверхности. При этом на земной поверхности образуется зона плавных сдвижений с критическими деформациями, принятыми при определении углов сдвижения, а также не исключается возможность возникновения трещин или внезапного самообрушения.

На основании предельных пролетов В. Д. Слесарева [79] толщина потолочины, породы которой испытывают упругие деформации при прогибе за счет собственного веса и веса рыхлых отложений и только со временем подвержены остаточным деформациям, может быть ориентировочно вычислена из выражения:

$$h_{\text{п}} = (\gamma l'^2 + l' \sqrt{(\gamma l')^2 + 8\sigma_p \gamma_n h_n}) / 4\sigma_p. \quad (4.23)$$

Исследованиями, проведенными на моделях из эквивалентных материалов, установлено [80], что при отработке слепых залежей в массиве, сложенном крепкими не трещиноватыми или слабо трещиноватыми породами, своды обрушения, как правило, не образуются. В этих условиях при достижении предельных обнажений происходит сдвижение и обрушение одновременно всей толщи налегающих пород вплоть до земной поверхности без предварительного сводообразования.

Обрушению пород предшествует развитие растягивающих напряжений на земной поверхности примерно над границами выработанного пространства.

Очевидно, что наиболее надежно можно поставить условия сдвижения и обрушения горных пород и земной поверхности только на основании эмпирических зависимостей. В настоящее время накоплен большой объем информации о том, какие последствия вызывает отработка слепых залежей ограниченных размеров в различных горно-геологических условиях. Основное место в этой информации занимают сведения о геометрических

параметрах выработанного пространства, глубине его расположения, прочности пород в образце, трещиноватости подработанного массива и степени влияния на земную поверхность. Сведений же о параметрах сводов обрушения немного, так как сложно зафиксировать момент их образования и контуры их развития.

При сдвигении и обрушении породы неслоистого строения работают преимущественно на отрыв и сдвиг. Сопrotивляемость пород в массиве отрыву, который происходит по несплошным трещинам и межтрещинным участкам, остается наименее изученной. По немногочисленным данным коэффициент структурного ослабления в условиях отрыва составляет 0,03-0,04. Если принять во внимание исследования А. Ф. Смирнова [81] для условий Кривбасса, то коэффициенты структурного ослабления пород в массиве при отрыве и сцепления в массиве равны.

Наиболее изученной прочностной характеристикой является сцепление пород в массиве, которое реализуется при сдвиге. Известно [82], что при отсутствии нормальных напряжений или при небольшой их величине породы разрушаются под влиянием отрыва, а не сдвига. С учетом этого при обобщении и анализе фактических данных для характеристики прочности трещиноватого массива принята величина сцепления, определяемая по формуле Г. Л. Фисенко:

$$K_M = \frac{K_0}{1 + \alpha \ln(L_{об}/l_c)}, \quad (4.24)$$

где K_M , K_0 - сцепление в массиве и в образце соответственно, МПа; α - коэффициент, зависящий от прочности породы в монолитном образце и характера трещиноватости; $L_{об}/l_c$ - отношение типичного размера деформирующегося объема к среднему размеру элементарных блоков породы, на которые массив разбит трещиноватостью. В качестве типичного размера зоны отрыва и сдвига пород $L_{об}$ принимают меньший из двух размеров выработанного пространства в плане.

В результате статистической обработки фактических данных по выемке слепых залежей на месторождениях с неслоистым строением вмещающих пород получено условие устойчивости земной поверхности (рис. 4.3):

$$H'_{\text{пр}} > k_c l_3, \quad (4.25)$$

где $H'_{\text{пр}}$ - приведенная глубина верхней границы выработанного пространства в коренных неветрелых породах, м; k_c - коэффициент, учитывающий прочностные свойства пород и определяемый в зависимости от их сцепления в массиве K_M см (см. таблицу 4.2); l_3 - эквивалентный пролет, м.

Таблица 4.2

K_M , МПа	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
k_c	7.1	4.1	2.6	1.7	1.1	0.8	0.6	0.45	0.3

Величину $H'_{\text{пр}}$ определяют из выражения

$$H'_{\text{пр}} = \frac{H'}{1+n_1+0.67n_2}, \quad (4.26)$$

где H' - фактическая мощность коренных неветрелых пород до верхней границы выработанного пространства, м; $n_1 = h_B/H'$; $n_2 = h_{\text{п}}/H'$. Здесь h_B - мощность ветрелых коренных пород, м; $h_{\text{п}}$ - мощность рыхлых отложений, м.

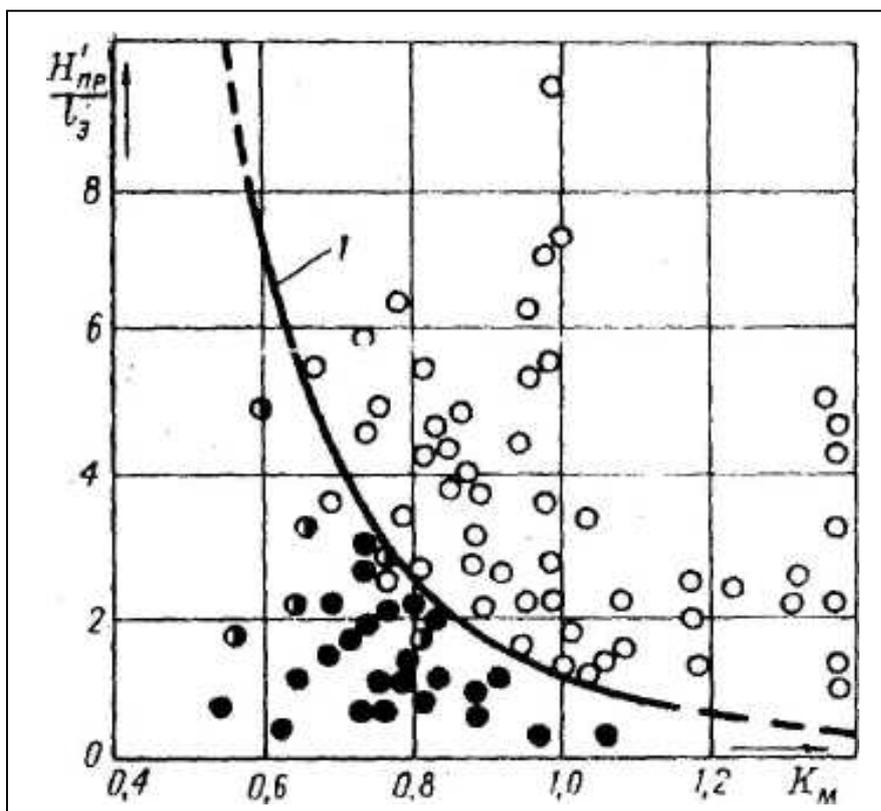


Рисунок 4.3 – График для определения устойчивости земной поверхности:

- - устойчивое состояние; ◐ - плавные сдвигения с опасными деформациями, трещины; ● - воронка обрушения, провал;
- 1 - разделяющая кривая

Параметр $l_э$ рассчитывают по формуле для определения эквивалентных пролетов В. Д. Слесарева [83]:

$$l_э = \frac{Ll'}{\sqrt{L^2 + (l')^2}}, \quad (4.27)$$

где L размер залежи по простиранию, м; l' - горизонтальная проекция залежи на разрезе вкрест простирания, м.

При выполнении условия (4.25) сохраняется устойчивость пород всякого бока или же в налегающей толще сформируется свод равновесия. В противном случае, при $H'_{пр} < k_c l_э$ произойдет разрушение свода, и земная поверхность претерпит опасные сдвигения и деформации, а вероятнее всего, появится воронка обрушения или провал.

Как и у большинства методик, в данной методике не рекомендуется использовать зависимость (4.25) при наличии в массиве крупных тектонических нарушений, особенно таких, которые прослеживаются от выработанного пространства до земной поверхности. Таким образом, одна из задач дальнейших исследований — установление условий возникновения сдвижений поверхности при наличии сильно развитой дизъюнктивной нарушенности, которая непременно присутствует в карстоопасных массивах, для которых планируется применять выше описанную методику.

Еще одна методика расчета устойчивости пород над выработанным пространством для слепых залежей была разработана И.Д. Ривкиным [84]. В данной методике рассмотрены следующие случаи равновесия налегающих пород:

- условия устойчивости обнажения, образовавшегося после полной или частичной отработки слепой залежи. Форма и размеры обнажения в этом случае обусловлены особенностями залегания залежи и контакта руды с налегающими породами. В крутопадающих залежах оно чаще всего представляет собой защемленное по всему контуру плоское наклонное обнажение пород всяческого бока, которое часто сочетается с горизонтальным обнажением налегающих пород (рис. 4.4);

- условия устойчивости сводообразного обнажения, образовавшегося вследствие разрушения плоского обнажения и объединения местных вывалов в общий свод, стабилизировавшийся в налегающей толще;

- условия нарушения устойчивости сводообразного обнажения с выходом процесса разрушения на земную поверхность в виде воронок, провалов или плавных оседаний.

Для оценки устойчивости горных выработок по данной методике используется также вышеупомянутый «метод эквивалентных пролетов».

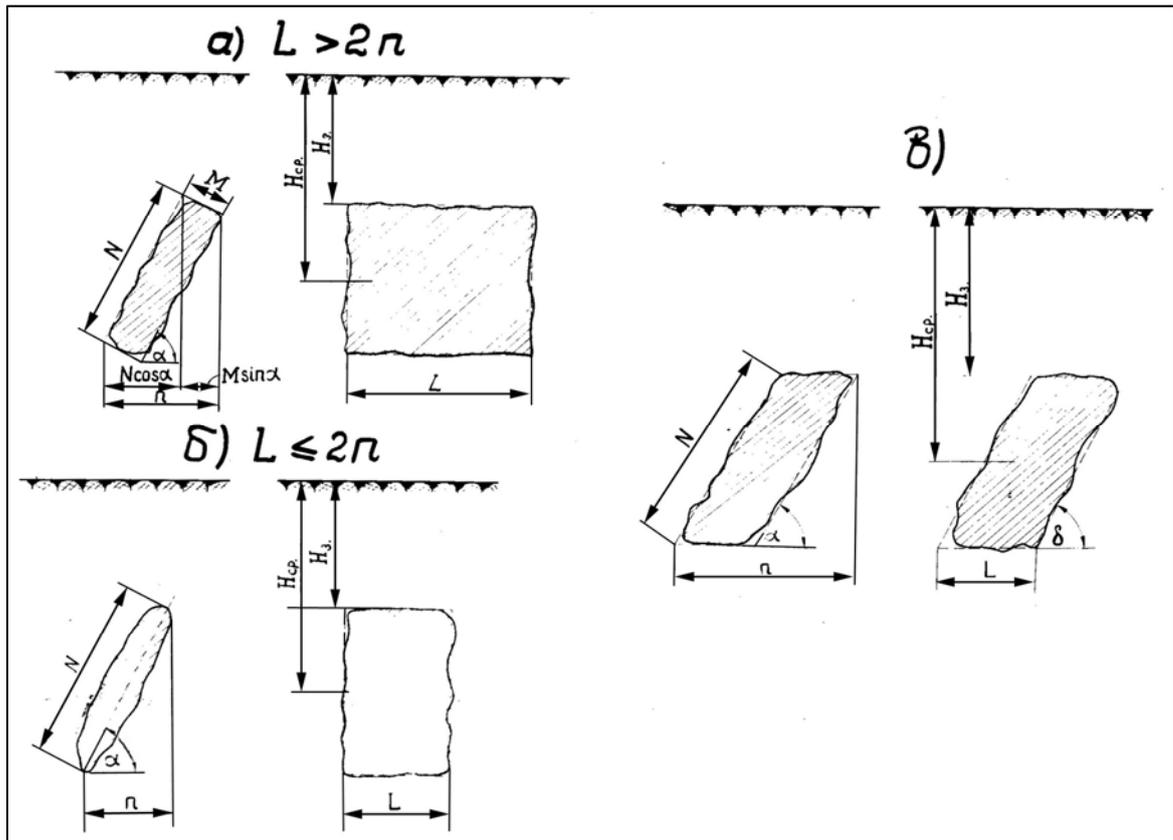


Рисунок 4.4 – Условия залегания слепых залежей

Для обнажения, в котором длина по простиранию меньше двукратной величины проекции обнажения на горизонтальную плоскость, значение эквивалентного пролета определяется из формулы:

$$l_{\text{эkv}} = \frac{nL}{\sqrt{n^2 + L^2}}, \quad (4.28)$$

Критерием устойчивости обнажения является неравенство

$$l_{\text{эkv}} \leq l_0, \quad (4.29)$$

где l_0 – предельный пролет выработки или пустоты большой длины, найденный экспериментальным путем.

На рис. 4.5 приведены зависимости между отношением l_0/H_{cp} и коэффициентом крепости пород по Протодьяконову.

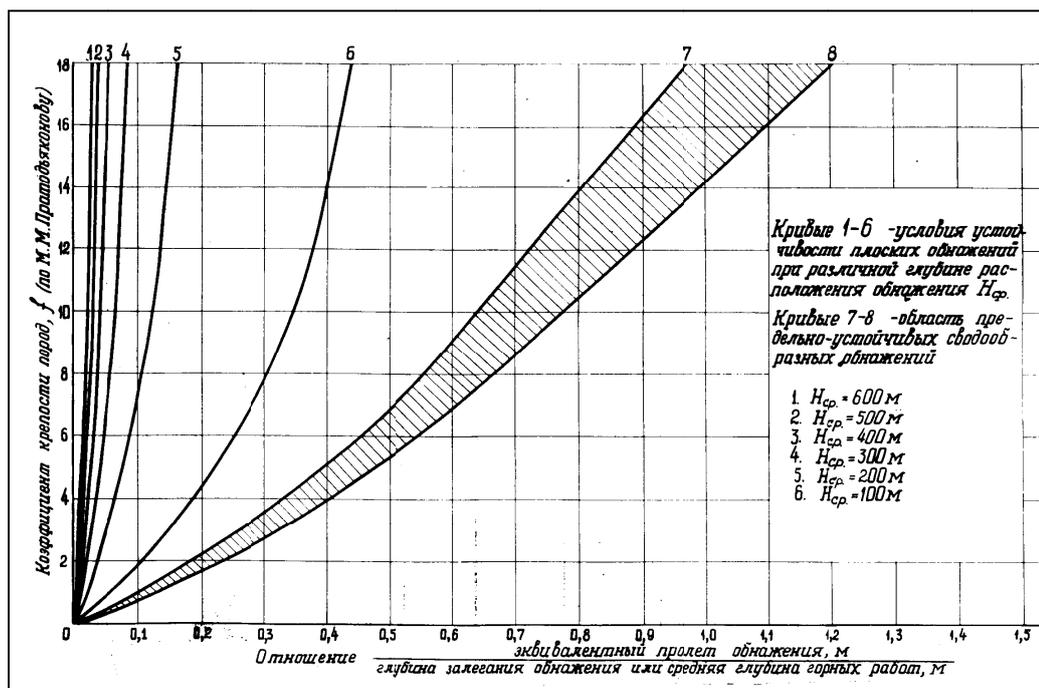


Рис.4.5. – Условия устойчивости обнажений массива горных пород

Пользуясь приведенными зависимостями и выражениями (4.28) и (4.29) производятся расчеты параметров предельных обнажений для известных типов пород и глубины залегания выработанного пространства.

Этот метод для условий расчета устойчивости горного массива от карстовых пустот был опробован на Красногорском участке газопровода «Бухара-Урал», пример его использования приведен в пятой главе, промышленном применении результатов исследований.

Все вышеописанные методики могут быть использованы для условий расчета сдвижения горных пород от карстовых пустот, но основной недостаток каждой из них, непригодность к условиям тектонически нарушенных и обводненных массивов горных пород, что является главным критерием развития карста. Геодинамическая активность вовсе не учитывается, хотя как уже упоминалось ранее, доказано [41], что при приближении к зонам тектонических нарушений подвижность возрастает по отношению к центральным частям структурных блоков в 6 раз.

4.2 Расчетная геомеханическая модель

Как уже говорилось во второй главе настоящей работы, важнейшими геомеханическими параметрами, определяющими закономерности поведения пород, вмещающих карстовые полости (развитие процесса сдвижения над карстовой полостью), являются:

- параметры карстовой полости, ее размеры и форма;
- глубина ее заложения от земной поверхности или от сооружения, расположенного в зоне возможного негативного влияния;
- прочностные и структурные особенности вмещающих пород и налегающей толщи;
- гидродинамический и геодинамический режим вмещающего карстовые полости массива горных пород.

Первые три характеристики используются для расчета параметров процесса обрушения, а последние определяют возможность активизации процессов карстообразования.

Размеры и форма карстовых полостей определяются геофизическими методами и в случае необходимости заверяются бурением разведочной скважины. Достоверность получаемых при геофизической диагностике границ подземных пустот неоднократно подтверждалась в условиях шахтного зондирования с известными параметрами горных выработок [85-87].

При этом выявляется и глубина залегания пустоты, т.е. характеристики достаточные для проведения расчета возможности обрушения. Заверочное бурение дает возможность определить степень заполнения и состав заполнителя пустот, что учитывается при расчетах параметров и формы процессов сдвижения.

Такие работы проводились на Соль-Илецком руднике в 2004 году [88] (рис. 4.6).

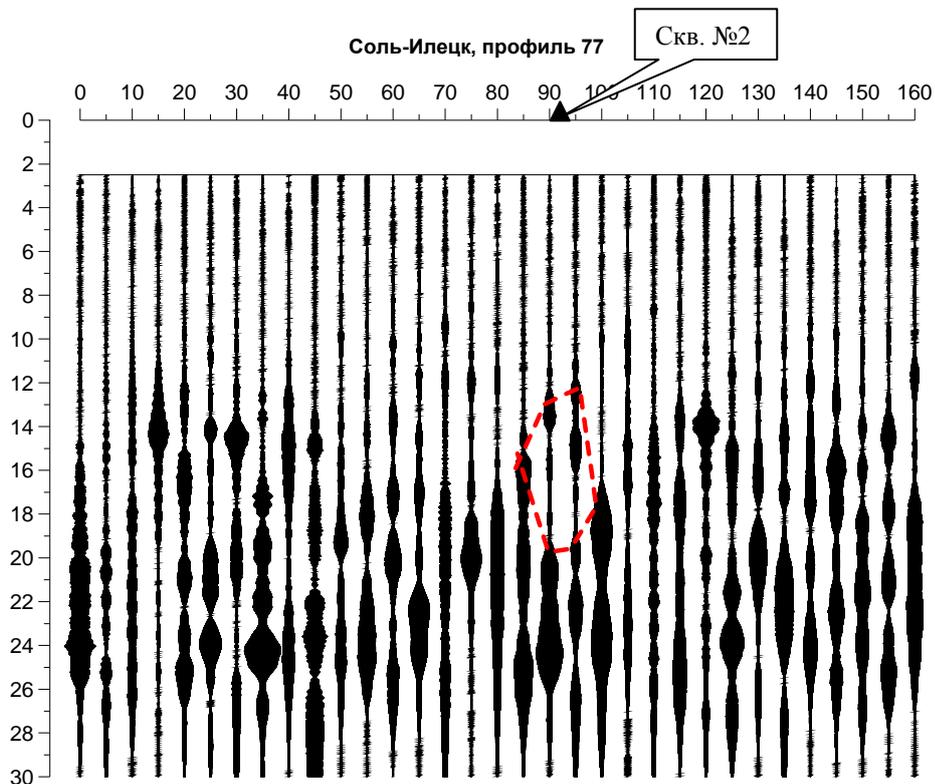


Рисунок 4.6 – Выявление карстовых пустот на Соль-Илецком руднике, спектральный сейсморазрез по профилю №77

Заданная на отмеченном участке скважина №2, пробуренная на глубину 35 метров, показала следующий разрез:

0-4,8 м – супесь, песок, глина;

4,8-5,2 м – кора выветривания по соли с гипсом;

5,2-21 м – сильно выветрелая, трещиноватая, крупнозернистая, слабо связанная каменная соль. В интервале 12,5-16 м и 17,2-19 м карстовые пустоты в соли, заполненные песком и разрушенной солью.

21-35 м – монолитная каменная соль.

Т.е. карстовая полость в интервале 12-19 метров полностью подтвердилась, что доказывает состоятельность метода спектрального сейсмопрофилирования, кроме того было получено представление о составе заполнителя.

На данном объекте исследования проводились двумя методами, ССП и георадарным зондированием (рис. 4.7) с сеткой съемки 5x5 м, что было достаточно для обобщенных исследований на предмет наличия карстовых

полостей.

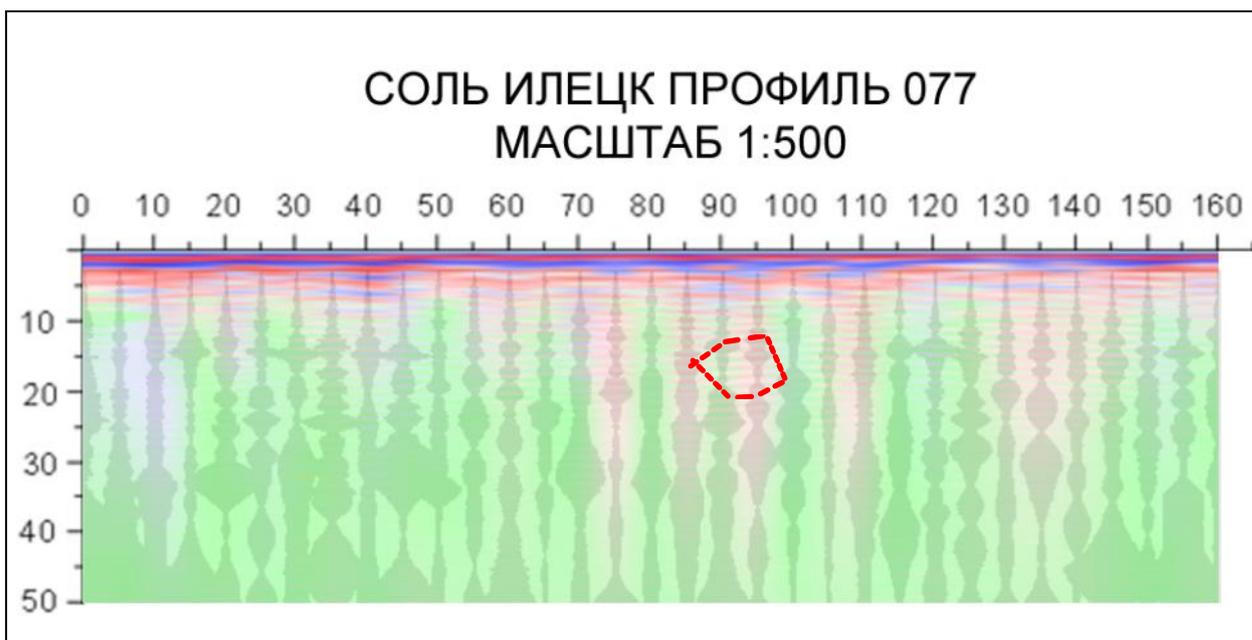


Рисунок 4.7 – Совмещенный георадарный разрез №77 со спектральным сейсморазрезом

Зная глубину залегания карстовой полости и ее размеры можно рассчитать возможность выхода карстовой воронки обрушения на поверхность в случае активизации выноса заполнителя по трещинам. На данном объекте вынос может быть спровоцирован изменением гидродинамического режима соляного массива, учитывая высокий напор, большой объем поверхностных вод и достаточный резервуар подземных выработок. Тектонические свойства массива на данном объекте не изучались, что обусловлено геологическим строением соляного месторождения. Происхождение карста на данном объекте техногенное, его образование спровоцировано горными работами.

Большая представительность выборки геофизических исследований на Соль-Илецком руднике позволила использовать их для разработки новой методики интерпретации результатов спектрального сейсмопрофилирования. Сущность методики заключается в использовании численного значения

добротности сигнала для визуализации структурного строения массива горных пород на определенном интервале глубин. Это позволяет определить степень дезинтеграции горного массива, от которой зависят прочностные свойства налегающей толщи. Данные параметры определяют форму проявления процессов сдвижения – сдвижение горных пород с образованием воронки обрушения либо плавные деформации земной поверхности.

В основу методики положены разработанные НПФ «Геофизпрогноз» программы для построения спектральных сейсморазрезов и расчета среднего уровня добротности сигнала в заданном интервале глубин.

Определив глубину залегания карстовой полости, по спектральному сейсморазрезу задаются граничные параметры для расчета добротности в известном интервале налегающей толщи. На рис. 4.8 приведена диаграмма распределения усредненной величины добротности по профильной линии.

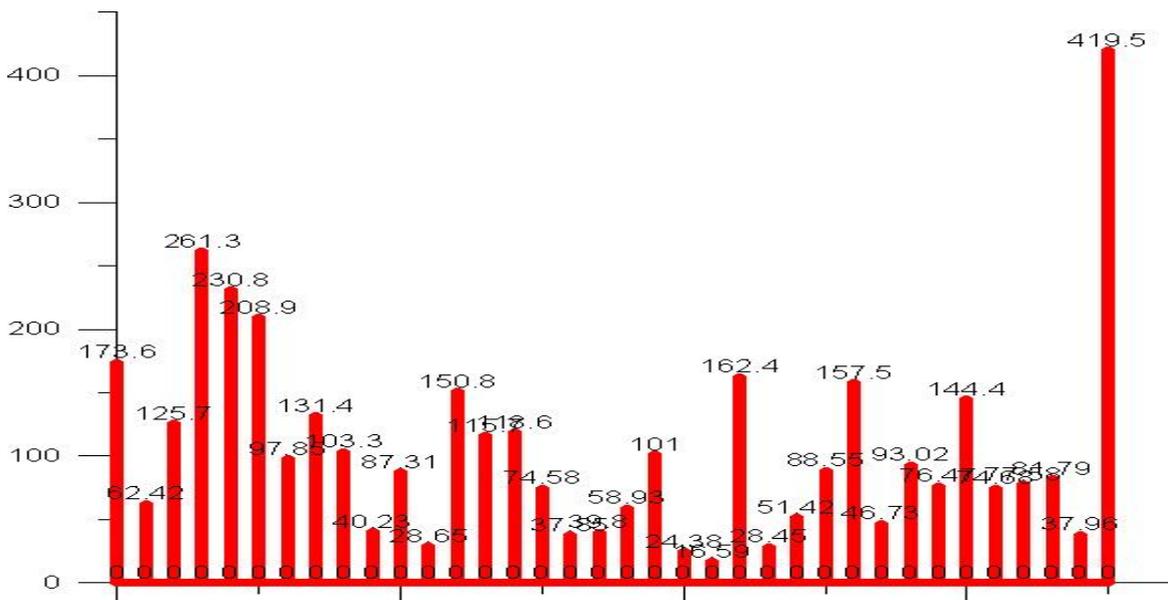


Рисунок 4.8 – Диаграмма распределения среднего уровня добротности в заданном интервале глубин

Имея выборку из нескольких профилей с известными координатами точек, используя графические редакторы, в частности была использована программа «Surfer», можно построить геомеханическую модель исследуемого участка (рис. 4.9).

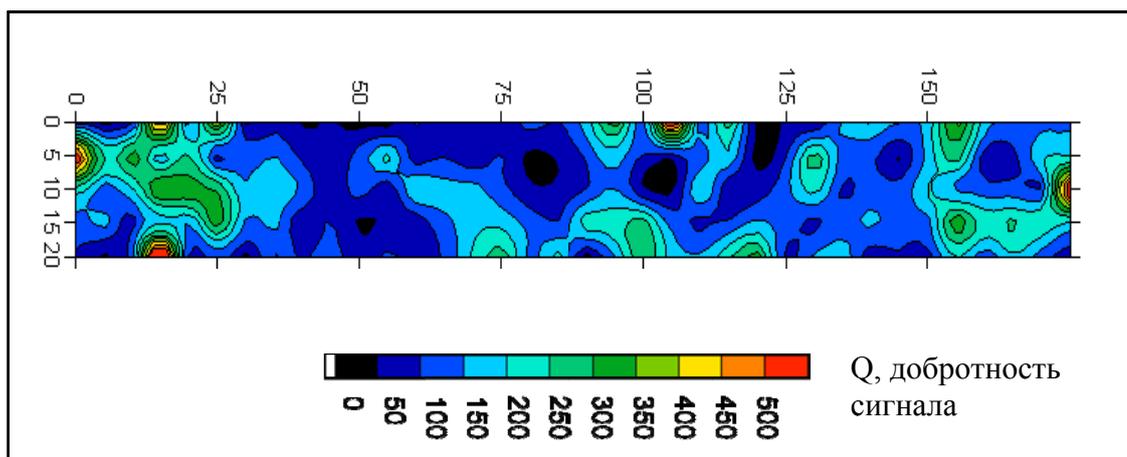


Рисунок 4.9 – Геомеханическая модель участка исследований

Чем выше уровень добротности сигнала налегающей толщи, тем больше вероятность образования воронки обрушения, так как в этом случае горный массив имеет минимальную спайность и находится в дезинтегрированном состоянии.

Данную методику также можно использовать для уточнения площадных размеров карстовых полостей, задав граничные условия выборки в интервале глубин выявленного карста. Следует отметить, что на настоящий момент времени разработанная методика используется не только для изучения карста, но и успешно реализуется при диагностике территорий, подработанных старыми горными выработками, только место карстовой полости занимает непогашенная горная выработка.

Добротность также помогает распознать погашенные пустоты, так как массив горных пород, в котором прошел процесс обрушения налегающей толщи, представляет собой сильно дезинтегрированную горную массу с отсутствием ярко выраженной структуры. В связи с этим уровень добротности сигнала находится в минимальном диапазоне. На рис. 4.10 представлен спектральный сейсморазрез, полученный на участке образовавшегося провала в г. Нижний Тагил.

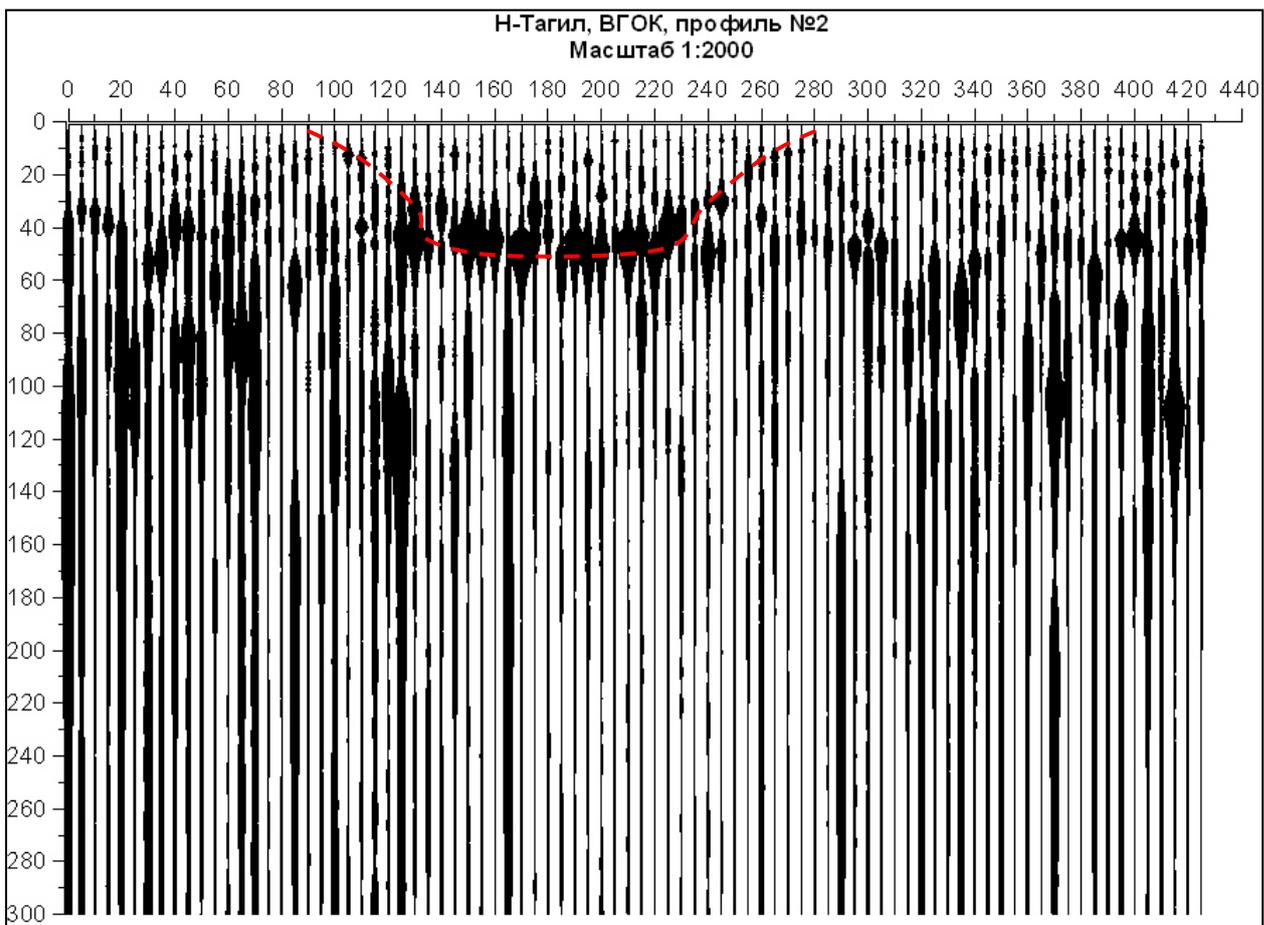


Рисунок 4.10 – Спектральный сейсморазрез вкрест образовавшегося провала земной поверхности в г. Н-Тагил, 2009 г.

Одна из основных составляющих геомеханической модели карстоопасного участка – геодинамическая активность тектонических нарушений. Как уже неоднократно упоминалось, развитие карста практически повсеместно связано тектонически нарушенным массивом горных пород. Ярким подтверждением этому служат наблюдения за проявлениями карстово-суффозионных процессов по району г. Дзержинска, выполненные Филиалом ОАО ПНИИИС «Противокарстовая и береговая защита». По данным этих наблюдений [89] составлена схема проявления карстово-суффозионных процессов в г. Дзержинске (рис. 4.11).

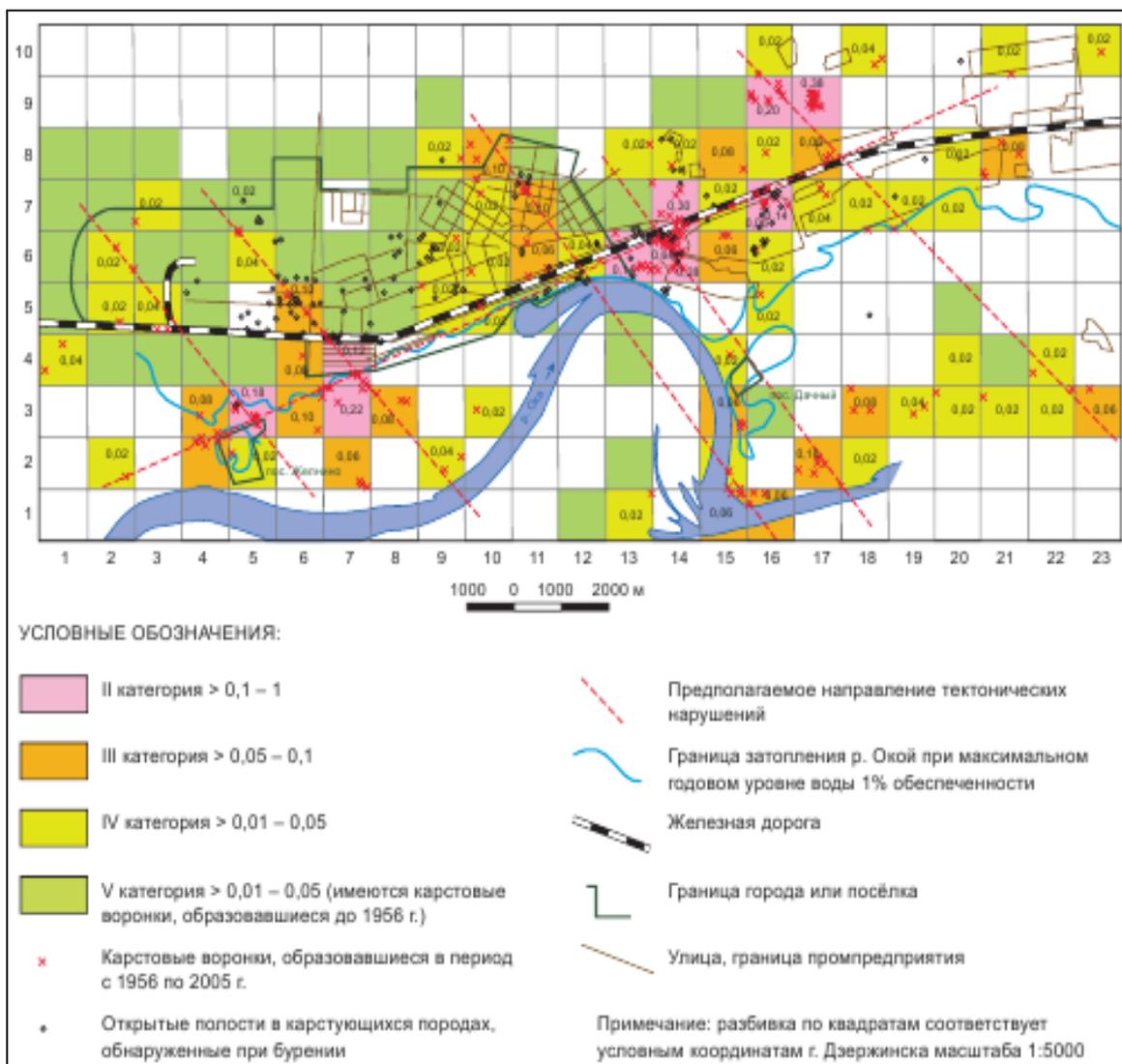


Рисунок 4.11 – Схема проявления карстово-суффозионных процессов по району г. Дзержинска за последние 50 лет (1956-2005)

Как видно из схемы, большинство карстовых провалов происходит в тектонически нарушенных зонах, особенно в местах пересечений тектонических нарушений. На основании имеющихся материалов в рамках диссертационной была проведена статистическая обработка результатов мониторинга, которые показали, что 86% всех образовавшихся карстовых провалов приходятся на зоны тектонических нарушений и прилегающие к ним территории и только 14% провалов расположены за их пределами (рис. 4.12).

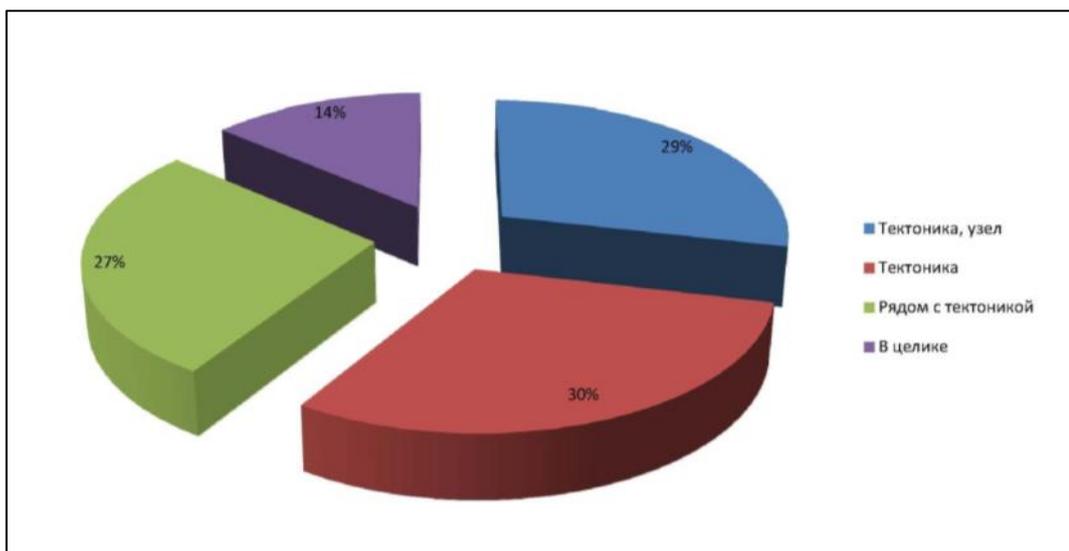


Рисунок 4.12 – Диаграмма распределения образовавшихся карстовых провалов по отношению к тектоническим нарушениям

Следует учесть тот факт, что далеко не вся тектоника вынесена на схему в связи с отсутствием специальных исследований. Процент карстовых провалов вне тектоники должен быть еще ниже.

Обратная зависимость наблюдается, если рассматривать обнаруженные карстовые полости, не затронутые процессами сдвижения. Как видно из диаграммы, представленной на рис. 4.13, 45% всех обнаруженных карстовых полостей, незатронутых процессами сдвижения, расположены внутри структурных блоков, ограниченных тектоническими нарушениями.

Как показывают многолетние наблюдения, места проявления современных геодинамических движений в большей мере тяготеют к активным тектоническим структурам и непосредственно прилегающим к ним объемам пород и участкам земной поверхности. Экспериментально в этих зонах установлены наибольшие амплитуды смещений. С удалением от тектонических структур вглубь структурных блоков наблюдается снижение уровня деформаций.

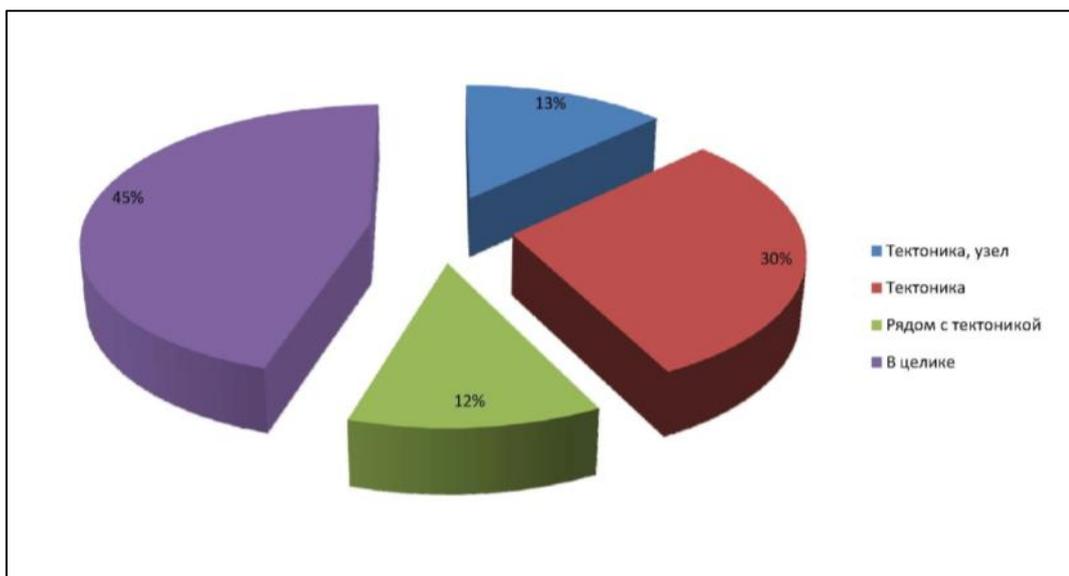


Рисунок 4.13 – Диаграмма распределения обнаруженных карстовых пустот по отношению к тектоническим нарушениям

Это объясняет причины устойчивого состояния налегающей толщи над обнаруженными карстовыми полостями. Современные геодинамические движения приводят массив горных пород в тиксотропное состояние, что сказывается на прочностных свойствах налегающей толщи и увеличивает вероятность развития процесса обрушения над карстовой полостью.

Общепринято, что для образования карста необходимо выполнение четырех условий, включающих: наличие растворимых пород, их водопроницаемости, движущихся вод и их растворяющей способности.

На основании проведенных в диссертационной работе исследований можно обосновать граничные условия, необходимые для развития процессов обрушения карстовых пустот: наличие незаполненного пространства карстовой полости, тектонического нарушения, современной геодинамической активности этого нарушения и высокой степени дезинтеграции массива горных пород налегающей толщи.

Эти параметры легли в основу расчетной геомеханической модели карстоопасного участка для обоснования безопасного строительства и эксплуатации объектов недропользования.

4.3 Экспериментально-аналитический метод оценки опасности карстопроявлений

Разработанная методика изучения геомеханических параметров карстоопасного массива позволяет достоверно определить основные характеристики массива горных пород, отвечающие за развитие процесса сдвижения налегающей толщи над карстовыми полостями.

Прогнозирование последствий влияния карстопроявлений на земную поверхность с обрушением налегающих пород возможно с использованием комплексных критериев, учитывающих взаимосвязь геометрических параметров карстовых полостей, физико-механических свойств, структурных особенностей массива горных пород и геодинамических параметров [90-91].

Комплексными критериями для оценки устойчивого состояния и прогноза формы проявления процесса сдвижения земной поверхности над карстовыми полостями ограниченных размеров являются:

- отношение приведенной глубины верхней границы карстовой полости в коренных породах к эквивалентному пролету закарстованного пространства;

- отношение глубины верхней границы карстовой полости в коренных породах к размеру ее вертикальной проекции на разрезе;

- степень заполнения и состав заполнителя карстовой полости;

- структурно-тектоническое строение налегающей толщи горных пород, степень трещиноватости и раздробленности;

- уровень современных геодинамических движений на участке карстопроявлений.

Из этого следует, что диагностика карстопроявлений, наряду с изучением традиционно учитываемых факторов (параметров карстовой полости, условий залегания, степени заполнения, свойств пород), требует проведения исследований структурной нарушенности пород тектонического нарушения, определяемой коэффициентом добротности метода

спектрального сейсмозондирования и параметров современных геодинамических движений методами спутниковой геодезии, комплекс которых позволяет оценить уровень тиксотропии в породах и возможность развития процесса обрушения над карстовой полостью.

На основании проведенного анализа геомеханической модели карстоопасного участка, предлагается использовать для расчета процесса сдвижения от карстовых полостей следующие зависимости:

1. При отсутствии геодинамически активных нарушений в налегающей толще пород земная поверхность не претерпит опасных деформаций если:

$$H_3 > 55l_3 f^{-1,3}, \text{ где} \quad (4.29)$$

H_3 – глубина залегания карста (рис. 4.14);

l_3 – эквивалентный пролет карстовой полости (выражение (4.30));

f – крепость пород по М.М. Протоdjяконову.

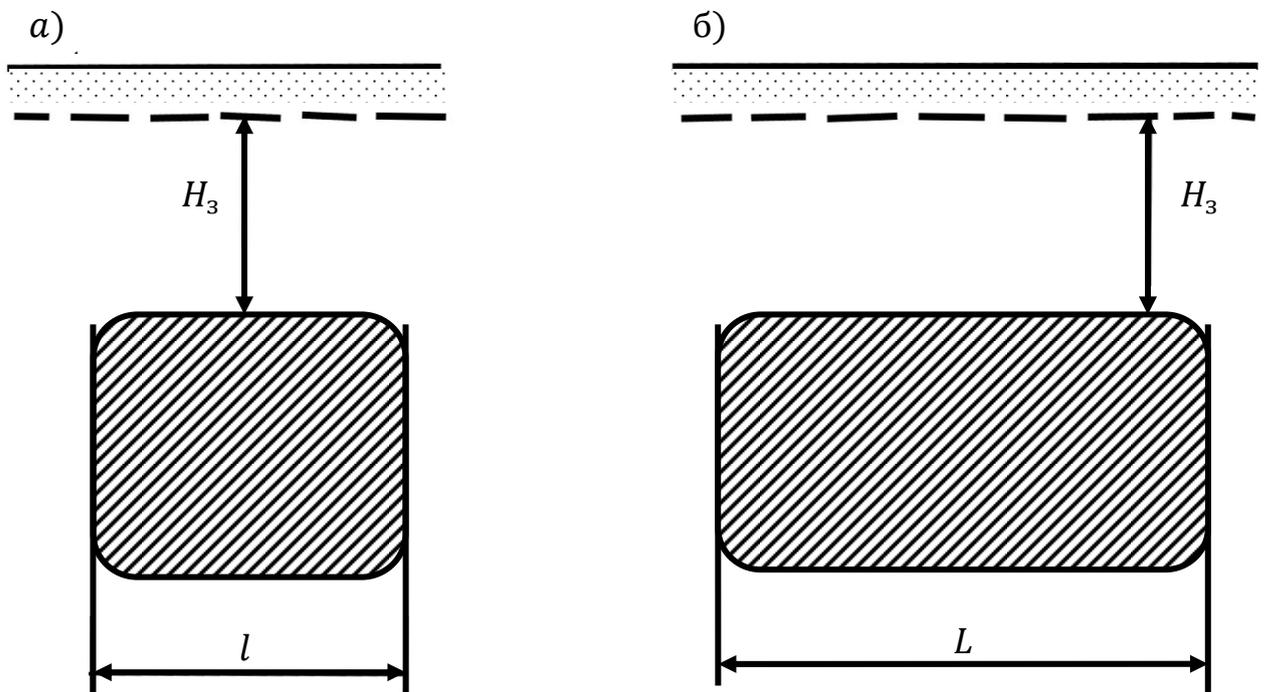


Рисунок 4.14 – Схема к определению устойчивого состояния земной поверхности: а) разрез вкрест простираня карстовой полости; б) проекция на вертикальную плоскость

Для карстовых полостей, где длина по простиранию (L) меньше двукратной величины проекции обнажения вкост простирания на горизонтальную плоскость (l), т.е. $L \leq 2l$, значение эквивалентного пролета определяется по формуле:

$$l_3 = \frac{L \times l}{\sqrt{L^2 + l^2}}. \quad (4.30)$$

В карстовых полостях большой длины, удовлетворяющих условию $L > 2l$, можно принять, что $l_3 = l$.

2. При наличии геодинамически активных тектонических нарушений на земной поверхности не образуется провала, но развиваются плавные деформации, требующие специальных мер по обеспечению безопасности объектов, если:

$$H_3 S / (V - V_{дисп}) > K, \quad \text{где} \quad (4.31)$$

H_3 – глубина залегания карста;

S – площадь карста в плане;

V – объем карста;

$V_{дисп}$ – объем дисперсного заполнителя;

K – коэффициент, определяемый по остаточному разрыхлению обрушенных пород.

Использование предлагаемой методики для расчета параметров процесса сдвижения карстовых полостей позволяет определить степень опасности карстопроявлений, возможность безопасного строительства и эксплуатации объектов недропользования на карстоопасных территориях. В случае попадания объектов недропользования в зону опасных деформаций требуется введение и отсутствии возможности изменения месторасположения объекта, требуется проведение специальных мероприятий по укреплению карстующихся пород.

4.4 Методы укрепления карстующихся пород

Противокарстовые инженерные мероприятия в каждой конкретном случае должны иметь технико-экономические обоснования, разрабатываемые не только из условий снижения стоимости строительства, но также из условий рентабельности предприятия или группы технологически взаимосвязанных предприятий. Методы укрепления карстующихся грунтов и особенности строительства на карстоопасных территориях регламентируются нормативными документами [92].

При проектировании инженерных сооружений традиционно применяются следующие виды противокарстовых мероприятий:

- заполнение полостей и пустот водонепроницаемым материалом;
- цементация, глинизация, битумизация, силикатизация, смолизация, методы электрохимического или термического воздействия, искусственное замораживание, устройство свайных оснований;
- снижение давления на кровлю полостей и пустот посредством разгружающих устройств (эстакад, перекрытий и т.п.);
- применение более мощного верхнего строения пути;
- обрушение взрывами неустойчивой кровли над полостями и пустотами;
- организация поверхностного стока, водопонижения и регулирование режима подземных вод.

В настоящее время при строительстве транспортных сооружений для предотвращения карстообразования широко применяются такие методы искусственного укрепления грунтов, использующиеся в целях улучшения их строительных свойств, как: устройство свайных оснований с «гибким» ростверком, армогрунтовые конструкции перекрытия образовавшихся провалов, полостей металлическими сетками; армогрунтовые конструкции в основании ж/д полотна с так называемым сигнальным слоем из высокопрочных геосинтетиков, снабженным датчиками для измерения

деформаций. Такой вид армогрунтовых конструкций с тензометрами используется для мониторинга за карстовыми процессами.

Концепция армирования грунтов как метод улучшения их свойств при строительстве транспортных сооружений, в частности, железных дорог, на территориях, подверженных карстообразованию, особенно в условиях стесненной городской и/или промышленной застройки, имеет большое научное и практическое значение.

Одним из часто используемых противокарстовых мероприятий при строительстве и укреплении объектов городской застройки на настоящий момент времени является буроинъекционный способ тампонирувания грунтов, разработанный и применяемый ОАО «Фундаментпроект» <http://www.fundamnt.ru>.

От обычной цементации такие технологии отличаются, прежде всего, тем, что расположение скважин, принимаемое обычно по прямоугольной сетке с постепенным сближением их шага, заменено расположением скважин только над карстовыми образованиями, что позволяет значительно снизить их количество. Кроме того, все работы проводятся комплексно, что позволяет в процессе строительства изменять количество скважин, состав раствора, другие параметры, совершенствуя технологические процессы. Все изыскательские скважины и пустоты по окончании бурения оборудуются заливочными трубами и используются для инъекций через них твердеющих тампонажных растворов (рис. 4.15).



Рисунок 4.15 – Комплект специального малогабаритного оборудования для изготовления буроинъекционных свай и бурение наклонной скважины

Положительные результаты контрольных (геологических, геофизических, визуального обследований и др.) работ при производственном внедрении этой технологии и ориентировочные технико-экономические расчеты показали, что его реализация позволяет значительно уменьшить материалоемкость и трудоемкость, а также примерно в два раза снизить проектную сметную стоимость укрепления карстующихся грунтов без ущерба для обеспечения надежной прочности и устойчивости основания на весь эксплуатационный срок службы зданий и сооружений.

Применение этой и других технологий позволит использовать в качестве оснований объектов недропользования закарстованный массив горных пород. Выбор методов укрепления грунтов карстоопасного участка зависит от параметров выявленных карстовых пустот того или иного способа, степени опасности с точки зрения деформаций земной поверхности и категорий ответственности проектируемых инженерных сооружений.

Выводы

1. Оценка опасности воздействия карстовых пустот на земную поверхность заключается в определении возможности и уровня деформирования земной поверхности, вызванного выходом на поверхность воронок обрушения или плавным проседанием.
2. Сдвигение налегающей толщи от карстовых пустот происходит по законам, определяющим сдвигение от подземных горных выработок, с учетом высокой тектонической нарушенности, обводненности и современной геодинамической активности.
3. Опасность карстопроявлений на земной поверхности определяется параметрами карстовой полости, глубиной ее залегания, степенью заполнения дисперсным материалом и взаимным расположением с геодинамически активными нарушениями.

При отсутствии геодинамически активных нарушений в налегающей

толще пород земная поверхность не претерпит опасных деформаций если:

$$H_3 > 55l_3f^{-1,3}$$

При наличии геодинамически активных тектонических нарушений на земной поверхности не образуется провала, но развиваются плавные деформации, требующие специальных мер по обеспечению безопасности объектов, если:

$$H_3S/(V-V_{дисп}) > K, \text{ где}$$

H_3 – глубина залегания карста;

l_3 – эквивалентный пролет полости;

S – площадь карста в плане;

V – объем карста;

$V_{дисп}$ – объем дисперсного заполнителя;

f – крепость пород по М.М. Протодьяконову;

K – коэффициент, определяемый по остаточному разрыхлению обрушенных пород.

4. Диагностика опасности карстопроявлений, наряду с изучением традиционно учитываемых факторов (параметров карстовой полости, условий залегания, степени заполнения, свойств пород), требует проведения исследований структурной нарушенности пород тектонического нарушения, определяемой коэффициентом добротности метода спектрального сейсмозондирования, и параметров современных геодинамических движений методами спутниковой геодезии, комплекс которых позволяет оценить уровень тиксотропии в породах и возможность развития процесса обрушения над карстовой полостью.

5. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПРОВЕРКА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Исследования процесса карстопроявлений и разработка мероприятий по обеспечению безопасности газопровода «Бухара-Урал» на Красногорском участке

Представленная выше методика была опробована на многих объектах Урала и Сибири. Наиболее значимые объекты, сформировавшие представление о геомеханической модели карстоопасного участка представлены в настоящей главе.

Первые шаги по изучению карста были сделаны на Красногорском участке газопровода «Бухара-Урал» в Челябинской области [44, 70]. Проблема заключалась в образовании воронок обрушения, захватывающих нитки газопровода и ведущие к его оголению (рис. 5.1). Задача заключалась в определении причин активизации карстовых процессов на участке, оценке возможности их развития и негативного влияния на газопровод.



Рисунок 5.1 – Карстовые провалы на Красногорском участке газопровода

На участке 1924.5 км газопровода Бухара-Урал, расположенном на Северо-западе от поселка Красногорский Челябинской области, в 2000 году

произошло образование серии воронок карстового происхождения, в том числе две воронки образовались непосредственно под третьей ниткой газопровода и вскрыли трубу. Образование карстовых воронок под магистральным газопроводом создает нештатные нагрузки на трубопровод, которые могут вызвать нарушение целостности трубы с аварийными последствиями.

Участок газопровода находится на водораздельном плато реки Сухарыш с запада, реки Увельки с юга и бассейна озера Большой Сарыкуль с северо-востока. В тектоническом отношении участок относится к Восточно-Уральскому поднятию, примыкающему к западному крылу Восточно-Приуральского прогиба. Слагающие породы разбиты на блоки многочисленными тектоническими нарушениями.

На рассматриваемом участке породами коренной основы являются известняки нижнего карбона. На водораздельном плато залегают трещиноватые закарстованные разновидности известняков с хорошей проницаемостью.

Таким образом, вся территория на участке проложения газопровода в рассматриваемом районе в целом имеет склонность к карстообразованию, проявляющуюся в рельефе локальными впадинами. Однако на рассматриваемом участке газопровода интенсивность образования воронок носит аномальный характер. Первая серия воронок образовалась в 2000 г. и была ликвидирована путем засыпки глинистыми породами. Весной 2002 г. образовались новые воронки, и возобновился процесс проседания на старых засыпанных воронках.

Интенсивное развитие карстовых воронок и возникшая угроза нарушения целостности магистрального газопровода инициировали проведение специальных изыскательских и научно-исследовательских работ.

Особенности геологического строения исследуемого участка, а также параметры гидрогеологического режима, обусловленного природными факторами и работой подземного водозабора, определяют высокую

степень вероятности развития карстовых пустот в массиве горных пород на выделенном потенциально опасном участке, пересекающем третью нитку газопровода.

В соответствии со сформировавшимся на тот момент времени (2001-2002гг.) представлениями о механизме развития процессов карстообразования и основных параметрах горного массива, участвующих в их активизации, для определения скорости развития карста на аварийном участке и решения задачи безопасной эксплуатации газопровода были проведены детальные исследования карстоопасного участка методами электроразведки в вариантах вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и срединного градиента (МСГ).

В результате проведенных исследований были получены геоэлектрические разрезы по участку и определена площадь распространения карстующихся пород (рис. 5.2, 5.3). Из рисунка 5.3 также хорошо видна ярко выраженная направленность распространения карста, связанная с тектоническим строением массива, выявленным по данным мелкомасштабной съемки методом срединного градиента. На основании полученных данных была построена граница зоны опасных деформаций, впоследствии огороженная, для исключения несанкционированного попадания в нее местного населения и транспорта.

Для определения скорости развития процессов карстообразования в 2002 году были проведены повторные исследования по тем же профильным линиям с точной привязкой.

В результате был получен прирост опасной зоны, отраженный на рис.5.4. При этом следует отметить о возникших новых воронках обрушения, оказавшихся в пределах зоны опасных деформаций, оконтуренных в 2001 г.

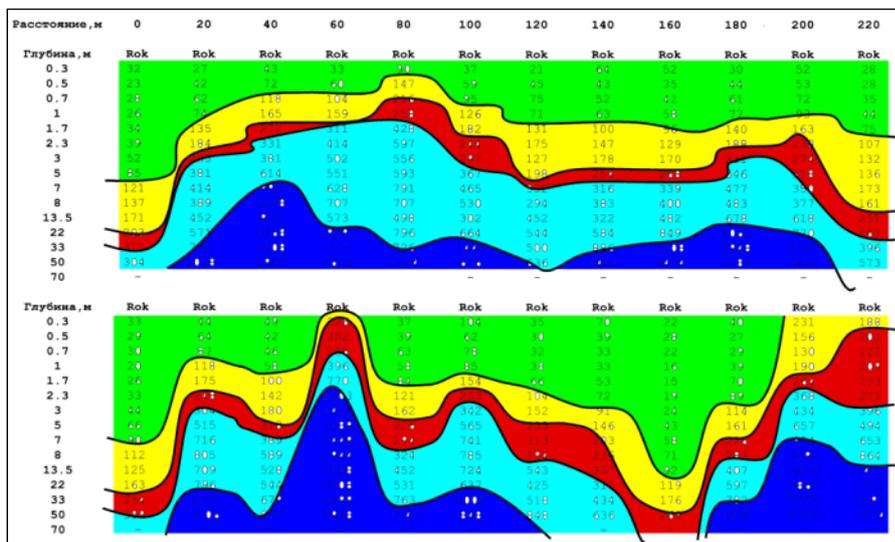


Рисунок 5.2 – Геоэлектрические разрезы по профилям

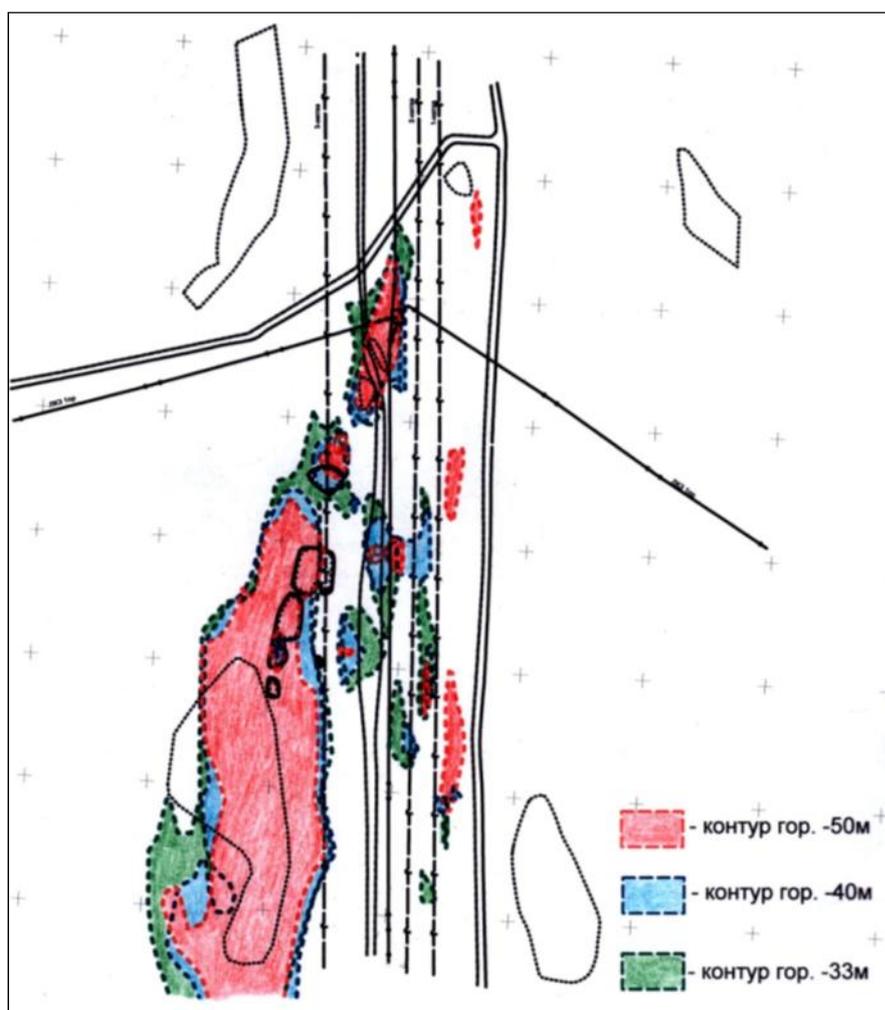


Рисунок 5.3 – Геоэлектрическая модель карстоопасного участка по горизонтам

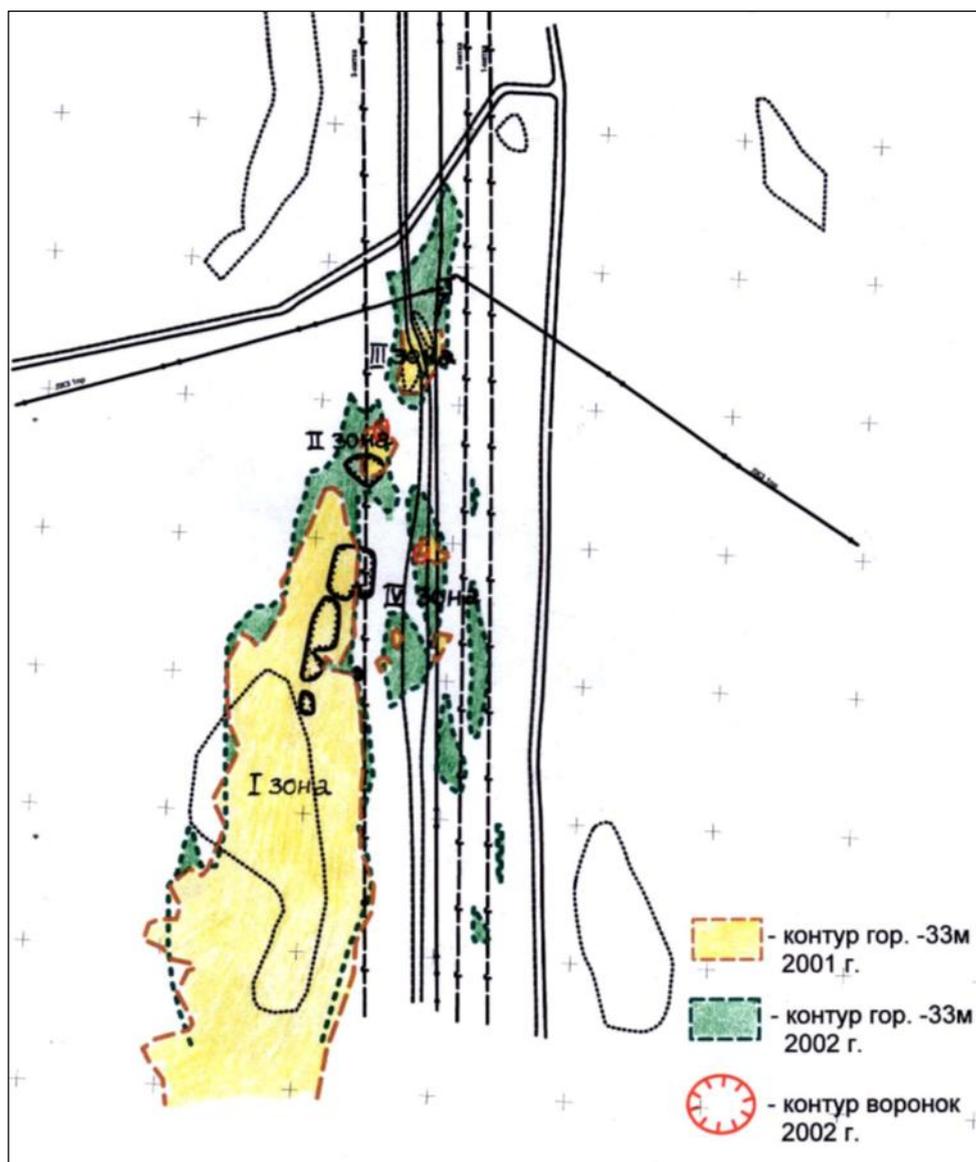


Рисунок 5.4 – Развитие зоны опасных деформаций по данным электрометрии

Процесс карстообразования на исследуемом участке может развиваться в различных формах. В разломной зоне, сложенной рыхлыми песчано-глинистыми разновидностями пород, наиболее активно вынос материала и образования пустот будет приурочено к их контактам с известняками, где концентрируются потоки подземных вод. Этот факт подтверждается расположением образовавшихся провалов, западные границы которых хорошо коррелируют с контактами разломной зоны.

Выщелачиванию будут подвержены также и сами известняки, характеризующиеся достаточно развитой трещиноватостью. Естественно, что в известняках процесс карстообразования будет более растянут во времени.

В целом, спрогнозировать время образования карстов и выхода провалов на поверхность с приемлемой для практических целей надежностью не представляется возможным, но границы вероятной зоны карстообразования очерчиваются на основе проведенных исследований достаточно надежно.

При решении проблемы обеспечения безопасности газопровода, поставленной перед работой, целесообразно было исходить из условия, что в очерченной карстоопасной зоне карстовые провалы на поверхности неизбежны, в том числе существует вероятность возникновения их непосредственно под газопроводом с вскрытием трубы в образовавшейся воронке. Опасность образования провалов непосредственно под трубой зависит от образующегося пролета вскрытой трубы. С этой точки зрения представлялось необходимым оценить параметры возможных провалов и, главным образом, их размеры в плане, определяющие вскрываемые пролеты и, следовательно, возникающие при этом дополнительные нагрузки.

Прогнозная оценка основывалась на установленной взаимосвязи предельных параметров плоских и сводообразных обнажений массива горных пород, при которых происходит развитие процесса самообрушения и образования провала на поверхности, с прочностными характеристиками пород залегающей толщи и глубиной залегания образовавшихся пустот. То есть, для каждого вида пород существует предельная площадь обнажения образующихся полостей, определяющая, соответственно, предельный пролет вскрытия газопровода.

Расчеты производились для следующих условий:

Породы:

- рыхлые песчано-глинистые отложения с крепостью по шкале

Протодряконову менее 1;

- трещиноватые известняки с крепостью $3 \div 5$;

- достаточно устойчивые известняки с крепостью до 8.

Глубины:

- в верхней сдренированной части породного массива при глубине 15 м;

- в обводненной части массива на контакте с уровнем подземных вод в установившейся депрессионной воронке при средней глубине 30 м.

Методика оценки устойчивости обнажений основывалась на понятии "эквивалентных пролетов", которая, как это подтверждается многими исследованиями, является наиболее приемлемой для обнажений произвольной формы. Расчетная схема для карста произвольной формы приведена на рис.5.5.

Метод "эквивалентных пролетов" заключается в оценке устойчивости обнажений произвольной формы по величине эквивалентного по устойчивости пролета выработки постоянной ширины и неограниченной большой длины. Для обнажения, в котором длина по простиранию меньше двукратной величины проекции обнажения на горизонтальную плоскость, значение эквивалентного пролета определяется из формулы:

$$l_{\text{экв}} = \frac{nL}{\sqrt{n^2 + L^2}}, \quad (5.1)$$

Критерием устойчивости обнажения является неравенство

$$l_{\text{экв}} \leq l_0, \quad (5.2)$$

где l_0 – предельный пролет выработки или пустоты большой длины, найденный экспериментальным путем.

На рис. 5.6 приведены зависимости между отношением $l_0/H_{\text{ср}}$ и коэффициентом крепости пород по Протоdjяконову. Пользуясь приведенными зависимостями и выражениями (5.1) и (5.2) произведены расчеты параметров предельных обнажений для указанных выше типов пород и глубины залегания образовавшихся карстов.

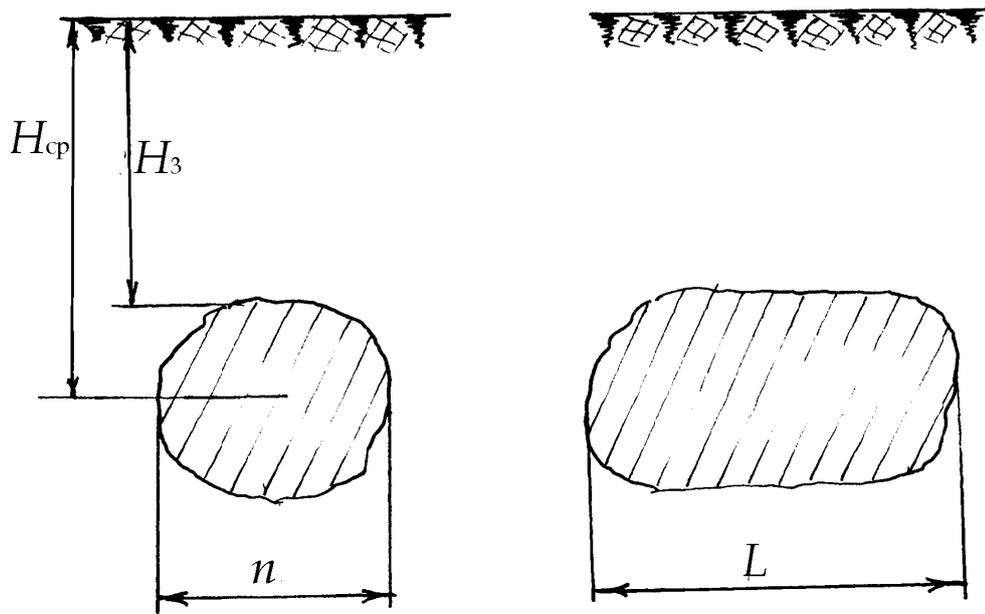


Рисунок 5.5 – Схема к расчету предельных параметров обнажения карстовых пустот

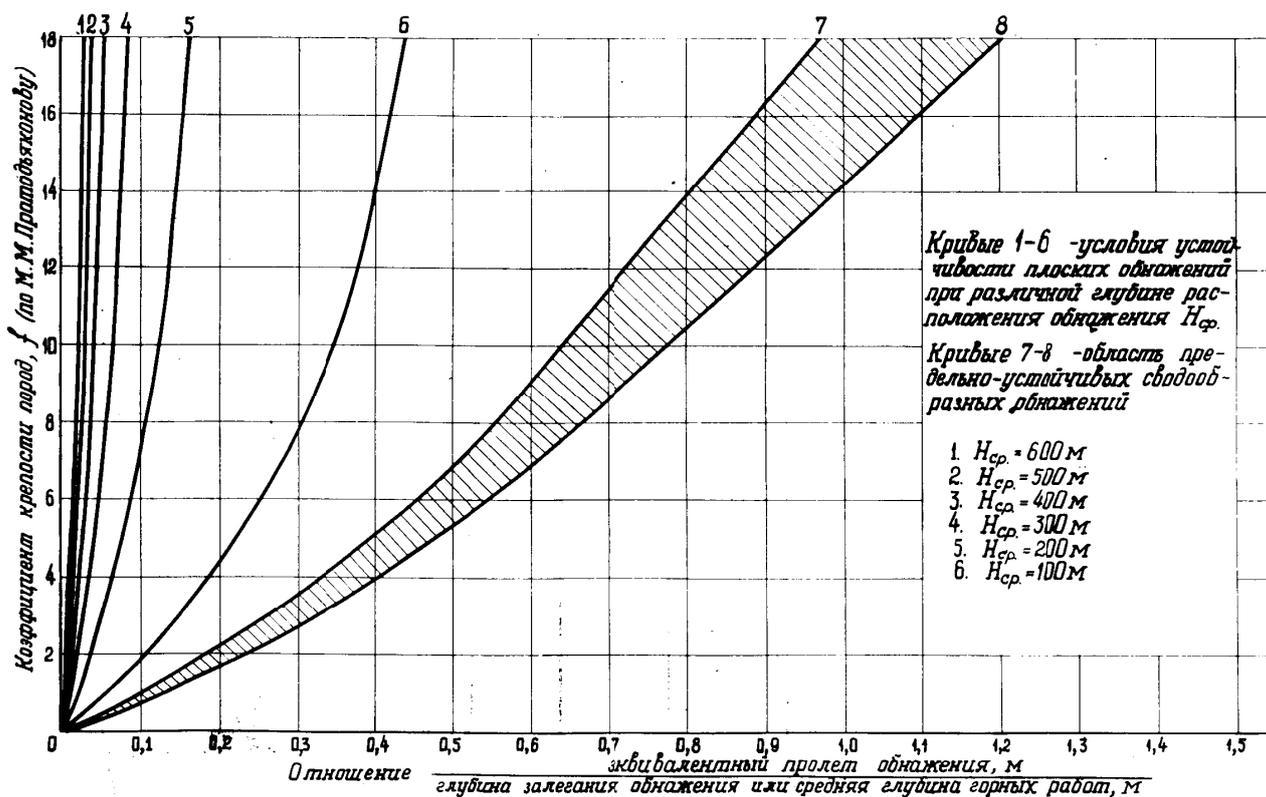


Рисунок 5.6. – Условия устойчивости обнажений массива горных пород

Результаты расчетов приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Вид пород	Коэффициент крепости, f	Средняя глубина Н _{ср} , м	l ₀ /Н _{ср}	n, м	n', м
<i>Плоское обнажение</i>					
Рыхлые грунты	1	15	0,05	1,1	3,7
		30	0,05	2,1	7,4
Выветрелые известняки	3 ÷ 5	15	0,23	4,9	7,5
		30	0,23	9,9	15,1
Скальные известняки	8	15	0,30	6,4	9,0
		30	0,30	12,9	18,1
<i>Сводообразное обнажение</i>					
Рыхлые грунты	1	15	0,1	2,1	4,7
		30	0,1	4,3	9,5
Выветрелые известняки	3 ÷ 5	15	0,46	9,9	12,1
		30	0,46	19,7	25,0
Скальные известняки	8	15	0,60	12,9	15,5
		30	0,60	25,7	31,1

В последней графе таблицы приведены значения максимально возможного пролета воронки обрушения по поверхности. Они определяются предельным пролетом обнажения и расширением воронки обрушения под углом обрушения, равным 85°.

Как следует из таблицы в наиболее вероятной зоне воронкообразования, представленной рыхлыми отложениями, максимальный пролет обнажения трубы газопровода составит от 4,7 до 9,5 м. В выветрелых известняках, где вероятность проявления карстовых провалов невелика, максимальный пролет воронки обрушения по поверхности составит от 12,1 до 25 м. И, наконец, в крепких известняках, где самая низкая вероятность развития провальных явлений, максимальный пролет воронки составит от 15,5 до 31 м.

При выходе карстовых провалов на поверхность к трубе газопровода, оказавшегося над провалом, прилагается комплекс дополнительных нагрузок, которые при определенных параметрах могут вызвать ее разрушение. После достижения процесса обрушения дна траншеи, в которой уложен газопровод, труба в первую очередь теряет опору на пролете I. Какое-то время на ней может задержаться засыпной грунт, отделяющий ее от земной поверхности, создавая распределенную нагрузку вдоль пролета трубы. В качестве нагрузки также возникает вес самой трубы, ранее передававшийся на грунт. В этот период ее схематично можно рассматривать как балку, заделанную или опертую на породный массив на краях воронки обрушения, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой собственного веса и засыпного грунта.

В действительности процесс образования карстовой воронки наиболее вероятен растянутым хотя бы в небольшом промежутке времени, в течение которого засыпной грунт частично или полностью осыплется и труба в значительной мере освободится от этой нагрузки. Однако в оценочной расчетной схеме, отдавая приоритет надежности оценок и безопасности последствий принимаемых решений, выбран маловероятный, но в исключительных случаях возможный вариант, когда труба теряет опору на всем протяжении образовавшейся воронки, опирается на края воронки и, работая как балка, несет на себе распределенную нагрузку от собственного веса и веса засыпного грунта.

Принципиальное значение для расчетов играют условия закрепления трубы на опоре. В зависимости от вида и состояния грунтов, в которых уложена труба, могут иметь три вида заделки:

труба закреплена на обеих опорах;

труба закреплена на одной опоре и свободно оперта на другой;

труба свободно оперта с обеих сторон.

Для полноты охвата всего спектра возможных нагрузок и усилий, возникающих в трубе, расчеты проводились для всех трех вариантов закрепления трубы на опорах.

Принципиальная схема расчета представлена на рис. 5.7. Труба газопровода пролетом l в момент образования провала представляет собой балку трубчатого сечения, закрепленную на краях пролета, нагруженную собственным весом и весом засыпного грунта.

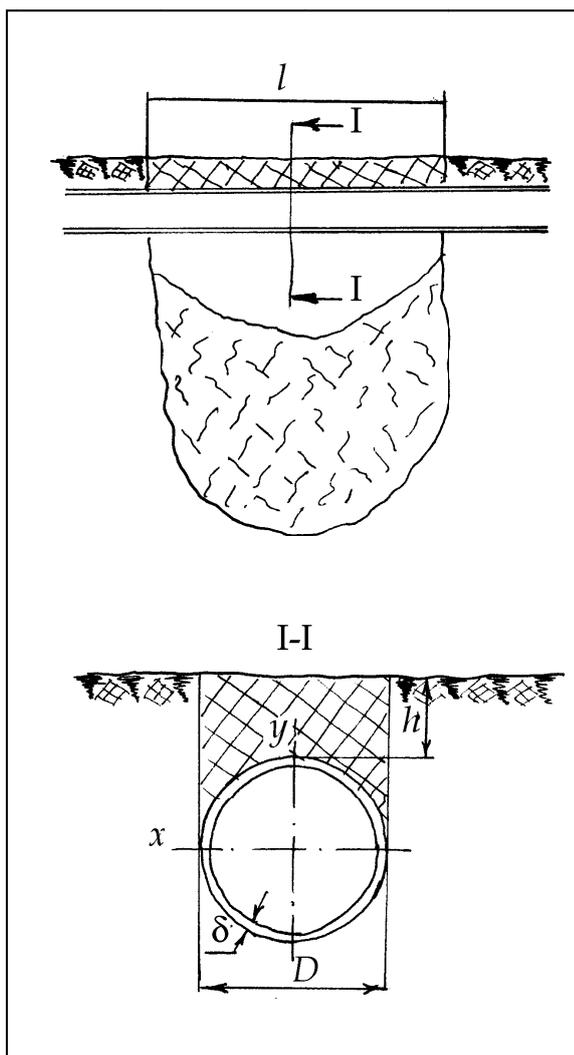


Рисунок 5.7 – Расчетная схема нагружения трубы газопровода в процессе образования карстового провала

На рис. 5.8 представлены схематично приведенные выше три варианта закрепления балки на опорах, приведены эпюры и максимальные значения изгибающих моментов, вызванных приложенными нагрузками.

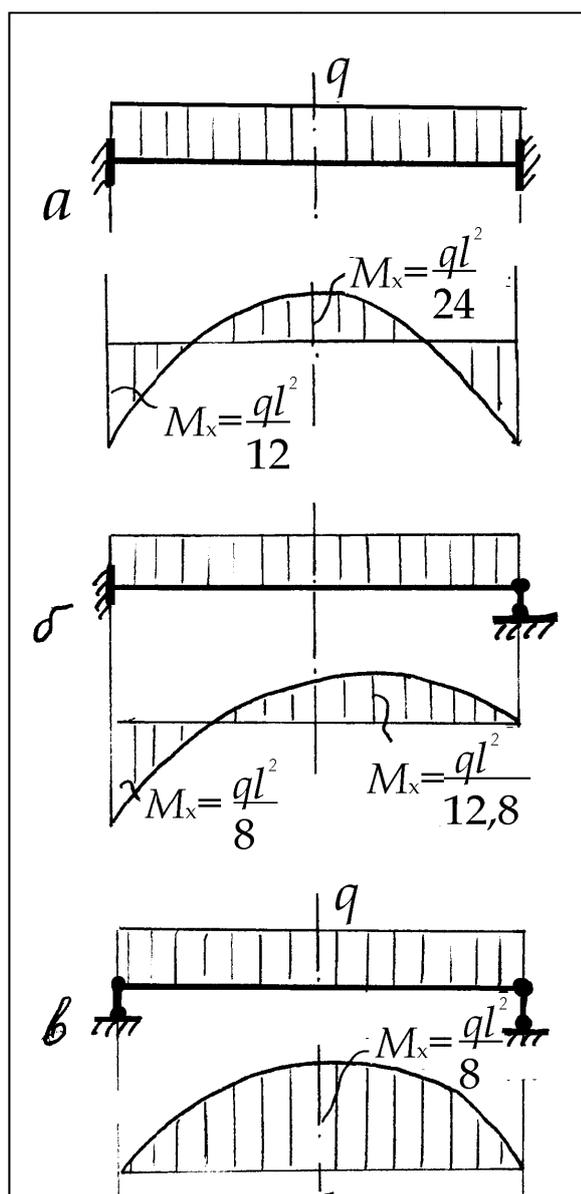


Рисунок 5.8 – Эпюры распределения изгибающих моментов в пролете трубы:

а – заземленной на обеих опорах; б – заземленной на одной опоре и свободно опертой на другой; в – свободно опертой с обеих сторон.

В расчетах приняты следующие значения исходных данных:

1. Площадь сечения трубы $S = \pi D \delta = 1147 \text{ см}^2$.
2. Момент инерции $J_x = J_y = \pi D^3 \delta / 8 = 2,8 \cdot 10^6 \text{ см}^4$
3. Момент сопротивления $W_x = W_y = \pi D^2 \delta / 4 = 3,95 \cdot 10^6 \text{ см}^3$
4. Предел прочности стали труб $\sigma = 2100 \text{ кг/см}^2$.
5. Модуль упругости стали труб $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$.
6. Плотность грунта $\gamma_r = 1,5 \text{ т/м}^3$.

7. Плотность металла $\gamma_m=7,8 \text{ т/м}^3$.
8. Вес 1 пог. м трубы $P_1=870 \text{ кг/м}$.
9. Вес засыпного грунта на 1 пог.м $P_2=2130 \text{ кг/м}$.
10. Распределенная нагрузка на 1 пог.м
 $P_1 + P_2 = 3000 \text{ кг/м}$.

Максимальное значение напряжений, возникающих в трубе под действием рассматриваемых нагрузок, определяется из формулы:

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x} \quad (5.3)$$

Преобразование этого выражения относительно пролета l дает следующие выражения для каждого из рассматриваемых вариантов:

Защемление на обеих опорах

$$l = \sqrt{\frac{12\sigma W_x}{q}} = 5765 \text{ см или } 57,5 \text{ м}$$

Защемление на одной опоре и свободная опора на другой

$$l = \sqrt{\frac{8\sigma W_x}{q}} = 4707 \text{ см или } 47,1 \text{ м}$$

Свободная опора с обеих сторон

$$l = \sqrt{\frac{8\sigma W_x}{q}} = 4707 \text{ см или } 47,1 \text{ м}$$

Таким образом, при самых неблагоприятных условиях нагружения труба газопровода способна сохранять устойчивость при пролетах провалов от 47 до 57 м.

В сопоставлении с предельными параметрами воронок обрушения, приведенными в таблице 5.1, газопровод обладает следующими коэффициентами запаса:

- в рыхлых грунтах от 5 до 10;
- в выветрелых известняках от 1,9 до 3,9;
- в скальных известняках от 1,5 до 3,1.

Следовательно, на исследуемом участке образование карстовых провалов не может вызвать разрушения газопровода.

5.2 Исследование и прогноз процесса карстопроявлений под подъездной дорогой Высокогорского ГОКа

В конце июля 2004 г. на юго-западном борту Главного карьера и прилегающей территории земной поверхности в районе железнодорожного поста № 12 визуально были обнаружены деформации земной поверхности (рис. 5.9) [93].



Рисунок 5.9 – Развитие процесса сдвижения в районе 12 поста Главного карьера.

Деформированный участок играет важную роль в технологическом комплексе ГОКа. Во-первых, по нему проходят две нити железнодорожных путей со стрелочными переводами, по которым на обогатительную фабрику доставляется руда с ш. Естюнинской, а на аглофабрику – известняк из Гальяновского карьера. Железнодорожные пути проходят по прибортовой территории на отметках 225 – 226 м.

Во-вторых, по берме 160 м в карьере проложен пульпопровод, по которому хвосты МОФ подаются в Главный карьер.

Таким образом, развитие деформаций может привести к нарушению и выходу из строя этих двух важнейших технологических объектов, определяющих нормальную работу значительной части технологического комплекса.

Первоначально в качестве одной из наиболее вероятных версий процесса деформирования рассматривался оползень верхней части борта карьера.

Однако визуальный осмотр деформированного участка и анализ результатов инструментальных наблюдений показали, что механизм деформирования на аварийном участке в большей мере идентифицируется с типичным развитием процесса сдвижения над подземными пустотами.

Происхождение пустот в этом районе могло быть обусловлено его сложным тектоническим строением, вызванным примыканием взбросо-сдвига Среднего к сбросо-сдвигу Главному, современной геодинамической активностью этих двух основных тектонических нарушений и наличием нарушенных закарстованных известняков. Пустоты могли возникнуть в результате длительного выноса мелкодисперсного заполнителя одного из карстов в результате нарушения гидрогеологического режима с углублением Главного карьера. В качестве иницирующего фактора могла выступать система подземных выработок ш. Мартитовой, пройденных в борту карьера в 40-е годы прошлого столетия.

Достоверность версии развития мульды сдвижения над подземными пустотами подтвердилась результатами маркшейдерских наблюдений за развитием деформаций.

Выдвинутая версия принципиально меняла подход к выработке мер охраны железнодорожных путей и пульпопровода и требовала проведения комплекса исследований с решением следующих задач:

- установить происхождение пустот в борту карьера и в прибортовом массиве;
- очертить границы распределения пустот в плане и по глубине;
- выявить стадию развития процесса сдвижения;
- произвести прогнозные оценки дальнейшего развития процесса сдвижения;
- разработать мероприятия по обеспечению безопасной эксплуатации железнодорожных путей и пульпопровода.

Изучаемый горный массив представлен (снизу вверх) следующими литологическими разностями:

1. Известняки Высокогорской полосы. В исследуемом массиве являются частью ксенолита известняков с глубиной кровли 120-150 м от поверхности. В низах разреза они темно-серые, битуминозные, часто глинистые, в средней части белые и светло-серые, массивные, в верхах – белые, розоватые, часто брекчиевидные.

Непосредственно вблизи от исследуемого участка известняки вскрыты Главным карьером и шахтой Мартитовой. Основной инженерно-геологической характеристикой известняков исследуемого массива является высокая степень закарстованности, особенно на контакте с перекрывающими их сиенитами. Мощность известняков Высокогорской полосы на месторождении достигает 250м.

2. Сверху известняки на исследуемом участке перекрыты сиенитами. Сиениты на участке по данным бурения выветрелые, на глубине 30 м до полускального состояния. Отмечаются участки повышенного содержания слюды, локальные зоны с незначительным содержанием маршита и магнетита. Наблюдаются тектонические зоны, отмечаемые при бурении провалом инструмента и представленные глиной и дресвяно-глинистым материалом.

Элювиированные сиениты в водонасыщенном состоянии становятся структурно-неустойчивыми и приобретают свойства пльвунов. При

проходке шахты Мартитовой и штольни из Главного карьера к этой шахте, плывунные свойства элювиированных сиенитов вызвали заплывание и обвалы выработок. Явление имело такой масштабный характер развития, что проходка шахты была прекращена.

По тектоническим зонам и трещинам сиениты исследуемого массива обводнены с 7 м.

На участке борта Главного карьера, ограничивающего изучаемую территорию с юго-востока, на 10 м ниже края наблюдается промоина, из которой в теплое время года отмечаются периодические изливы подземных вод.

3. Верхняя часть разреза исследуемого массива до глубины 7 м представлена элювием выветрелого до дресвяно-глинистого состояния сиенита.

Известняки в данном месте характеризуются интенсивным развитием карста, особенно на их контакте с сиенитами. Карстовые явления представлены полостями, как полыми, так и заполненными. В Главном карьере на горизонте +150 м вскрыты карстовые каналы диаметром 0,4 м и ряд карстовых полостей, глубиной несколько десятков метров, заполненных песчано-глинистым материалом.

Очень показательно, что именно в мартитовой зоне, расположенной в узле сопряжений тектонических трещин, где глубокая и интенсивная циркуляция подземных вод превратила устойчивый к выветриванию магнетит в мартит, карстовые проявления наиболее интенсивны.

В целом по месторождению карст на глубину прослеживается до абсолютной отметки 0 м. Ниже, горными выработками и разведочными скважинами, он не встречен.

По данным разведочного бурения и наблюдениям в горных выработках, карстовые процессы генетически и пространственно напрямую связаны с тектоническими нарушениями. Тектонические нарушения в известняках, как правило, сопровождаются карстом.

В целом, тектоническая обстановка на Высокогорском месторождении определяется сбросо-сдвигом Главным, протянувшимся с юго-запада на северо-восток и имеющим падение на юго-восток под углом $74-82^{\circ}$, и взбросо-сдвигом Средним, имеющим северо-восточное простирание и юго-восточное падение под углом $60-80^{\circ}$. В пределах рудного поля, кроме упомянутых выше крупных нарушений, зафиксировано значительное количество средних и мелких нарушений северо-западного простирания с падением на юго-восток под углами $65-85^{\circ}$ и сместители северо-северо-восточного простирания с падением на восток под углами $85-90^{\circ}$.

Большинство тектонических нарушений в сиенитах сопровождается зоной дробления мощностью $0,3-1,0$ м заполненных в одних случаях раздробленной породой или брекчией трения, или же перетертым материалом с тектонической глиной, в других – притертой поверхностью со следами скольжения.

Тектонические нарушения, развитые на участках известняков, нередко бывают осложнены ответвлениями и сопровождаются интенсивным развитием

трещиноватости, зонами дробления и значительным развитием карстовых явлений.

Тектоническая ситуация деформируемого участка определяется тремя разломами субширотного простирания. Эти разломы являются сместителями II порядка B_4 , B_5 , B_6 . Все они имеют падение на юг под углами $B_4 - 68^{\circ}$, $B_5 - 72^{\circ}$, $B_6 - 88^{\circ}$, соответственно (рис. 5.10). В горных выработках сместители II порядка наблюдаются в виде трещин, мощностью несколько сантиметров, выполненных глиной трения. Иногда они сопровождаются зонами дробления. Мощность этих зон достигает 13 м.

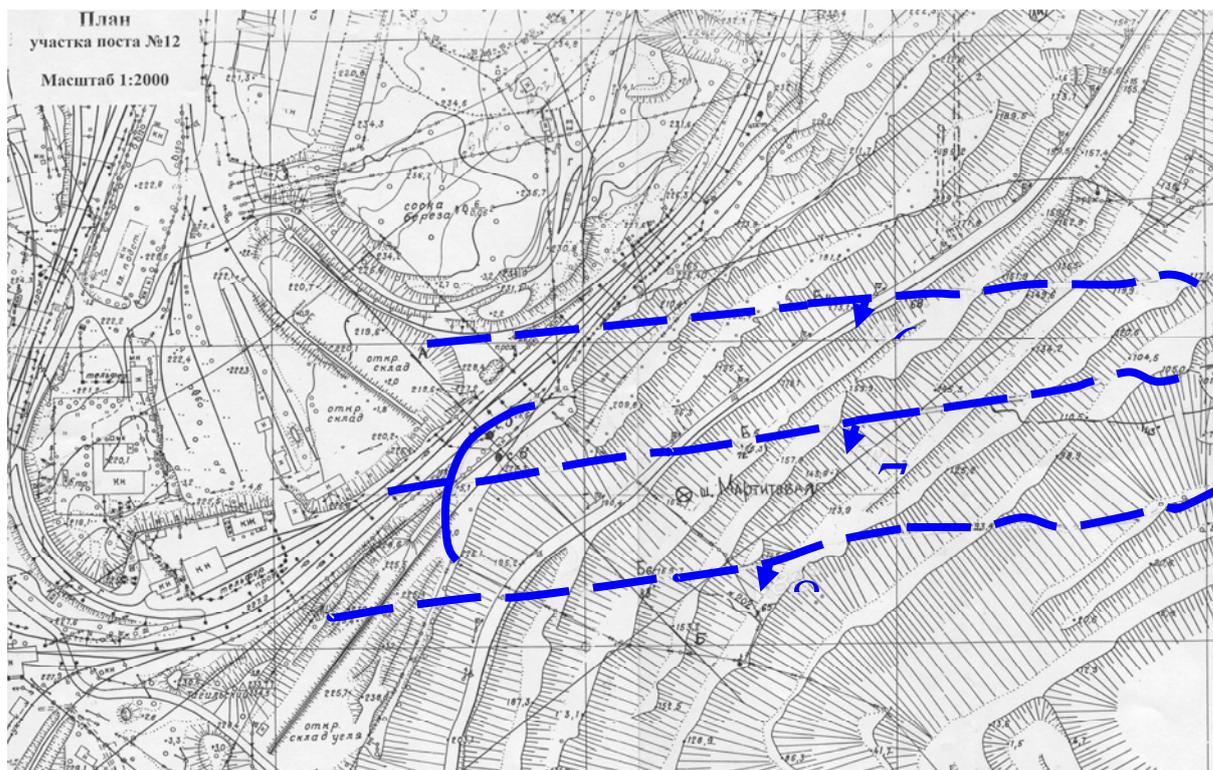


Рисунок 5.10. – Тектоническая схема участка железнодорожного поста №12

В гидрогеологическом отношении район приурочен к открытой геологической структуре с преобладающим развитием безнапорных вод. Он входит в состав зоны грунтовых вод трещиноватости палеозойских пород.

Водовмещающими породами являются известняки. Это наиболее водообильные породы изучаемого массива. При этом водообильность известняков отличается значительной неравномерностью. Водообильность определяется степенью трещиноватости, наличием зон тектонических нарушений и закарстованностью известняков.

В мартитовой зоне Главного карьера, где расположен исследуемый, деформируемый массив, по данным опытных откачек на участках крупных тектонических нарушений и развития карста значения коэффициента фильтрации изменяются от 1 до 60 м/сут. Приведенные коэффициенты фильтрации характеризуют, в основном, верхнюю толщу известняков до глубины порядка 200 м [94]. По химическому составу воды гидрокарбонатные кальциево-магниевые-натриевые.

В настоящее время естественный режим подземных вод рудного поля резко нарушен вследствие дренажных мероприятий. Несмотря на то, что изучаемый участок расположен в зоне влияния депрессионной воронки, по данным бурения уровень подземных вод определен на глубине 7-10 м.

В соответствии с рабочей версией, сформулированной на основе маркшейдерских наблюдений и предполагающей, что причиной проявления деформаций на участке железнодорожного поста №12 является развитие процесса сдвижения над подземными пустотами, для решения проблемы обеспечения безопасности железнодорожных путей и пульпопровода необходимо:

- установить границы области деформирования массива горных пород в плане и по глубине;
- произвести диагностику массива горных пород на наличие в нем пустот.

Эти задачи были возложены на геофизические методы спектрального сейсмопрофилирования (ССП) и георадарного зондирования (ГРЗ). Исследования производились зондированием массива горных пород с поверхности по профильным линиям, равномерно покрывающим деформируемый участок и прилегающие к нему зоны.

Направление профилей зондирования было выбрано в соответствии с рельефом местности [95]. Половина исследуемой территории представлена бортом карьера, вторая половина – прибортовая площадка земной поверхности, пересеченная железнодорожными путями и автомобильными дорогами, проложенными вдоль борта карьера. Направление берм карьера и транспортных коммуникаций и предопределили расположение профильных линий. На борту они располагались на бермах, а на земной поверхности вдоль дорог. Поперечные были только две профильные линии (рис.5.11).

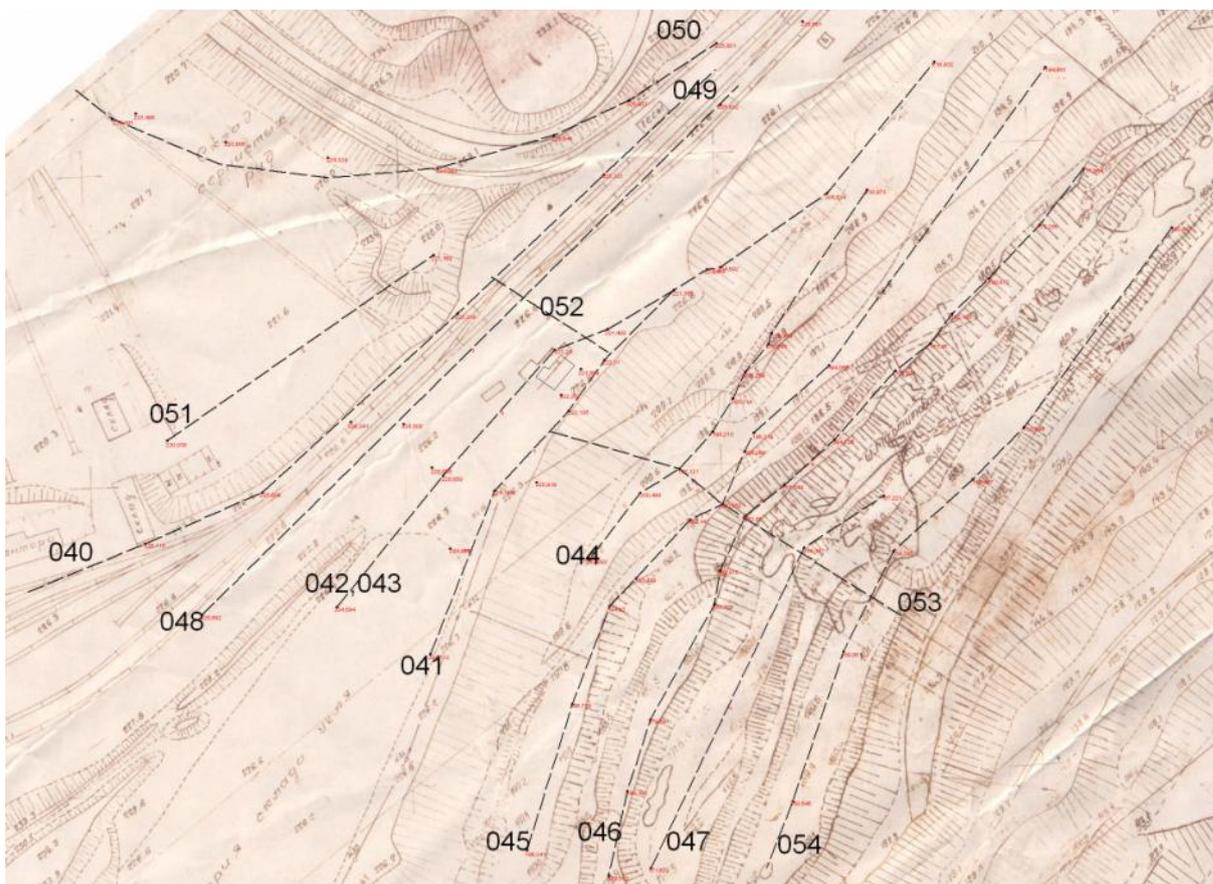


Рисунок 5.11. – Схема расположения профильных линий

Зондирование на профильных линиях производилось с шагом 2 м, 2.5 м и 5 м. Это обеспечивало высокую детальность построения разрезов. Для обеспечения надежности данных о строении массива горных пород зондирование дублировалось методом ССП и ГРЗ по одним и тем же профильным линиям и точкам зондирования. Глубина зондирования составила 150 м для ССП и 25-50 м для ГРЗ.

Особое внимание при проведении полевых работ уделялось координированию точек зондирования в плане и по высоте. Положение каждой точки зондирования в пространстве определялось с сантиметровой точностью.

Пример получаемых при зондировании разрезов приведен на рис. 5.12-5.13.

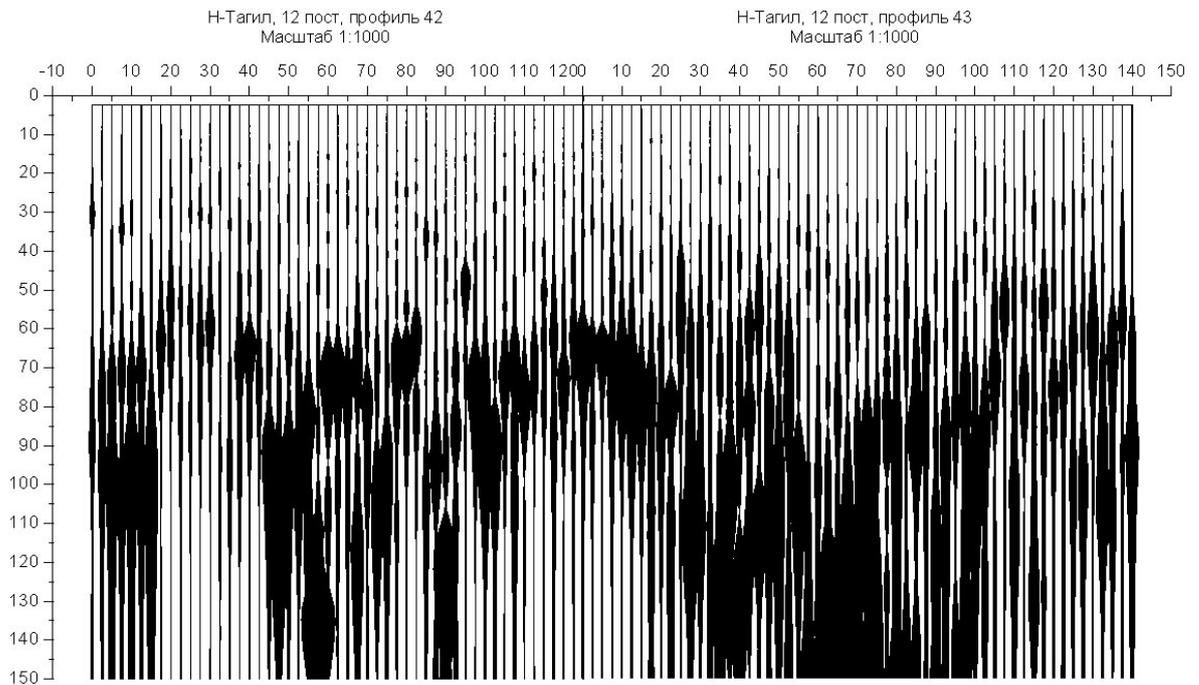


Рисунок 5.12. – Спектральный сейсморазрез по профилю 42-43

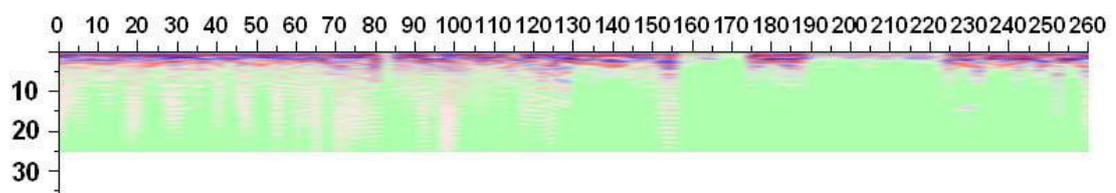


Рисунок 5.13. – Георадарный разрез по профилю 42-43

В результате проведенных исследований были получены глубины залегания карстовых полостей относительно профильных линий (табл. 5.2) и построена геомеханическая модель участка, определены параметры карстовых пустот, причины активизации карста и даны рекомендации по безопасной эксплуатации инженерных сооружений. Полученные результаты приведены ниже.

Таблица 5.2 Высотные отметки кровли карстовых зон

№ профиль-ной линии	Высотная отметка земной поверхности или бермы карьера, м	Глубина от поверхности до верхней границы кровли карстовой зоны, м	Высотная отметка кровли карстовых зон, м
54	160	40-50	120-110
47	170	50-60	120-110
46	180	55-70	125-110
45	195	50-60	135-110
44	200	50-70	150-130
41	222	50-60	172-162
42/43	222	60-70	162-152
48	225	70-80	155-145
40/49	225	30-50	195-175
51	221	40-50	181-171
50	224	40-50	184-174

В период до июля 2004 года на участке 12 поста шел период накопления пустот в карстах, обусловленный вымывном заполнителя. К июлю месяцу параметры пустот достигли значений, при которых процесс сдвижения достиг земной поверхности. Исходя из глубины залегания кровли карстовых зон, их размеров и места выхода зоны обрушения на земную поверхность можно сделать следующие оценки:

- у восточной карстовой зоны верхняя часть от профиля 044 до 051 была представлена пустотой. Размыв её, видимо, происходил с опережением по отношению к западной зоне;

- с июля по 13 сентября процесс сдвижения происходил с постепенным нарастанием скорости. В этот период область обрушения находилась в промежуточной толще, а на поверхности преобладали плавные деформации с образованием отдельных трещин разрыва;

- зона обрушения сформировалась во второй половине сентября над восточной карстовой зоной и с небольшим смещением на породную перемычку между зонами, что, видимо, обусловлено направлением падения тектонических нарушений (рис. 5.10). Над западной зоной прослеживается пока только одиночная трещина. Зона обрушения занимает часть контура карстовых зон, зона плавных деформаций охватывает всю площадь.

В последующем происходил процесс уплотнения пород в зоне обрушения, который сопровождался затухающими оседаниями в зоне обрушения и наращиванием деформаций в зоне плавных сдвижений.

Полному развитию процесса сдвижения может воспрепятствовать подъем уровня хвостов в Главном карьере до отметки 110-120 м.

Предельная граница опасных сдвижений для карстовых зон была отстроена по параметрам, рекомендуемым действующими «Правилами охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана» [72].

В соответствии с пунктом 3.5 для рассматриваемых условий угол сдвижения ϕ рекомендуется принимать равным во всех направлениях 50° . Граница, построенная по этому параметру, обеспечивает безопасность для объектов I категории охраны с допустимыми деформациями растяжения-сжатия $2 \cdot 10^{-3}$, наклона $4 \cdot 10^{-3}$.

Охраняемые объекты на данном участке (подъездные пути МПС и самотечные трубопроводы) в соответствии с таблицами 6 и 8 «Правил...» допускают деформации растяжения-сжатия $7.0 \cdot 10^{-3}$ и наклон $10.0 \cdot 10^{-3}$, что соответствует деформациям на границах зоны трещин, отстраиваемой по углам разрыва 70° .

Прогнозная граница допустимых деформаций для железнодорожных путей и пульпопровода представлена на рис. 5.14.

Проведенный комплекс исследований позволил решить проблему обеспечения безопасной эксплуатации железнодорожных путей в районе поста № 12 и пульпопровода, оказавшихся в области влияния деформаций возникших на земной поверхности и в борту Главного карьера, при этом установлено:

1. Процесс деформирования земной поверхности и борта карьера явился следствием развития процесса сдвижения над подземными пустотами, возникшими в карстовых зонах в результате выноса их заполнителя.

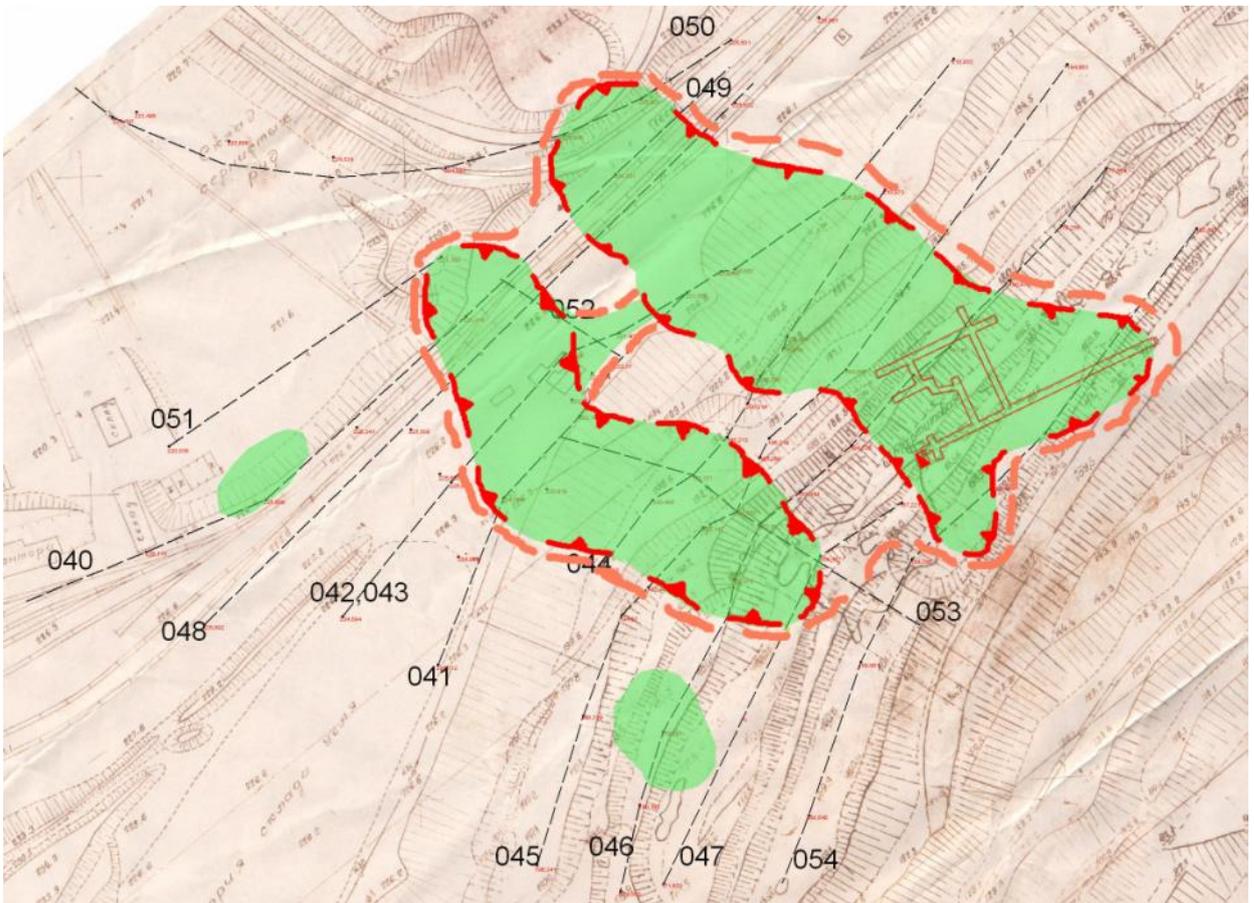


Рисунок 5.14. – Прогнозная граница зоны опасных сдвижений.

2. Геофизическим зондированием массива горных пород оконтурены границы карстовых зон на исследуемом участке в плане и по глубине.

3. Произведен прогноз развития процесса сдвижения над выявленными карстовыми зонами, обоснованы параметры процесса сдвижения и отстроены границы опасных сдвижений на завершающую стадию развития процесса сдвижения.

4. Разработаны меры охраны железнодорожных путей и пульпопровода, предусматривающие:

- для железнодорожных путей два варианта обеспечения их безопасной эксплуатации: оставление их на месте с осуществлением инструментального контроля и периодических восстановительных ремонтов; вынос за пределы прогнозных границ зоны опасных сдвижений;

- для пульпопровода: освобождение его от грунта и прокладка по опорам; проведение инструментального контроля и периодической выправки на опорах по мере достижения предельных деформаций.

5.3 Диагностика опасности карстопроявлений на участке строительства перехода через р. Уфу

Геологический разрез участка строительства моста через реку Уфу, представленный по результатам инженерно-геологических изысканий в береговых примыканиях скальными известняками, обусловил необходимость проведения инженерно-геофизических исследований массива горных пород для оценки опасности карстопроявлений (рис. 5.15) [96].

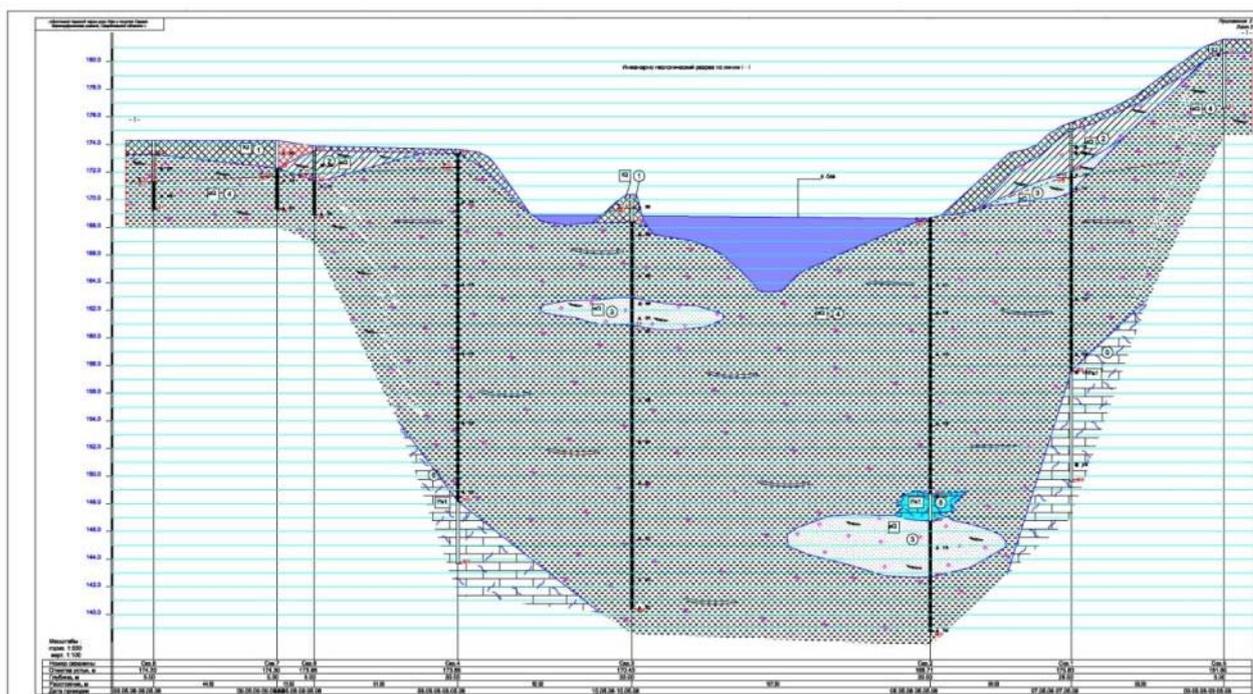


Рисунок 5.15 – Геологический разрез участка строительства мостового перехода

Приуроченность речной долины реки Уфа к тектоническому разлому, идущему вдоль ее русла, способствовало наиболее глубокой проработке русла с формированием мощной зоны рыхлого аллювия разнородного

гранулометрического состава. Поэтому привнесенные речным потоком обломочные породы, сформировавшие русло гравийно-галечниковых отложений неоднородных по составу и содержащих прослойки суглинка, линзы песка, останцы коренных пород, слабоокатанный щебень будут выступать в качестве оснований опор мостового перехода.

В связи с этим, основным вопросом, на который должны были дать ответ инженерно-геофизические исследования, являлось выяснение наличия или отсутствия опасности карстопроявления на участке строительства мостового перехода.

Важное место в ответе на этот вопрос занимают гидрогеологические условия. По результатам предшествующих изысканий в пределах исследуемой площади выделяются следующие типы подземных вод [97]:

- трещинные;
- трещинно-пластовые;
- трещинно-карстовые;
- воды аллювиального аккумулятивного комплекса, сопряженные с водами русла реки.

Все перечисленные типы оказываются гидравлически связанными, и степень влияния на водообильность пород в значительной степени зависит от времени года и приведенных гидрологических параметров реки Уфы.

На момент производства буровых работ в мае 2008 г, скважинами, пройденными до глубины 5,0-30,0 м, установившийся уровень подземных вод зафиксирован на глубине 0,3-0,4 м на абсолютных отметках 168,41-172,36 м. При бурении скважины № 1 на глубине 18,0 м наблюдался усиленный водоприток, который в работе [97] интерпретировался как возможность наличия подземного второго русла реки, тем более что глубже в интервале 21,0-23,5 м имели место провалы инструмента. Вместе с тем, отмеченные явления могут рассматриваться и как разгрузка трещинных напорных вод с береговых откосов в русло реки. Рекомендуемые в работе [97] коэффициенты фильтрации, имеющие достаточно высокие значения, а

именно, для гравийно-галечных грунтов 3,0-20,0 м/сут, для известняков 3,8-30,0 м/сут, способны обеспечить интенсивные локальные подземные потоки, поддерживающие гравийно-галечные грунты и аллювиальные пески во взвешенном состоянии, проявляющемся в виде небольших провалов бурового инструмента.

Для диагностики карстопроявлений на данном участке были проведены работы методами электроразведки (ВЭЗ, срединный градиент), спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования.

Геоэлектрическая модель территории по площадным исследованиям представлена на рис. 5.16. Левый берег реки в центральной части планшета представлен известняками с высокой степенью трещиноватости. Более или менее выдержанная зона известняков отмечается на небольшом участке центральной части. Вниз и вверх по течению через переходные зоны известняки замещаются гравийно-галечниковыми отложениями.

На правом берегу, зона известняков смещена вверх по течению и более четко выражена. Вниз по течению она через переходящую зону переходит в гравийно-галечниковые отложения.

Сопоставление геологического строения правого и левого берегов дает основание предположить, что они смещены друг относительно друга по тектонической зоне, проходящей по руслу реки.

В соответствии, с полученными результатами вертикального электроразведки геологический разрез на левом берегу с поверхности и до глубины 13 м представлен гравийно-песчано-галечниковыми отложениями, имеющими сопротивление в пределах 100-200 Ом. В отдельных местах среди этих отложений встречаются останцы известняков. Далее до глубины 50 м, на которую производилось зондирование, залегают известняки с разной степенью выветрелости и трещиноватости.

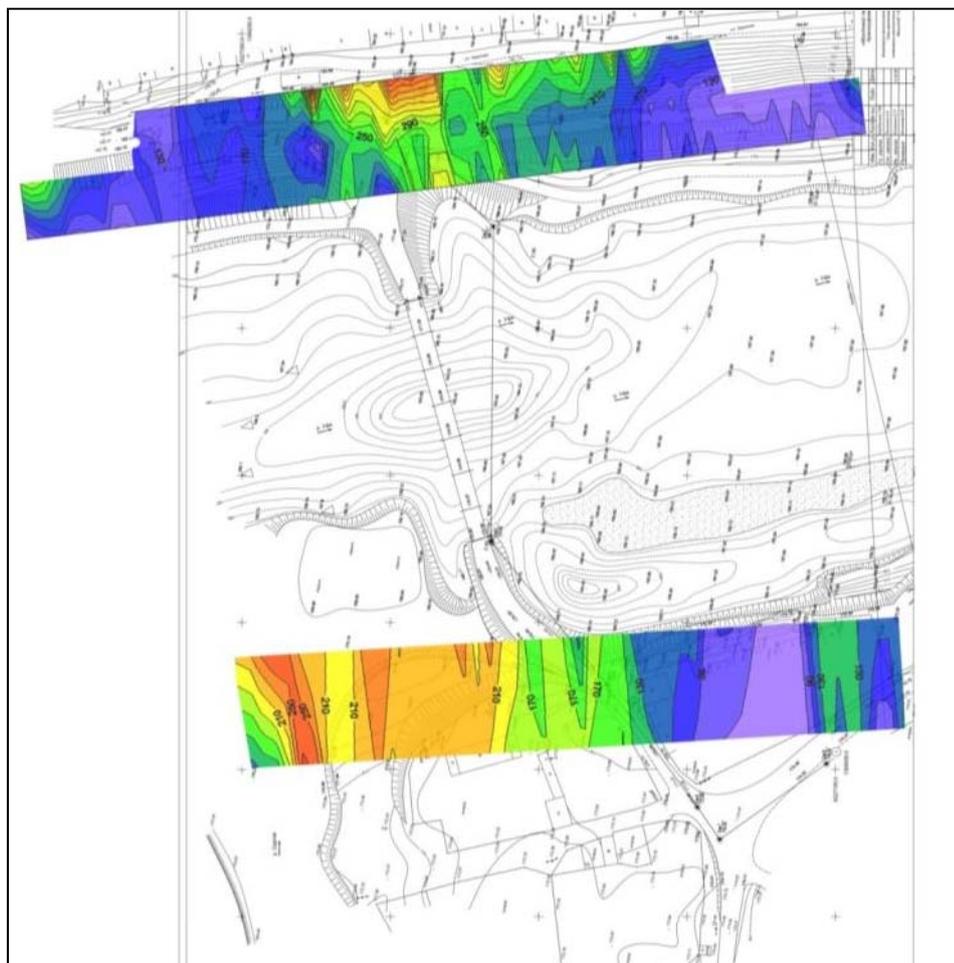


Рисунок 5.16 – Геоэлектрическая модель участка строительства

На правом берегу геологический разрез с поверхности также представлен гравийно-галечниковыми отложениями с сопротивлением в пределах 100-200 Ом*м. В промежутке между 13 и 20 метрами идет переходная зона чередования останцев известняков с гравийно-галечниковыми отложениями. Глубже 20 м и до 60 м залегают известняки с разной степенью выветрелости и трещиноватости.

Метод георадарного зондирования был использован для исследования массива горных пород в акватории реки, так как никакой другой метод не позволяет получить информацию о строении массива горных пород в этой части. Для производства работ применялся Георадар «ОКО-2».

К сожалению, пределы чувствительности георадара в водной среде и в переувлажненных рыхлых отложениях русла реки позволяют получить уверенную информацию на ограниченной глубине, не превышающей 8-10 м.

Всего было пройдено по воде 17 профилей. Пример получаемых разрезов приведен на рис. 5.17.

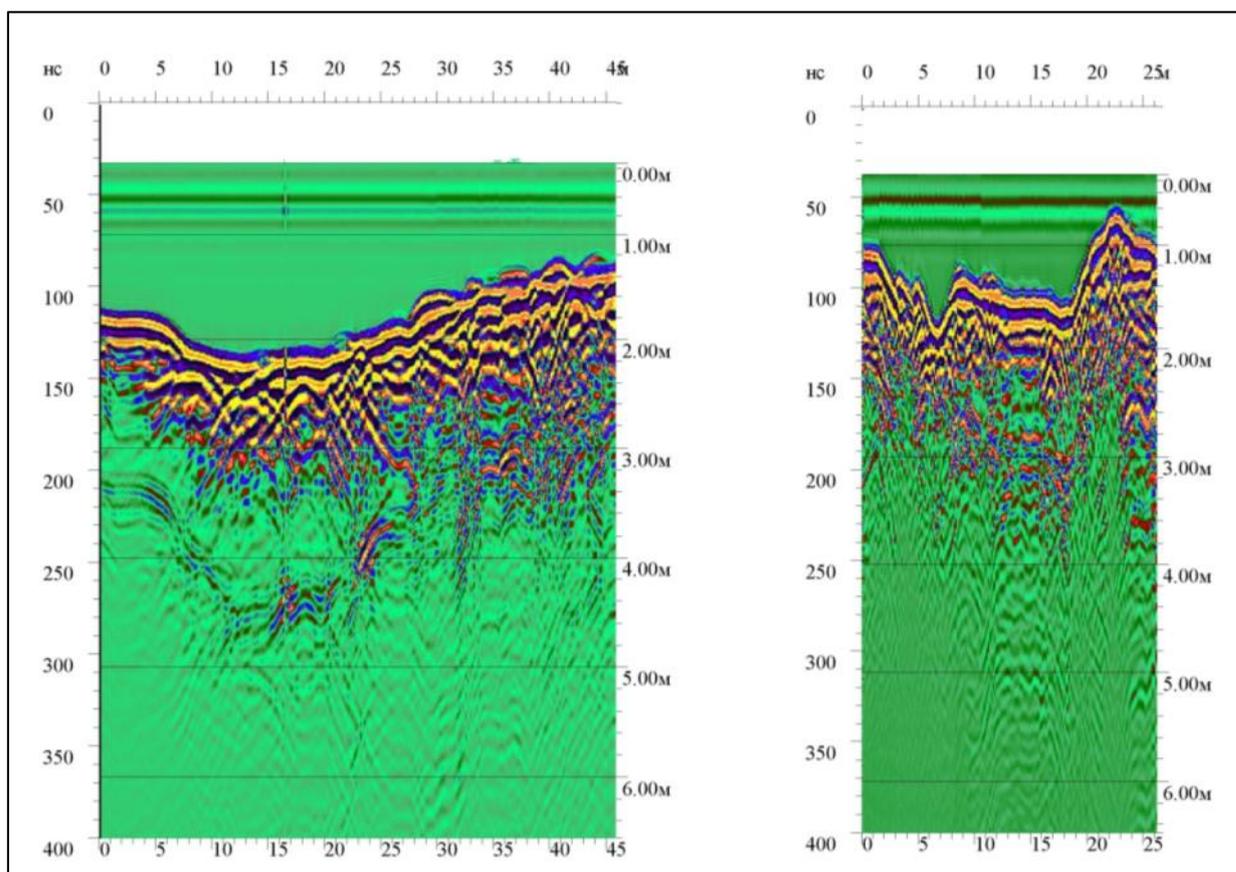


Рисунок 5.17 – Георадарные разрезы по профилям №№5-6

В целом, обобщение результатов георадарного зондирования массива горных пород на территории акватории реки позволили сделать следующие основные выводы:

- на всей обследованной территории, включающей прибрежные мелководные зоны и глубинные части реки, нигде не встречены выходы скальных пород, что подтверждает высказанные ранее положения о глубокой проработке в русле реки тектонического нарушения и заполнении его гравийно-галечниковыми грунтами;

- профиль (морфология) для реки отличается интенсивной изменчивостью и высокими градиентами перепада глубин, как в поперечном, так и в продольном направлениях;

- мощность песчано-илистых отложений распределяется неравномерно по исследованной территории, в прибрежных зонах она, в целом, увеличивается до 1,5-2,5 м, а в глубинных частях сокращается до 0,5-0,7 м.

Исследования массива методом ССП проводились с целью выявления карстовых полостей и тектонических нарушений, которые могли бы повлиять на устойчивость сооружения. Измерения проводились с шагом 3 м. При обработке полученных данных были отстроены спектральные разрезы. Особое внимание уделялось определению свойств горного массива на глубинах 20-80 метров, так как этот интервал слабо изучен скважинами и георадарным исследованиями.

В целом, результаты спектрального сейсмопрофилирования свидетельствуют о наличии в массиве горных пород системы крупных тектонических нарушений, сложенных рыхлыми и дезинтегрированными породами, не обладающими выраженными структурными элементами. Внутри нарушений, особенно достаточно мощных, наблюдаются останцы скальных пород.

Блоки, выделенные тектоническими нарушениями, сложены грубослоистыми трещиноватыми скальными породами, представленными известняками.

Признаков наличия карстовых полостей в известняках, а тем более, в рыхлых отложениях не обнаружено.

Выполненный комплекс инженерно-геофизических исследований позволил построить обобщенную схему геологического строения участка строительства мостового перехода (рис. 5.18).

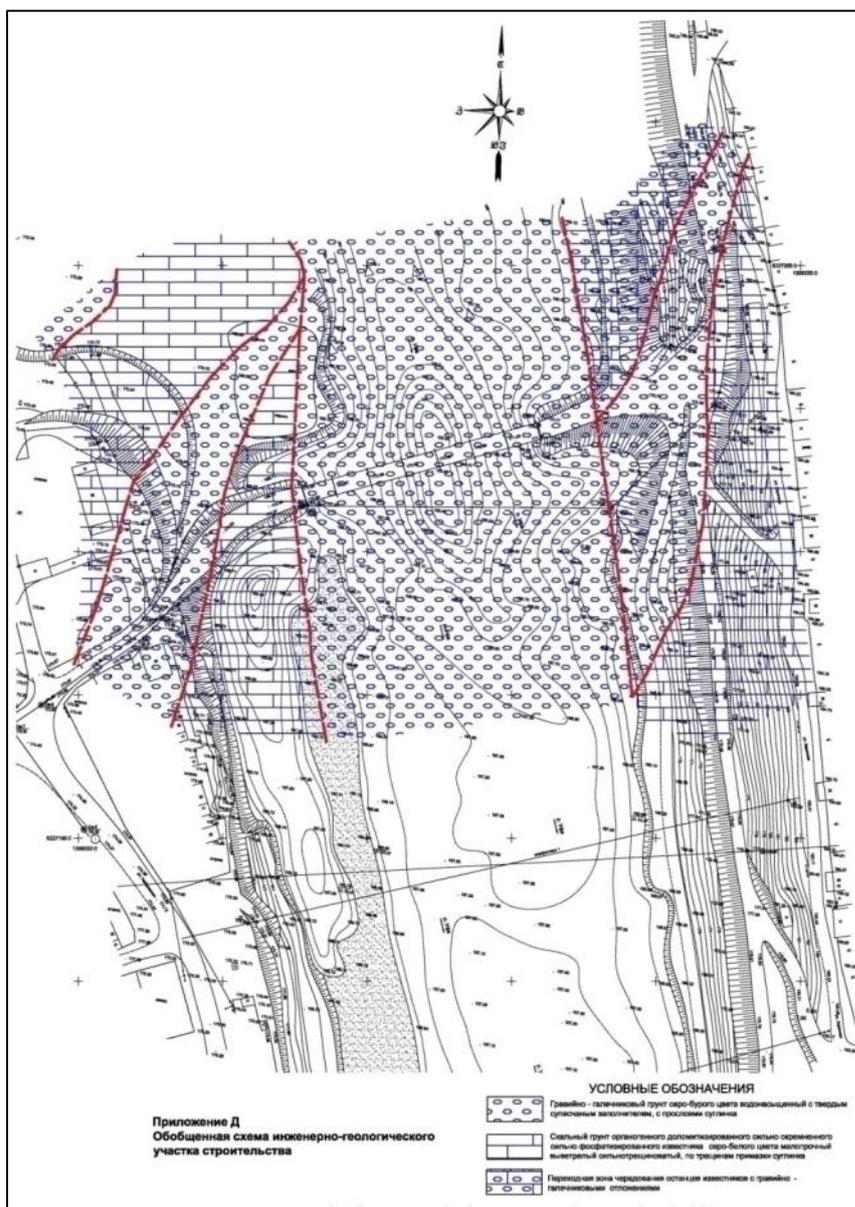


Рисунок 5.18 – Схема геологического строения участка строительства мостового перехода

Основным геологическим элементом исследуемого участка является разломная зона, по которой проходит русло реки Уфа. Мощность ее на данном участке составляет около 100 м. Глубина ее распространения уходит за пределы выполнения зондирования 80 м. Сложена она дезинтегрированными породами, которые в верхней части на глубину не менее 30 м представлены гравийно-галечными грунтами с линзами песчано-глинистых отложений и останцами скальных пород.

Верхняя часть массива в разломной зоне, примыкающая непосредственно к дну современного речного русла, перекрыта песчано-

глинисто-илистыми отложениями, мощность которых в прибрежных зонах достигает 1,5-2,5 м, а в центральной глубинной части снижается до 0,5-0,7 м.

Карстовые полости и вообще карстопроявления в пределах этого тектонического нарушения принципиально невозможны в связи с мелкоблочной структурой пород и наличием рыхлых и глинисто-илистых компонентов.

В связи с возможностью проявления напорных подземных вод с отрогов долины и их разгрузкой в русло реки, возможны локальные зоны фильтрации с нарушением первичного состояния данных отложений.

Правый и левый берега, примыкающие к основному разлому, сложены скальными известняками, перекрытыми рыхлыми отложениями, представленными аллювием переменной мощности от 10-15 м до 35-45 м в отдельных пазухах. Известняковая толща рассечена оперяющими нарушениями кососекущими по отношению к основному тектоническому нарушению. Они также уходят на глубины свыше 80 м и сложены, как и основное нарушение, дезинтегрированными породами с рыхлыми грунтами.

На левом берегу выявлено одно мощное оперяющее нарушение, находящееся на участке примыкания моста, а второе менее мощное ниже по течению. Мощное нарушение имеет сложное в плане очертание. Часть его имеет большое количество скальных останцев. В этом нарушении, как и в основном, принципиально не может быть карстовых полостей и их наличия не зафиксировано полевыми работами по зондированию массива.

На правом берегу выявлены также два оперяющих тектонических нарушения. Более мощное нарушение примыкает к основному нарушению выше оси мостового перехода. Второе, менее мощное зафиксировано на профиле ССП №7 (рис. 5.19).

Состояние и свойства этих нарушений аналогичны тектоническим нарушениям левого берега и основному тектоническому нарушению.

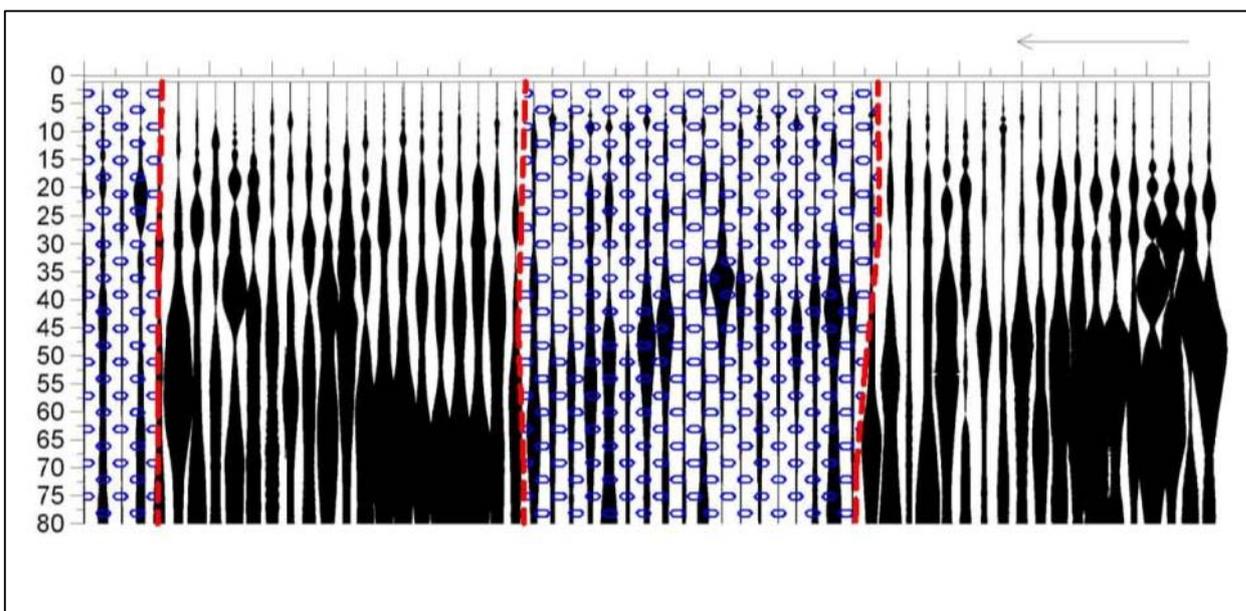


Рисунок 5.19 – Спектральный сейсморазрез по профилю №7

Примыкание моста на правом берегу приходится непосредственно на скальные известняки, перекрытые сверху 30-метров гравийно-галечными отложениями. В известняках в этой толще масштабных карстопроявлений, способных нарушить устойчивость моста, не обнаружено.

Таким образом, инженерно-геологические условия строительства мостового перехода, выявленные в процессе проведения исследований, исключают возможность карстопроявлений. Строительство опор моста будет производиться в гравийно-галечниковой толще.

5.4 Диагностика опасности карстопроявлений при строительстве антенных мачт мобильной связи

Работы по диагностике опасности карстопроявлений при строительстве металлических башен высотой до 70 м для размещения антенн мобильной связи стандарта GSM 900/1800 в Пермской и Свердловской областях производились с целью определения возможности их строительства на участках карстопроявлений [98, 99, 100, 101].

Работы проводились в дополнение к стандартным инженерно-геологическим изысканиям, так как их бурением нескольких скважин и не дает представления о развитии процессов карстопроявлений на исследуемом участке, за исключением варианта точного попадания в карстовую полость, что очень проблематично.

Работы проводились методами георадарного зондирования и спектрального сейсмопрофилирования.

В качестве примера можно рассмотреть один из участков, участок строительства базовой станции «ПО-Черепахи» [100]. Он примечателен тем, что в непосредственной близости от предполагаемого места строительства мачты расположена старая воронка обрушения от карста.

Исследования строения горного массива на этом участке до глубины 45 метров были проведены методом георадарного зондирования. Для производства работ применялся георадар ГРОТ-10.

Измерения проводились с шагом 0.4 м на двух пределах чувствительности и детальности. В первом случае при пересчете получены георадарные разрезы до глубины 15 м, во втором случае до глубины 45 метров. Всего измерения проведены по пяти профильным линиям. Один из них (№5) проходил между скважинами, от первой скважины ко второй для сопоставления результатов георадарного зондирования с результатами буровых работ. Схемы расположения профильных линий георадарного зондирования и спектрального сейсмопрофилирования представлены на рис. 5.20 – 5.21.

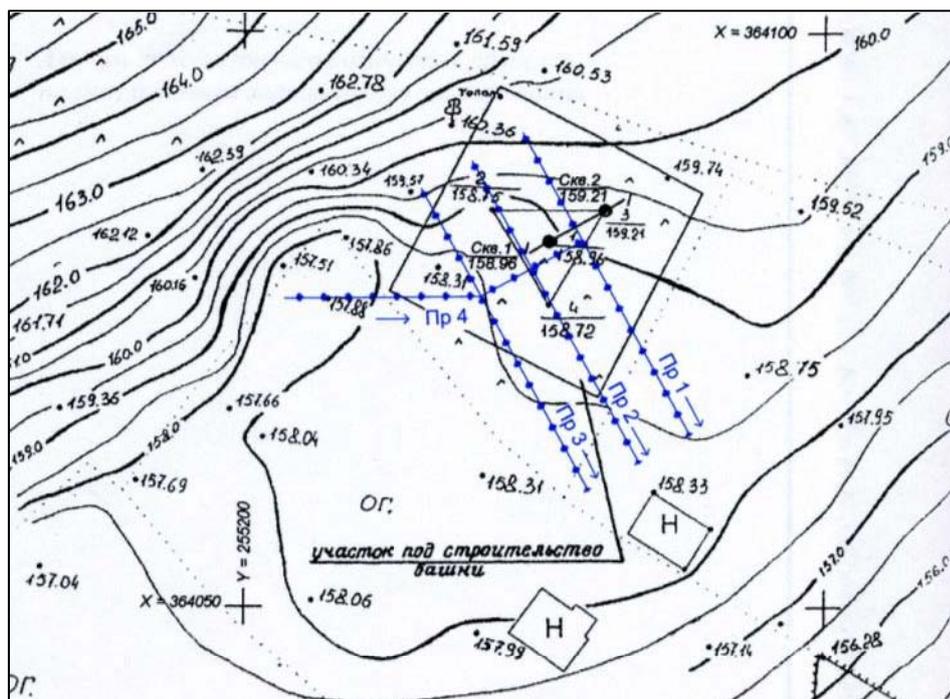


Рисунок 5.20 – Схема расположения профильных линий георадарного зондирования

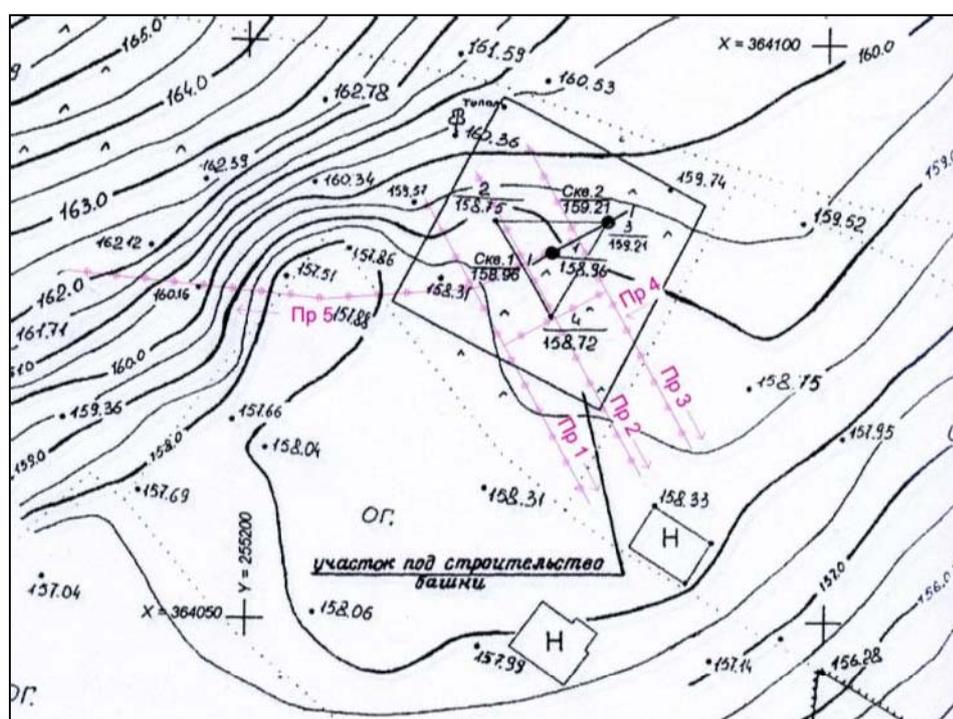


Рисунок 5.21 – Схема расположения профильных линий ССП

Результаты георадарного зондирования по профилю №4 представлены на рис. 5.22.

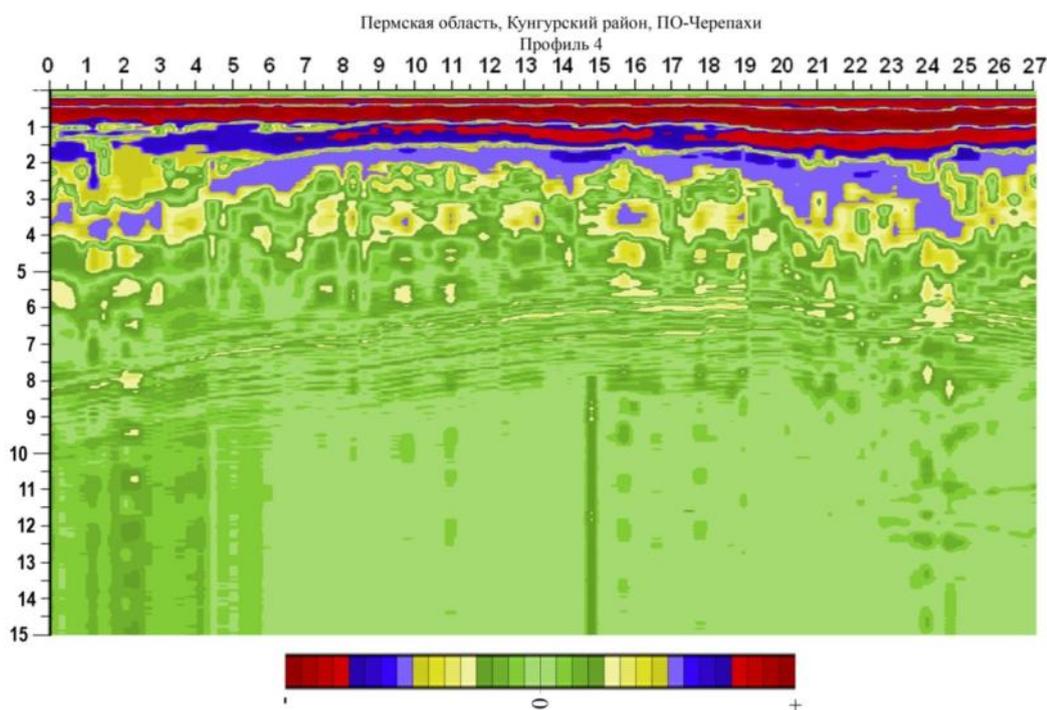


Рисунок 5.22 – Георадарный разрез по профилю №4

Этот профиль проходил через воронку обрушения древнего карста и участок строительства опоры. Как видно из разреза, начало профиля, соответствующее воронке, отличается от общей геологической ситуации по профилю. Очевиден провал с 0 метра по 5 метр, породы до глубины 15 метров нарушены.

Анализ всех разрезов, полученных методом георадарного зондирования, подтвердил слоистую структуру массива горных пород на участке строительства базовой станции ПО-Черепахи, полученную по результатам буровых работ.

Основной результат, полученный этим геофизическим методом, подтверждение геологического строения всего участка, путем сопоставления георадарных данных с отдельными инженерно-геологическими скважинами, а также изучение геологического строения массива до глубины 30 метров.

Аномалии в геологическом строении массива позволили сделать вывод о провалившемся в прежние времена карсте в достаточном отдалении от участка, предназначенного для строительства базовой станции и слабой карстовой активности в пределах участка на данный момент времени.

На рис. 5.23 показан спектральный разрез по профилю №5, соответствующему четвертому профилю георадарного зондирования.

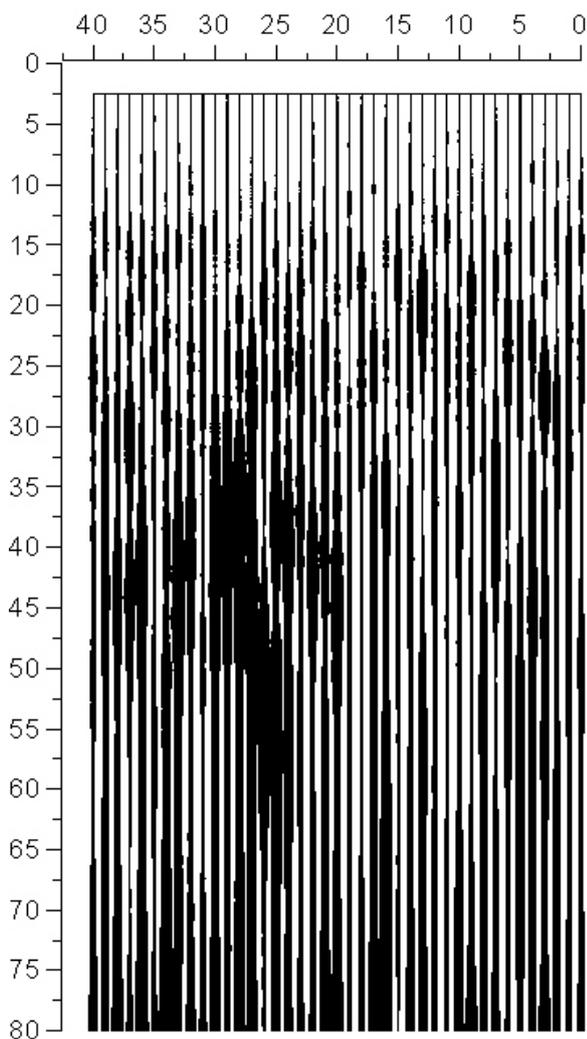


Рисунок 5.23 – Спектральный разрез по профилю №5

Профиль №5 отличается от георадарного увеличенной длиной, полностью пересекающей воронку обрушения. В интервале 22-30 метров по ходу профиля на глубине 30-50 метров хорошо прослеживается карстовая полость, уже заполненная дисперсным материалом вышележащей толщи. В гидрогеологическом отношении, в соответствии с результатами изысканий прошлых лет [102], участок относится к району карстовых вод с глубиной залегания 38-40 метров, что подтверждает глубину образования карстовой полости. Учитывая состав налегающей толщи (глины и суглинки) был сделан вывод о том, что процесс сдвижения на этом участке уже прошел полностью

и при отсутствии новых внешних воздействий на горный массив (изменение гидродинамического режима с выносом дисперсного материала из карстовой полости) ожидать повторного обрушения не следует. Других аномалий, связанных с карстом на исследуемом участке по результатам геофизических исследований не обнаружено. В этой связи было дано положительное заключение о возможности строительства базовой станции на намеченной площадке, при соблюдении правил строительства на карстоопасных территориях.

Выводы

1. Практическая проверка разработанной методики на объектах недропользования для решения задач сохранения действующих инженерных сооружений, их безопасной эксплуатации, а также для обоснования возможности строительства новых инженерных сооружений показала, что:

- разработанные методы геофизической и геодинамической диагностики карстоопасного массива позволяют достоверно определить исходные параметры, требуемые для оценки степени его опасности;

- теоретически обоснованные зависимости подтверждаются натурными экспериментами и заверены разведочным бурением;

- использование полученных зависимостей устойчивости налегающей толщи карстовых пустот от тектонической нарушенности и современной геодинамической активности массива позволяет диагностировать карстоопасный массива на предмет деформирования земной поверхности.

2. Использование разработанной методики диагностики карстопоявлений при исследованиях на Красногорском участке газопровода «Бухара-Урал» сделало возможным предсказать места выхода карстовых провалов, их размеры и степень опасности этих процессов при эксплуатации газопровода.

3. Исследования, проведенные в районе подъездной железной дороги Высокогорского ГОКа, позволили определить площадь опасных деформаций с определением границ безопасного строительства обьездной ветки.
4. Диагностика опасности карстопроявлений при проведении инженерно-геологических изысканий на участке строительства мостового перехода и антенных мачт мобильной связи определили возможность их строительства на указанных участках с обоснованием их безопасной эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненного комплекса исследований в диссертационной работе решена важная научно-техническая задача: оценки опасности карстопроявлений с учетом важнейших геомеханических факторов – структурно-тектонического строения массива и геодинамической активности тектонических нарушений. Разработанные в диссертации методики позволяют непосредственно оценивать карстовую опасность и делают возможным прогнозирование деформаций земной поверхности от сдвижения карстовых пустот. Это повышает безопасность строительства и эксплуатации объектов недропользования в районах распространения карста, позволяет привлечь для строительства территории, ранее относящиеся к разряду карстоопасных.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлены основные закономерности активизации карстопроявлений на земной поверхности. Активизация карстопроявлений возможна только в условиях повышенной водопроницаемости карстоопасного массива, которая в первую очередь зависит от наличия тектонических нарушений и их современной геодинамической активности.

2. Доказано, что опасность карстопроявлений определяется возможностью и параметрами выхода процессов обрушения на земную поверхность. Параметры деформации поверхности зависят от глубины залегания, морфологии и степени заполнения карстовой полости. Современное развитие деформационных процессов определяется степенью изменения геомеханических и гидрогеологических характеристик массива горных пород под воздействием природной и техногенной геодинамической активности геологической среды.

3. Обоснованы основные методы изучения геомеханического состояния и современной геодинамической активности карстоопасного

массива для построения его геомеханической модели. Применение систем спутниковой геодезии в сочетании с геофизическими методами изучения приповерхностной части геологической среды (электрометрия, спектральное сейсмопрофилирование, георадарное зондирование) позволяет обосновать объемную модель геологического строения и определить количественные характеристики геодинамической подвижности карстоопасного участка. Полученная структурно-динамическая модель массива горных пород выступает в качестве геомеханической основы для достоверного выявления и прогнозирования развития опасных карстопроявлений.

4. Произведена практическая проверка разработанной методики на объектах недропользования для решения задач, связанных с выявлением причин провалообразования, ликвидацией последствий карстопроявлений, диагностикой и обоснованием безопасного строительства и эксплуатации сооружений на карстоопасных участках. Проверка показала, что:

- разработанные методы геофизической и геодинамической диагностики карстоопасного массива позволяют достоверно определить исходные параметры, требуемые для оценки степени его опасности;

- теоретически обоснованные зависимости подтверждаются натурными экспериментами и заверены разведочным бурением;

- использование полученных зависимостей устойчивости налегающей толщи карстовых пустот от тектонической нарушенности и современной геодинамической активности массива позволяет диагностировать карстоопасный массива на предмет деформирования земной поверхности.

5. Применение решений, полученных в работе, и внедрение их в практику позволит обеспечить безопасность объектов недропользования в карстоопасных областях и вовлечь новые, ранее не используемые земли для жизнедеятельности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Леггет Р. Города и геология [Текст] / Р. Леггет. – М.: Мир, 1976. – 559 с.
2. Claire W. H. ASCE Urban Planning Guide [Текст] / Claire W. H. – American Society of Civil Engineers: Manuals and Reports on Engineering Practice, 1969. – № 49.
3. Оценка и управление природными рисками [Текст] / под ред. Рагозина А. Л. – М.: Круг, 2003. – 320 с.
4. Гвоздецкий Н. А. Карст. Природа мира [Текст] / Н. А. Гвоздецкий. – М.: Мысль, 1981. – 214 с.
5. Вопросы изучения карстовых явлений в районе г. Дзержинска [Текст] / И. А. Саваренский и др. // Труды / ЛГГП. – Т. XVII. – М., 1962.
6. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология [Текст] / В. Д. Ломтадзе. – Л.: Недра, 1984. – 512 с.
7. Ронов А. Б. История осадконакопления и колебательных движений Европейской части СССР (по данным объемного метода) [Текст] / А. Б. Ронов // Труды / Геофизического Института АН СССР. – №3 (130). – М., 1949.
8. Кавеев М. С. Геологические условия развития и особенности проявления карста в центральной части Волго-Камского края [Текст] : автореф. дис. докт. геол.-минерал. наук / М. С. Кавеев. – Казань, 1963. – 37 с.
9. Соколов Д. С. Основные условия развития карста [Текст] / Д. С. Соколов. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 321 с.
10. Максимович Г. А. Основы карстоведения [Текст] : Т. 1. / Г. А. Максимович. – Пермь: Кн. изд-во, 1963. – 444 с.
11. Ступишин А. В. Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья [Текст] / А. В. Ступишин. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1967. – 292 с.
12. Гвоздецкий Н. А. Проблемы изучения карста и практика [Текст] / Н. А. Гвоздецкий. – М.: Мысль, 1972. – 392 с.

13. Дублянская Г. Н. Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий [Текст] / Г. Г. Дублянская, В. Н. Дублянский. – Новосибирск: Наука, 1992. – 144 с.
14. Дублянская Г. Н. Теоретические основы изучения парагенезиса карст-подтопление [Текст] / Г. Н. Дублянская, В. Н. Дублянский. – Пермь: ПГУ, 1998. – 204 с.
15. Кутепов В. М. Устойчивость закарстованных территорий [Текст] / В. М. Кутепов, В. Н. Кожевникова. – М.: Наука, 1989. – 152 с.
16. Толмачев В. В. Инженерное карстование [Текст] / В. В. Толмачев, Ф. Ройтер. – М.: Недра, 1990. – 151 с.
17. Саваренский И. А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста [Текст] / И. А. Саваренский, Н. А. Миронов. – М.: Изд-во ПНИИИС, 1995. – 167 с.
18. Макеев З. А. Принципы инженерно-геологического районирования карстовых областей [Текст] / З. А. Макеев // Карстование. – 1948. - вып. 4. – С. 43-45.
19. Копосов Е. В. Методология обеспечения экологически безопасного освоения природных ресурсов закарстованных территорий [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Е. В. Копосов. – Нижний Новгород, 2000. – 56 с.
20. Буданов Н. Д. Гидрогеология Урала [Текст] / Н. Д. Буданов. – М.: Наука, 1964. – 304 с.
21. Ильин С. В. Гидрогеологическая характеристика поля шахты и условия проходки ствола шахты № 6 [Текст] / С. В. Ильин // Материалы карстовой конференции в г. Кизиле. – Кизил: ОНТИ НКТП, 1935.
22. Выявление геофизическими методами потенциально опасных участков канала р. Вагран, подверженных суффозионно-карстовым процессам [Текст] : отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В.В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2007. – 49 с.

23. Федосеев А. К. Математическое моделирование развития карстовых процессов [Текст] / А. К. Федосеев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР. – Пермь, 2008. – С. 99-101.
24. Рекомендации по изучению карста геофизическими методами [Текст] / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1986. – 112 с.
25. Борзунов В. М. Разведка и промышленная оценка месторождений нерудных полезных ископаемых [Текст] / В. М. Борзунов. – М.: Недра, 1982. – 310 с.
26. Инструктивно-методическое руководство по эксплуатационной разведке и геологическому обслуживанию на горнодобывающих предприятиях Минчермета СССР [Текст]: утв. Минчерметом СССР 12.12.1974. – Донецк: Дон НИГРИ, 1975. – 215 с.
27. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии [Текст] / В. С. Матвеев и др. – М.: Недра, 1972. – 295 с.
28. Огильви А. А. Геоэлектрические методы изучения карста [Текст] / А. А. Огильви. – М.: Изд-во МГУ, 1957. – 195 с.
29. Огильви А. А. Геофизические методы исследований [Текст] / А. А. Огильви. – М.: Изд-во МГУ, 1962. – 411 с.
30. Финкельштейн М. И. Применение радиолокационного приповерхностного зондирования в инженерной геологии [Текст] / М. И. Финкельштейн, В. А. Кутев, В. П. Золотарев. – М.: Наука, 1986. – 128 с.
31. Савченко О. В. Горный массив и сооружения: методы контроля и прогноза состояния [Текст] / О. В. Савченко, Ю. С. Рябоштан // Проблемы гидрогеомеханики в горном деле и строительстве: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. : Ч. 1. – Киев, 1996. – С. 69.
32. Гвоздецкий Н. А. Карст. Вопросы общего карстоведения [Текст] / Н. А. Гвоздецкий. – М.: Географгиз, 1954. – 351 с.
33. Справочное руководство гидрогеолога [Текст] / под ред. В. М. Максимова. – М.: Недра, 1979. – С. 114-117.

34. Рац М. В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород [Текст] / М. В. Рац, С. Н. Чернышев. – М.: Недра, 1970. – 164 с.
35. Рац М. В. Неоднородность горных пород и их физических свойств [Текст] / М. В. Рац. – М.: Наука, 1968. – 108 с.
36. Геологическая структура. Опыт формализованного определения и описания. Статья 1. Определение понятия геологической структуры [Текст] / Ю. А. Косыгин и др. // Геология и геофизика. - 1966. – №11.
37. Тектонические разрывы на участках сейсмического микрорайонирования [Текст] / А. С. Алешин и др. – М.: Наука, 1982. – 134 с.
38. Кофф Г. Л. Изучение разломов при инженерно- геологических исследованиях в сейсмоактивных областях [Текст] / Г. Л. Кофф, Р. М. Лобацкая. – Варшава: ПГИ, 1991. – 224 с.
39. Вегенер А. Происхождение материков и океанов [Текст] / А. Вегенер // Современные проблемы естествознания. - М.-Л.: Геоиздат, 1925. – 145 с.
40. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании [Текст] / Ю. О. Кузьмин. – М.: Агентство экологических новостей, 1999. – 220 с.
41. Балек А. Е. Управление напряженно-деформированным состоянием скального массива при подземной разработке рудных месторождений системами с обрушением [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук; ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2007. – 32 с.
42. Гликман А. Г. Физика и практика спектральной сейсморазведки [Электронный ресурс] / А. Г. Гликман. – Режим доступа: <http://www.newgeophys.spb.ru/ru/book/index.shtml>.
43. Исследование суффозионно-карстовых провальных процессов на территории микрорайона Красная Горка г. Каменска-Уральского, оценка риска и оконтуривание границ возможного их проявления [Текст] : отчет о НИР/ ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, – 2001. – 61 с.

44. Комплексные работы по исследованию провальнo-карстовых явлений на Красногорском участке газопровода Бухара-Урал с целью оценки степени их опасности на предмет внезапного самообрушения и сохранности трубопровода. Этап 1: Повторные геофизические исследования в рамках мониторинга состояния геологической среды на участке проявления провальнo-карстовых явлений [Текст]: отчет о НИР/ ИГД УрО РАН; рук. А.Д. Сашурин; исполн.: В.В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2002. – 285с.
45. Панжин А. А. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением спутниковой геодезии [Текст] / А. А. Панжин // Маркшейдерия и недропользование. – 2003. – № 2. – С. 43-54.
46. Кашкаров А. А. Геоэлектрический контроль геомеханических явлений [Текст] / А. А. Кашкаров, А. А. Панжин, В. В. Мельник // Маркшейдерский вестник. – 1998. – № 2 (24). - С. 17-20.
47. Кашкаров А. А. Взаимосвязь электрометрических(физических) и структурных геомеханических моделей скальных массивов [Текст] / А. А. Кашкаров, В. В. Мельник // Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения): докл. Междунар. конф.: в 4-х т.: т. 1. / ИГД УрО РАН. - Екатеринбург, УрО РАН, 1998. – С. 141-145..
48. Кашкаров А. А. Методы исследования комплекса геомеханических, гидрогеологических и геоэлектрических параметров горных пород и массивов [Текст] / А. А. Кашкаров, В. В. Мельник // Геомеханика в горном деле: тез. докл. междунар. конф. / ИГД УрО РАН. - Екатеринбург, 2000. – С. 20-22.
49. Геоэлектрическое моделирование как способ изучения гидрогеологических и геомеханических явлений горных пород и массивов [Текст] / А. А. Кашкаров, В. В. Мельник и др. // Техногенез и экология: информ.-тем. сб. / УГГГА, УООГИ, ИИСМС. – Екатеринбург, 2000. – С. 121-128.

50. Кашкаров А. А. Методы геоэлектрической диагностики гидрогеологических и геомеханических явлений и свойств горных пород [Текст] / А. А. Кашкаров, В. В. Мельник, С. В. Усанов // Техногенез и экология: информ.-тем. сб. / УГГГА, УООГИ, ИИСМС. – Екатеринбург, 2002. – С. 149.
51. Мельник В. В. Изучение строения участка земной коры и создание его геолого-структурной модели [Текст] / В. В. Мельник, А. Л. Замятин // Современные проблемы геофизики: 5-я Уральская молодежная научная школа по геофизике: сб. материалов / Институт геофизики УрО РАН, ГоИ УрО РАН, ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – С. 43 - 46.
52. Сашурин А. Д. Использование геоэлектрических методов для оценки геомеханических и гидрогеологических параметров природных и техногенных горных массивов дамбы хвостохранилища Качканарского ГОКа [Текст] / А. Д. Сашурин, В. В. Мельник // Горный информ.-аналит. бюл. – 2002. - № 12. – С. 85-87.
53. Мельник В. В. Диагностика карстоопасности методом спектрального сейсмопрофилирования [Текст] / В. В. Мельник // Горный информ.-аналит. бюл. – 2006. – № 7. - С. 153-156.
54. Мельник В. В. Оценка опасности карстопроявлений геофизическими методами [Текст] / В. В. Мельник // Горный информ.-аналит. бюл. – 2008. №9. – С. 143-147.
55. Мельник В. В. Определение местоположения и размеров карстовых пустот на Илецком месторождении каменной соли [Текст] / В. В. Мельник, А. Л. Замятин // Геология и геоэкология европейской России и сопредельных территорий: Рос. молодежная науч. конф. XV, посвященная памяти К. О. Кратца. – СПб.: ИГГД РАН – 2004. – С. 57-62.
56. Бурсиан В. Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке [Текст] / В. Р. Бурсиан. – Л.: Недра, 1972. – 367 с.
57. Вопросы подповерхностной радиолокации [Текст] / под ред. А. Ю. Гринев. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.

58. Геофизические работы с выдачей заключения о размерах области подработки под площадку и строительство жилых домов в г. Березовский [Текст] : отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2005. – 52 с.
59. Инженерно-геодезические, инженерно-геофизические и гидрогеологические изыскания для проекта рекультивации воронок обрушения Березовского рудника [Текст] : отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2006. – 70 с.
60. Проведение инженерно-геофизических изысканий и оценке возможности многоэтажной застройки на подработанном подземными горными работами земельном участке в границах улиц Восточная – Загвозкина – пер. Клубный – пер. Токарей в г. Березовский Свердловской обл. [Текст] : отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2007. – 36 с.
61. Проведение инженерно-геофизических изысканий и оценке возможности строительства торгово-сервисного комплекса на подработанном подземными горными работами земельном участке в г. Березовский Свердловской обл., Березовский тракт, 6В [Текст] : отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2008. – 38 с.
62. Исследование состояния массива горных пород и оценка возможности строительства торгового центра в г. Краснотурьинске, Свердловская область площадью 1,6 га [Текст] : отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2008. – 35 с.
63. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии [Текст]: т. 1. / К. М. Антонович. – М.: Картоцентр-Новосибирск: Наука, 2005. – 334 с.

64. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии [Текст]: т. 2. / К. М. Антонович. – М.: Картоцентр-Новосибирск: Наука, 2006. – 360 с.
65. Панжин А. А. Исследование геодинамических процессов с применением GPS-технологий [Текст] / А. Д. Сашурин и др. // Горный информ.-аналит. бюл. - 2003. – № 7. – С. 34-38.
66. Панжин А. А. Мониторинг геодинамических процессов на горных предприятиях и урбанизированных территориях [Текст] / А. А. Панжин, Н. А. Панжина // Горный информ.-аналит. бюл. – 2007. – № 3. – С. 171-183.
67. Панжин А. А. Результаты наблюдений за деформациями породных массивов методами спутниковой геодезии [Текст] / А. А. Панжин // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: труды междунар. конф./ ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2001. – С. 158-162.
68. Кострюкова Н. К. Динамика приливных деформационных процессов в локальных разломах земной коры - в связи с безаварийной эксплуатацией продуктопроводов [Текст] / Н. К. Кострюкова, О. М. Кострюков // Геомеханика в горном деле: докл. Междунар. конф. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2000. – С. 295-305.
69. Изыскания с целью определения тектонического строения и современной геодинамической активности площадки строительства комплекса сгущения на дамбе хвостохранилища Качканарского ГОКа [Текст] : отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2007. – 74 с.
70. Установление причин и оценка вероятности образования карстовых провалов, разработка рекомендаций по обеспечению устойчивости магистрального газопровода Бухара-Урал на участке Красногорского ЛПУ ООО "Уралтрансгаз"[Текст] : отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2001. – 192 с.

71. Кузнецов М. А. Сдвигение горных пород на рудных месторождениях [Текст] / М. А. Кузнецов, А. Г. Акимов, В. И. Кузьмин.. – М.: Недра, 1971. – 224 с.
72. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана [Текст] . – Свердловск: ИГД ММ СССР, 1990. – 63 с.
73. Кузнецов М. А. Определение границ зон опасных сдвижений при разработке слепых залежей ограниченных размеров [Текст] / М. А. Кузнецов, В. В. Громов // Сдвигение земной поверхности и устойчивость откосов: сб. науч. тр. – Л.: ВНИМИ, 1980. – С. 39-43.
74. Руппенейт К. В. Некоторые вопросы механики горных пород [Текст] / К. В. Руппенейт. - М.: Углетехиздат, 1954. – 384 с.
75. Юматов Б. П. Технология открытых горных работ при разработке рудных месторождений [Текст] / Б. П. Юматов. - М.: Недра, 1966. – 220 с.
76. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический [Текст] : в 2 кн.: кн. 1 / под ред. А. А. Уманского. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1972. – 599 с.
77. Слесарев В. Д. Механика горных пород [Текст] / В. Д. Слесарев. – М.: Углетехиздат, 1948. – 303 с.
78. Методические указания по постановке исследований сдвигаения горных пород на моделях [Текст] / сост. В. Н. Земисев и др. – Л.: ВНИМИ, 1964. – 100 с.
79. Слесарев В. Д. Механика горных пород [Текст] / В. Д. Слесарев. – М.: Углетехиздат, 1948. – 303 с.
80. Влох Н. П. Управление горным давлением в крепких породах на основе исследования закономерностей формирования их напряженного состояния [Текст] : автореф. дис. д-ра техн. наук / Н. П. Влох; ЛГИ. – Л., 1973. – 46 с.

81. Смирнов А. Ф. Обобщенные паспорта прочности и сопротивление одноосному сжатию массива скальных пород Кривбасса [Текст] / А. Ф. Смирнов // Горный журнал. – 1978. – № 5. – С. 56 - 58.
82. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов [Текст] / Г. Л. Фисенко. - 2-е, изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1965. – 377 с.
83. Громов В. В. Условие устойчивого состояния земной поверхности при разработке слепых рудных залежей [Текст] / В. В. Громов // Сб. науч. тр. / ВНИМИ. – №. 89. – Л., 1973. – С. 22 - 24.
84. Ривкин И. Д. Условия устойчивости пород над выработанным пространством слепых рудных залежей [Текст] / И. Д. Ривкин. - Кривой Рог: НИГРИ, 1968. – 10 с.
85. Мельник В. В. Исследование структурных особенностей массива горных пород подземных сооружений [Текст] / В. В. Мельник, А. Л. Замятин // Изв. вузов. Горный журнал. - 2008. – № 8. - С. 165 - 171.
86. Мельник В. В. Применение метода спектрального сейсмопрофилирования для оценки геомеханического состояния массива горных пород вокруг шахтных выработок [Текст] / В. В. Мельник // Проблемы освоения недр в XXI веке - глазами молодых: сб. науч. материалов. – М.: ИПКОН РАН, РФФИ, 2006. – С. 58-62.
87. Мельник В. В. Использование методов диагностики карстопроявлений при инженерно-геологических изысканиях [Текст] / В. В. Мельник // Проблемы недропользования: материалы III всероссийской молодежной науч.- практ. конф. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – С. 12 - 16.
88. Определить местоположение и размеры карстовых пустот в потолочине над рудником №1 на территории зоны отдыха между озерами Развал - М.Городское – Б.Городское - Дунино [Текст]: отчет о НИР (заключ.) / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2004. – 192 с.

89. Иконников Л. Б. Основные результаты карстомониторинга г. Дзержинска (1992-2005 гг.) [Текст] / Л. Б. Иконников // Геориск. - 2008. - № 3. – С. 50 - 54.
90. Мельник В. В. Геомеханические аспекты диагностики опасности карстопроявлений при недропользовании [Текст] / В. В. Мельник // Геомеханика в горном деле: докл. Всерос. конф. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2008. – С. 114 - 120.
91. Мельник В. В. Исследование геомеханических факторов в диагностике опасности карстопроявлений при недропользовании [Текст] / В. Мельник // Proceedings of the X-th Jubilee national conference with international participation of the open and underwater mining of minerals / International House of Scientists "Fr. J. Curie", Varna, Bulgaria. – Varna, 2009. – P. 297-302.
92. Рекомендации по проектированию зданий и сооружений в карстовых районах СССР [Текст] . – М.: ПНИИИС, 1967. – 53 с.
93. Исследование причин и прогнозная оценка развития деформаций борта Главного карьера в районе 12 поста и разработка рекомендаций по безопасной эксплуатации железнодорожных путей и пульпопровода на деформируемом участке [Текст]: отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2004. – 66 с.
94. Обобщение опыта осушения Высокогорского железорудного месторождения [Текст] / М. Г. Седлов и др. – М.: ГИПРОЦВЕТМЕТ, 1971.
95. Исследование деформационных процессов и разработка рекомендаций по безопасному ведению открытых горных работ в подработанном массиве Западного борта Медноруднянского карьера [Текст]: отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2004. – 76 с.
96. Инженерно-геофизические исследования массива горных пород на участке реконструируемого мостового перехода через р. Уфа [Текст]: отчет о НИР / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. –

- Екатеринбург, 2008. – 51 с.
97. Мостовой переход через реку Уфа у поселка Саргая Красноуфимского района Свердловской области [Текст]: предварительные материалы об инженерно-геологических изысканиях на объекте / ИЦИП. – Екатеринбург, 2008. – 25 с.
98. Строительство опор базовых станций сети СРТС стандарта GSM 900/1800 в Пермской области. Базовая станция №52368 ПО-Голдыревский [Текст]: технический отчет об инженерно-геофизических изысканиях / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник. – Екатеринбург, 2005. – 39 с.
99. Строительство опор базовых станций сети СРТС стандарта GSM 900/1800 в Пермской области. Базовая станция №52368 ПО-Кунгурское ГАИ [Текст]: технический отчет об инженерно-геофизических изысканиях / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник. – Екатеринбург, 2005. – 31 с.
100. Строительство опор базовых станций сети СРТС стандарта GSM 900/1800 в Пермской области. Базовая станция №52368 «ПО-Черепахи» [Текст]: технический отчет об инженерно-геофизических изысканиях / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник. – Екатеринбург, 2005. – 33 с.
101. Строительство металлических башен высотой до 70 м для размещения антенн мобильной связи в Свердловской области. БС № 66-331 Свердловская область, н.п. Староуткинск [Текст]: технический отчет об инженерно-геофизических изысканиях / ИГД УрО РАН; рук. А. Д. Сашурин; исполн.: В. В. Мельник [и др.]. – Екатеринбург, 2007. – 27 с.
102. Строительство опор базовых станций сети СРТС стандарта GSM 900/1800 в Пермской области. Базовая станция №52359 «ПО-Черепахи» [Текст]: технический отчет об инженерно-геологических изысканиях / ИЦИП. - Екатеринбург, 2005. – 28 с.