

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ
АСПЕКТЫ
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Под редакцией канд.техн.наук В.В. Мельника

ЕКАТЕРИНБУРГ
2022

УДК 622.831.232
Г 361

Под научной редакцией
кандидата технических наук В.В. Мельника

Авторский коллектив:

А.Д. Сашурин, В.В. Мельник, А.Е. Балек, Т.Ш. Далатказин, С.В. Усанов,
А.А. Панжин, Р.В. Криницын, И.Л. Озорнин, Т.Ф. Харисов, Ю.П. Коновалова,
А.Л. Замятин, Д.В. Григорьев, А.С. Ведерников, А.В. Усанова, А.В. Зубков,
Е.Л. Сосновская

Рецензенты:

профессор, докт. техн. наук А.А. Козырев;
профессор, докт. физ.-мат. наук А.Ф. Ревуженко,
докт. физ.-мат. наук С.В. Лавриков,
профессор, докт. техн. наук С.Н. Тагильцев

Г 361 Геомеханические аспекты недропользования / А.Д. Сашурин, В.В. Мельник, А.Е. Балек [и др]; под ред. канд. техн. наук В.В. Мельника. — Екатеринбург: УрО РАН, 2022, — 256 с.

ISBN 978-5-7691-2556-0

Рассмотрены вопросы развития деформаций земной поверхности от подземной разработки месторождений полезных ископаемых, проведена оценка возможности использования подработанных территорий для строительства и эксплуатации зданий и сооружений. Представлены результаты многолетних исследований современной геодинамической активности и районирования участков горного массива по степени влияния геодинамики на объекты недропользования, сформирована база данных современных геодинамических движений. Приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния в иерархически блочном массиве скальных горных пород, вмещающем подземное сооружение, внесены усовершенствования в технологические регламенты строительства и эксплуатации подземных сооружений, направленные на повышение безопасности.

Книга может быть полезной большинству специалистов горного профиля, работающих в сфере строительства и эксплуатации инженерных сооружений различной ответственности, а также использоваться в качестве учебного пособия для студентов, магистров и аспирантов.

© УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН, 2022.

© АВТОРЫ, ТЕКСТ, 2022.

© ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА УрО РАН,
2022.

ISBN 978-5-7691-2556-0

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1.	
Место и роль геомеханики в недропользовании	9
ГЛАВА 2.	
Массив горных пород как среда недропользования	16
2.1. Основные понятия и параметры, характеризующие массив горных пород в качестве объекта недропользования	16
2.2. Основные модельные представления о массиве горных пород и его напряженно-деформированном состоянии.....	28
ГЛАВА 3.	
Геофизические методы исследований при изучении современной геодинамической активности. Изучение вещественного состава пород коры выветривания в комплексе геодинамической диагностики горного массива	31
3.1. Геофизические методы, применяемые для выявления, определения пространственных параметров разрывных структур в горном массиве	31
3.2. Геодинамическое районирование горного массива с использованием геофизических методов.....	63
3.3. Изучение вещественного состава пород коры выветривания в комплексе геодинамической диагностики горного массива.....	83

ГЛАВА 4.

Исследование параметров деформаций земной поверхности в зонах обрушения рудных месторождений.....	93
4.1. Обрушение поверхности при безопасной глубине подработки.....	95
4.2. Активизация обрушения поверхности в старой зоне сдвига при комбинированной разработке.....	97
4.3. Обрушения поверхности в условиях сильно обводненной налегающей толщи.....	99
4.4. Обрушения поверхности от исторических разработок.....	102
4.5. Обрушения поверхности при разработке с частичной закладкой.....	105
4.6. Обрушение поверхности при разработке с магазинированием руды.....	107
4.7. Внезапное обрушение поверхности с сейсмическим эффектом.....	110
4.8. Факторы внезапного развития разрушительных деформаций.....	113
4.9. Основные методические концепции геодинамического районирования подработанных территорий по параметрам напряженно-деформированного состояния массива горных пород.....	115
4.10. Выводы по главе 4.....	118

ГЛАВА 5.

Исследование современных геодинамических движений и эволюции деформационных полей на земной поверхности при недропользовании маркшейдерско-геодезическими методами	119
5.1. Современные геодинамические движения массивов горных пород на разных пространственно-временных базах.....	119
5.2. Инструментальные маркшейдерско-геодезические методы исследования современных геодинамических движений	123
5.3. Формирование баз данных современных геодинамических движений массивов горных пород.....	132

5.4. Идентификация и визуализация геодинамических движений и деформационных полей по результатам мониторинговых измерений.....	145
--	-----

ГЛАВА 6.

Выявление механизма воздействия современных геодинамических движений на целостность и устойчивость конструктивных элементов систем разработки	166
--	------------

6.1. Разработка технологии снижения риска и уменьшения тяжести последствий техно-природных катастроф в сфере недропользования ...	166
6.2. Технология снижения риска и уменьшения тяжести последствий техно-природных катастроф	181
6.3. Выводы по главе 6	204

ГЛАВА 7.

Исследование и учет влияния геодинамической активности и иерархической блочности массива на безопасность строительства и эксплуатации подземных сооружений.....	205
--	------------

7.1. Совершенствование модельных представлений о напряженном иерархически блочном массиве скальных горных пород, вмещающем подземное сооружение	205
7.2. Влияние современных геодинамических движений и технологических процессов на возникновение аварийных ситуаций при строительстве и эксплуатации объектов недропользования.....	208
7.3. Совершенствование технологических регламентов строительства и эксплуатации подземных сооружений с использованием новых модельных представлений о геодинамически активном иерархически блочном массиве скальных горных пород	215

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	233
-------------------------	------------

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	238
---------------------------------------	------------

Сведения об авторах.....	255
---------------------------------	------------

*Книга посвящена памяти одного из основоположников Уральской школы геомеханики профессору, доктору технических наук **Анатолию Дмитриевичу Сашурину**, возглавлявшему отдел геомеханики ИГД УрО РАН до 2017 г.*

Введение

Геомеханические процессы, происходящие в земной коре, имеют различные параметры и происхождение, будь то природные или техногенные изменения, однако общим источником техно-природных аварийных ситуаций на объектах недропользования чаще всего являются деформационные процессы в массиве горных пород и на земной поверхности, вызванные современными геодинамическими движениями.

Представлены результаты исследований геомеханического состояния и строения земной коры, даны ключевые понятия и параметры, характеризующие массив горных пород как среду недропользования, выполненные специалистами отдела геомеханики Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

Отдел геомеханики работает по четырем научным направлениям: «Сдвигание горных пород», «Геомеханика подземных сооружений», «Технология снижения риска катастроф при недропользовании» и «Геодинамика и горное давление», все они связаны общим понятием «геомеханика». Методы изучения массива горных пород различаются, применяются современные геодезические и геофизические методы исследований, проводятся натурные измерения напряженно-деформированного состояния массива, выполняется построение геомеханических моделей отработки месторождений полезных ископаемых.

Исследования проводились по пяти логически связанным одной целью темам, отражающим разные стороны многогранной проблемы риска катастрофических процессов, обусловленных формированием и проявлением напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях разных направлений недропользования, на разных масштабных уровнях, с учетом конструктивных особенностей объектов:

• Геофизические методы исследований при изучении современной геодинамической активности. Изучение вещественного состава пород коры выветривания в комплексе геодинамической диагностики горного массива.

• Исследование параметров деформаций земной поверхности в зонах обрушения рудных месторождений.

• Исследование современных геодинамических движений и эволюции деформационных полей на земной поверхности при недропользовании маркшейдерско-геодезическими методами.

• Выявление механизма воздействия современных геодинамических движений на целостность и устойчивость конструктивных элементов систем разработки.

• Исследование и учет влияния геодинамической активности и иерархической блочности массива на безопасность строительства и эксплуатации подземных сооружений.

В первых двух главах монографии обоснованы ключевые понятия и параметры, характеризующие массив горных пород как среду недропользования, определяющие его основные модельные представления.

В исследованиях, представленных в третьей главе, приоритет отводится геофизическим исследованиям роли структурных особенностей массива горных пород и их трансформации в развитии катастрофических ситуаций на объектах недропользования в процессе их строительства и эксплуатации.

В четвертой главе приведены результаты исследований параметров деформаций, происходящих на подрабатываемых подземными горными работами территориях, и прогнозные оценки изменений уровня риска возникновения аварий, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния в пространстве и во времени и в связи с взаимным расположением горных объектов с активными тектоническими нарушениями.

Исследования пятой главы направлены на исследования современных геодинамических движений и эволюции деформационных полей на больших и средних базах с использованием современных методов спутниковой геодезии и многолетних наблюдений за подвижностью территории с использованием данных постоянно действующих базовых станций — это корпоративные станции, как правило, находящиеся в ведении крупных университетов, геодезических компаний, подразделений Ростехинвентаризации и др.

В шестой главе рассмотрен механизм воздействия современных геодинамических движений на целостность и устойчивость конструктивных элементов систем разработки, представлены технологии снижения риска аварийных ситуаций при ведении подземных горных работ.

Седьмая глава посвящается исследованиям формирования напряженно-деформированного состояния и аварийных ситуаций непосредственно вокруг капитальных подземных сооружений, их взаимосвязям с параметрами саморганизующихся блоков в массиве горных пород.

Результаты исследований прошли практическую проверку по прогнозированию опасности развития деформационных процессов на конкретных объектах недропользования и послужили основой разработки мер предотвращения и снижения тяжести последствий при работе горнодобывающих предприятий.

Представленные исследования соответствуют актуальному направлению научно-технологического развития Российской Федерации, перечню приоритетных направлений развития науки, технологии, техники и критических технологий, утвержденному Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899 пункт 21 «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

Авторы глав и разделов монографии:

Введение, заключение, глава 1: к.т.н. В. В. Мельник, проф., д.т.н. А.Д. Сашурин;

Глава 2: д.т.н. А.Е. Балек;

Глава 3: к.т.н. Т.Ш. Далатказин, научн. сотр. А.Л. Замятин, научн. сотр. Д.В. Григорьев, научн. сотр. А.С. Ведерников; научн. сотр. П.И. Зуев.

Глава 4: к.т.н. С.В. Усанов, ст. научн. сотр. Ю.П. Коновалова, научн. сотр. А.В. Усанова;

Глава 5: к.т.н. А.А. Панжин; Н.А. Панжина;

Глава 6: к.т.н. Р.В. Криницын, д.т.н. А.В. Зубков, к.т.н. Е.Л. Сосновская;

Глава 7: д.т.н. А.Е. Балек, И.Л. Озорнин, к.т.н. Т.Ф. Харисов.

ГЛАВА 1.

Место и роль геомеханики в недропользовании

Потребность в геомеханике первоначально как в практическом опыте возникла одновременно с недропользованием, проникновением человека в массив горных пород, в недра для извлечения полезных ископаемых и вызвана была необходимостью обеспечить безопасность пребывания человека в подземных условиях и в открытых разработках на земной поверхности, а также стремлением эффективно осуществлять добычу. Позднее, с развитием масштабов недропользования в XVIII–XX веках, она оформилась как один из важнейших разделов наук о Земле.

По современному сложившемуся определению геомеханика — наука, изучающая механическое состояние земной коры. Предметом ее является напряженно-деформированное состояние массива горных пород в естественном состоянии и закономерности трансформации в областях влияния недропользования. Возникнув из потребностей недропользования, она развивалась вместе с расширением его масштабов, с изменением роли в экономической жизни общества и влиянием на безопасные и комфортные условия жизни.

В обыденном плане, нередко и в настоящее время, под недропользованием подразумевают добычу полезных ископаемых. Такое понятие сложилось исторически, исходя из важности добычи минеральных ресурсов из недр в жизни человеческого общества. Для России эксплуатация богатств недр имеет особое значение. Наша страна является одним из крупнейших производителей минерального сырья, занимая ведущее место по его экспорту.

Однако, исходя из роли недр в современной жизни человека, представление о недропользовании как о деятельности, связанной только с добычей полезных ископаемых, при всей ее важности, пожалуй, будет далеко не полно отражать роль и место недропользования. В соответствии с законодательством, недра являются частью земной коры,

расположенной ниже почвенного слоя, а при его отсутствии — ниже земной поверхности, дна водоемов и водотоков, простирающейся до глубин, доступных для геологического изучения и освоения, то есть на неопределенную глубину [1].

Таким образом, вся деятельность в массиве горных пород ниже определенных законом границ связана с использованием недр и, следовательно, подпадает под понятие «недропользование», существенно расширяя его сферу.

В самом деле, тоннели метрополитенов, железнодорожные, автомобильные и гидротехнические тоннели от горных выработок принципиально отличаются лишь функциональным назначением и соответствующим конструктивным исполнением. А с позиций возникновения катастроф, устойчивости, надежности и безаварийной эксплуатации они, как и горные выработки, зависят от процессов и явлений, происходящих в массиве горных пород, от того, насколько их параметры и принятые крепления соответствуют силовым нагрузкам, сопровождающим эти процессы и явления.

В отличие от тоннелей, являющихся без сомнения объектами недропользования, отнесение других объектов, неразрывно связанных с недрами, в том числе строительного комплекса, железнодорожного и автомобильного транспортов, а также различного рода наземных и подземных коммуникационных сетей и других, на первый взгляд, кажется не столь очевидным. Но в действительности все капитальные сооружения своими основаниями, фундаментами и непосредственным размещением находятся в части массива горных пород, безусловно, относящейся к недрам. Заглубления в массив горных пород у современных зданий и сооружений порой сопоставимы, а иногда и превосходят параметры наземной части. И вопрос состоит не в размерах подземных и наземных объемов объектов и их соотношениях, а в том, что подземной частью, при любых ее параметрах, объекты связаны с процессами и явлениями, происходящими в массиве горных пород, и живут с недрами одной жизнью.

Таким образом, недра - более широкое понятие, чем полезные ископаемые, а недропользование как вид деятельности и его объекты занимают одно из ведущих мест в жизни человека. Будущее городов и населенных пунктов неразрывно связано с освоением и повышением роли подземного пространства, а обеспечение эффективности экономической деятельности, комфортного и безопасного проживания населения во многом определяются уровнем развития геомеханики.

Научное направление «геомеханика» существовало в Институте горного дела с момента его создания в 1939 г. в Уральском филиале АН СССР (тогда Горно-геологический институт). Первым его директором был академик Л. Д. Шевяков, один из основоположников отечественной геомеханики методические разработки которого нередко встречаются в современных проектных работах и в горной практике. Основоположником современного научного направления и Уральской научной школы геомехаников является профессор, доктор технических наук М. Л. Рудаков, возглавивший в 1959 г. лабораторию горного давления и устойчивости бортов карьеров. Его эстафету в 1962 г. принял профессор, доктор технических наук Н. П. Влох, а с 1996 г. научное направление «геомеханика», возглавлял профессор, доктор технических наук А. Д. Сашурин. С 2015 г. отделом геомеханики в составе четырех научных лабораторий руководит В. В. Мельник.

Эффективность и безопасность недропользования, являющегося важнейшим источником удовлетворения потребностей современного общества в сырье и материальных ресурсах, а также в создании комфортных и безопасных условий проживания и проведения устойчивой безаварийной промышленно-экономической деятельности, во многом зависит от достоверности теоретических представлений о напряженно-деформированном состоянии и вызываемых им деформационных процессов в массиве горных пород. Актуальность этой взаимосвязи определяется ролью и местом, занимаемым недропользованием в жизни общества.

Среди процессов и явлений, сопровождающих формирование напряженно-деформированного состояния при недропользовании, ключевая роль в развитии катастрофических ситуаций принадлежит деформационным процессам. Объединяя деформационные процессы в массиве горных пород при недропользовании в понятие «сдвигание горных пород», один из основоположников российской геомеханики И. М. Бахурин отмечал в начале прошлого века «Сдвигание пород в руднике является одним из основных затруднений при добыче полезного ископаемого. Оно же является одной из основных угроз безопасному ведению горных разработок: оно ломает крепление, уменьшает полезное сечение выработок, а иногда и совершенно заваливает их. Мы не ошибемся, если скажем, что вся история горного дела, вся история изыскания наилучших систем разработок есть история борьбы со сдвижением горных пород» [2].

Начало научных исследований и дискуссий по формированию напряженно-деформированного состояния массива горных пород при ведении горных разработок П. М. Леонтовский и И. М. Бахурин относят к 1838–1858 гг., когда была предпринята попытка научно объяснить повреждения жилых домов в городе Льеже вследствие ведения добычи угля подземным способом под городом. Ученые в области геомеханики того времени наделяли массив только его собственным весом, не предполагая в нем никаких других напряжений и деформаций [2, 3].

Очередным шагом в развитии представлений о параметрах напряженно-деформированного состояния массива горных пород в конце девятнадцатого века явилась гипотеза швейцарского геолога-глюциолога А. Гейма [4].

Согласно его гипотезе, вертикальные напряжения и деформации в массиве горных пород в естественных условиях, не подверженных влиянию техногенной деятельности, также определяются весом налегающих пород, но в дополнение к ним возникают горизонтальные компоненты, боковой распор, обусловленный допускаемыми в его гипотезе некоторыми пластичными свойствами массива. В последующем в ней предлагалось дифференцировать боковой распор за счет сохранения упругих свойств массива [5].

Простота гипотезы обеспечила ей продолжительный период применения в горной практике. Несмотря на серьезные расхождения с экспериментальными исследованиями напряженно-деформированного состояния в натуральных условиях, широко проводившимися в середине прошлого века и выявившими горизонтальные тектонические составляющие, нередко превышающие гравитационные, гипотеза А. Гейма с некоторыми поправками по боковому распору нередко применяется в современных проектах недропользования.

Углубленные исследования структуры массива горных пород, выявившие основополагающее его свойство — иерархически блочное строение, внесли новые представления о формировании напряженно-деформированного состояния, в частности, дискретность и неоднородность поля напряжений и деформаций [6, 7].

Последующее внедрение в практику геомеханических исследований технологии спутниковой геодезии позволило установить второе основополагающее свойство массива горных пород — его постоянную подвижность под воздействием современных геодинамических движений [8–12].

Таким образом, исследования, проведенные многими поколениями геомехаников приблизили теоретические представления к реальным процессам и явлениям, сопровождающим недропользование.

Сложность процессов и явлений, сопровождающих недропользование, проистекающих от экзогенных и эндогенных факторов, определяют междисциплинарный подход к решению геомеханических проблем и привлечение методов из других научных направлений. В современной практике, как и в предыдущие периоды, не потеряли своего значения теоретические исследования, а также методы физического моделирования, в том числе на эквивалентных и фотоупругих материалах. Все большее место в исследованиях в последние годы отводится компьютерному моделированию.

Несмотря на все расширяющееся внедрение методов, основанных на компьютерных технологиях, по-прежнему не теряют своего значения как основного источника информации о реальном массиве и происходящем в нем процессах экспериментальные натурные методы по измерениям напряжений и деформаций, в том числе исследования структуры массива горных пород геофизическими методами зондирования.

Значительный шаг в познании закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и верхней части литосферы на разных масштабных уровнях обеспечило внедрение в геомеханические исследования наземных и спутниковых геодезических технологий мониторинга деформационных процессов, позволившее выявить новые знания о неоднородности напряженно-деформированного состояния по земной территории и изменчивости во времени.

Современные представления о состоянии массива горных пород и происходящих в нем процессах, определяющих во многом эффективность и безопасность недропользования, основываются на двух основополагающих свойствах массива горных пород, установленных в результате многолетних предшествующих исследований в геомеханике:

— иерархически блочной структуре, присущей в полной мере всем крепким скальным породам и на определенном уровне проявляющейся в слабых осадочных породах;

— непрерывной подвижности блоков, вызванной современными геодинамическими движениями циклического и трендового характеров.

Под влиянием современных геодинамических движений иерархически блочный массив горных пород претерпевает процесс самоорганизации, формирующий временно консолидированные блоки и соответствующее мозаичное, неоднородное поле напряженно-деформированного состояния. Особую опасность для объектов недропользования представляют граничные области образовавшихся вторичных структур, где явления концентрации и депрессии могут вызвать отклонения параметров напряжений и деформаций в 2–5 раз отличающиеся от усредненных интегральных и внутриблочных значений.

Установленные представления о реальном напряженно-деформированном состоянии позволяют выявить истоки и причины аварийных и катастрофических событий в практике недропользования, не находящие объяснения с позиций однородной структуры полей напряжений и деформаций. Знание истоков и причин аварий и катастроф открывает возможности принятия мер по их предупреждению [13–15].

Полученные результаты фундаментальных и прикладных исследований выдвигают перед геомеханикой новые проблемы и задачи, направленные на выполнение основной ее цели — обеспечение эффективности и безопасности недропользования, что является составной частью в обеспечении безопасного и комфортного проживания населения:

- разработать научный подход и провести районирование территорий по критерию опасности техно-природных катастроф под воздействием современных геодинамических движений;
- исследовать закономерности формирования самоорганизующихся блоков;
- разработать методы исследования деформационных процессов на разных территориальных масштабах;
- разработать методы исследования структуры массива горных пород дистанционным зондированием;
- разработать технологию выбора благоприятных мест размещения объектов недропользования и предотвращения техно-природных катастроф.

Безопасность и эффективность сферы недропользования, которым посвящается научная и практическая работа отдела геомеханики, во многом определяются соответствием представлений о напряженно-деформированном состоянии, используемых в практи-

ческой деятельности, реальным процессам и явлениям, происходящим в естественном массиве горных пород и в областях влияния недропользования.

Результаты длительных научных исследований свидетельствуют, что реальное напряженно-деформированное состояние массива горных пород существенно отличается от теоретических гипотез и представлений, бытовавших на разных этапах развития геомеханики, рассматривавших массив горных пород как сплошную однородную среду с соответствующим однородным неразрывным постоянным во времени полем напряжений и деформаций. Современные представления о формировании напряженно-деформированного состояния, учитывающие влияние двух основных факторов — иерархически блочной структуры массива горных пород и его непрерывную подвижность под воздействием современных геодинамических движений, приближают теоретические представления к реальным условиям. В соответствии с ними реальное поле напряженно-деформированного состояния имеет дискретную, неоднородную, мозаичную структуру, изменяющуюся во времени. Использование этого представления повышает эффективность принятия мероприятий по предупреждению аварий и катастроф при недропользовании.

ГЛАВА 2.

Массив горных пород как среда недропользования

2.1. Основные понятия и параметры, характеризующие массив горных пород в качестве объекта недропользования

В качестве физико-механической среды и главного объекта недропользования массив горных пород определяется следующими базовыми составляющими:

- 1) Физическими и химическими свойствами слагающих его горных пород и грунтов.
- 2) Особенности структурного строения.
- 3) Особенности его напряженно-деформированного состояния (НДС).

Все составляющие отличает чрезвычайно высокая степень неоднородности. Без преувеличения можно утверждать, что в ряду других областей механики деформируемых сред механика массива горных пород имеет дело с наиболее сложным объектом изучения. Даже небольшие образцы горной породы, такие как отрезки керна, представляют собой композитную и многофазную среду, состоящую из различных минеральных элементов — зерен, с отличающимися друг от друга физическими свойствами, и из дизъюнктивных нарушений различного рода: трещин, микротрещин, пор. При рассмотрении же более крупномасштабных породных объемов — массивов горных пород, вмещающих подземные выработки, выработанные пространства, карьеры и другие объекты недропользования, наглядно проявляется блочное строение, обусловленное многочисленными структурными неоднородностями и нарушениями: независимыми и сопряженными системами трещин, разломами, зонами дробления, интрузиями и пр. К этому добавляются неоднородности, обусловленные литологической изменчивостью пород: их химического состава и текстуры,

различной степенью эрозии и обводненности, вторичной (например, гидротермальной) минерализацией открытых трещин и т.п. Наличие структурных неоднородностей различных размеров приводит к так называемой масштабной неоднородности: качественно и количественно различным свойствам горного массива при различных объемах его деформирования и базах проведения инструментальных исследований.

При этом, в отличие от конструкционных и строительных материалов, масштабная неоднородность массивов горных пород обладает выраженной иерархичностью. Имеется в виду, что крупные породные структуры, начиная от тектонических плит, сформированы из структурных блоков меньших размеров, оконтуренных структурными неоднородностями менее масштабного иерархического уровня, а те, в свою очередь, разбиты на призмобразные структурные блоки еще более мелких размеров, которые включают в себя следующий иерархический уровень, и так далее вплоть до зерен и кристаллов породообразующих минералов, дефектов структуры междолинных областей и дислокаций молекулярных решеток.

Масштабная неоднородность и блочность горного массива обуславливают пространственно-временную неоднородность напряженно-деформированного состояния, вызванного различного рода внешними силами при его взаимодействии с другими телами и объектами. Это могут быть как поверхностные силы в форме рассредоточенного давления или отдельных точечных нагрузок, приложенных к поверхности рассматриваемой области горного массива, так и объемные массовые силы, воздействующие на все без исключения внутренние точки среды, например: силы гравитации, инерции, магнитные силы и др. Под действием внешних сил горный массив, как и любое твердое тело, изменяет форму и объем, в результате чего возникают внутренние силы, противодействующие «изнутри» нагружаемого объема на единицу площади его поверхности и стремящиеся к восстановлению его прежней формы. Эти внутренние силы, именуемые напряжением, отражают механическую связь между отдельными структурными элементами нагруженной среды. Напряженно-деформированное состояние среды определяется величинами взаимных перемещений отдельных ее точек и значениями приращений напряжений в пространстве и во времени.

Таким образом, внутренние силы — напряжения, являющиеся основным предметом исследования геомеханики, по самой своей

физической природе неоднородны, поскольку могут возникать лишь в местах соприкосновения между отдельными структурными элементами горного массива: на контактах между минеральными зёрнами, на плоскостях контактов между структурными блоками, тектоническими нарушениями и пр. Кроме того, вследствие сложной конфигурации междублоковых контактов на одних участках происходит местная концентрация напряжений, а на других – их частичная разгрузка. Таким образом, неоднородность напряженно-деформированного состояния горного массива заведомо превышает степень неоднородности его структурного строения.

В связи со сложностью изучаемых процессов в геомеханике исключительно важная роль отводится задаче построения моделей, адекватно отображающих объект исследования в упрощенной и схематизированной форме. Имеется в виду принятое в философии понятие [16]: «...мысленно представляемая или материально реализуемая система, которая, отражая и воспроизводя объект исследования, замещает его так, что ее изучение дает новую информацию об этом объекте». К этому определению следует добавить: «... и дает возможность решить поставленную практическую задачу с требуемой степенью точности». Необходимость вводимого уточнения можно пояснить на таком очевидном факте, что, например, модели, построенные на основе релятивистской механики Эйнштейна, несомненно более адекватно воспроизводят реальные объекты и дают более точную информацию о них, однако при решении большинства практических задач все же имеет смысл применять модели, основанные на классической механике Ньютона.

При построении модели все несущественные для решения рассматриваемой практической задачи факторы игнорируются, а существенные переводятся на язык математических идеализаций и схематизаций для достижения требуемой степени точности и доказательности обобщений. Применительно к массивам горных пород указанные положения одним из первых были сформулированы Л.Б. Розовским [17], который выделил следующие общие требования:

- модель должна отражать все существенные черты строения и свойств пород;
- модель должна быть простой и удобной для использования;
- модель должна быть пригодной для расчетов существующими методами;

— параметры, входящие в модель, должны определяться применяемыми в практике методами.

В целом построение любой, в том числе и геомеханической, модели объекта исследований включает в себя следующие этапы:

1) Анализ определяющих факторов на предмет их влияния на решение поставленной практической задачи и, соответственно, целесообразности их отражения в модели.

2) Обоснование базовой гипотезы для построения модели путем обобщения, систематизации и комплексного анализа имеющихся в наличии экспериментальных данных и теоретических положений.

3) Определение необходимого минимума вводимых в модель параметров и граничных условий с выделением тех из них, для определения которых требуются дополнительные изыскания.

4) Определение недостающих параметров модели и оценка допустимости базовой гипотезы и принятых элементов идеализации и схематизации на основе их непротиворечивости тем физическим закономерностям, которые устанавливаются в процессе исследований.

5) Проверка пригодности модели для решения поставленных практических задач и, соответственно, адекватности ее параметров объективной реальности, выполняемая путем сопоставления данных теоретических и экспериментальных исследований с практикой.

Основная практическая задача геомеханического обеспечения недропользования сводится к адекватному отображению взаимодействия соответствующих геотехнологических факторов с модельными представлениями о напряженном массиве горных пород. Прежде всего — с параметрами механического состояния, связывающими между собой компоненты напряжений и деформаций, действующих в горном массиве, и их пространственно-временные характеристики. Эти параметры увязываются с геотехнологическими факторами, т.е. со всем комплексом показателей, характеризующим динамику ведения горных работ в процессе недропользования. Для решения же данной задачи необходимо уточнить базовые понятия и определения, характеризующие массив горных пород как среду действия прикладываемых сил, напряжений, развития деформаций, сдвижений и разрушений.

Кроме конкретизации и упорядочения терминологии это позволяет выделить перспективные направления дальнейших исследований, поскольку понятийный аппарат, стихийно складывающийся в процессе развития той или иной науки, является хорошим отражением

ее «узких мест». В геомеханике это отражается в наличии неоднозначных толкований и разночтений в действующих нормативных документах и справочниках, в частности: в ГОСТ Р 50544-93 «Горные породы. Термины и определения» [18], ГОСТ 25100-2011. «Грунты. Классификация» [19], в Горной энциклопедии [20] и пр.

В первую очередь следует разобраться с определениями самых главных терминов: **горная порода** (англ. — *rock*) и **грунт** (англ. — *ground, soil and rock*). В ряде источников они представляются как качественно различные понятия. Между тем ГОСТ [18] определяет грунт как «любую горную породу, залегающую преимущественно в пределах зоны выветривания и являющуюся объектом инженерно-строительной деятельности человека».

Аналогично в ГОСТе [19] грунт определяется как «любые горные породы, почвы, осадки и техногенные образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамические системы и как часть геологической среды и изучаемые в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью человека».

Практически идентичное определение грунтов приводит и Горная энциклопедия.

Таким образом, из нормативных определений следует, что различия в терминах сугубо стилистические: «грунт» главным образом характеризует инженерный объект, а «порода» — геологический. В настоящей работе они будут рассматриваться как синонимы.

Противоречие в ГОСТах есть с количественными различиями между скальными и полускальными породами (грунтами). Согласно ГОСТу [18] скальная горная порода должна иметь предел прочности при одноосном сжатии более 30 МПа, и полускальная — от 5 до 30 МПа. Согласно же ГОСТу [19] скальные грунты, которые характеризуются «жесткими структурными связями кристаллизационного и/или цементационного типа», имеют предел прочности при одноосном сжатии более 5 МПа, а полускальные грунты, соответственно, менее 5 МПа. Для геомеханики данные разночтения существенного значения не имеют. Главное, что механические свойства скальных грунтов и пород практически не зависят от увлажнения и им присущ преимущественно хрупкий характер разрушения, а полускальным и нескальным — пластический.

Определенные разночтения наблюдаются и с понятием, характеризующим совокупность пород и грунтов, т.е. с горным массивом. В ГОСТе [18] имеет место излишняя детализация: объект подразде-

лен на **массив горных пород** (англ. — *massif of rocks*), определяемый как «часть земной коры, состоящая из совокупности горных пород, сформировавшихся в определенной геологической обстановке, характеризующаяся присущими ей физическими, химическими и геологическими параметрами», и на **породный массив** (англ. — *rock massif*) — «часть земной коры, подверженная влиянию горных работ». Однако в прочих справочных материалах, в том числе зарубежных, такого разделения нет, и все эти термины вполне обоснованно рассматриваются как синонимы.

Иногда, правда, отдельно выделяют «рудный» массив, отличая его от массива «породного», под которым понимают массив, вмещающий рудную залежь. Но такое разделение оправдано лишь для отдельных задач геотехнологии.

Вместе с тем существующие нормативные определения имеют гораздо более существенное упущение: в них не отражен пространственный масштаб выделяемого породного объема. А масштаб этот должен быть задействован обязательно, поскольку он связан с *коэффициентом структурного ослабления* (англ. — *structure attenuation factor*): «параметром, характеризующим степень отличия прочности породного массива от прочности образца горной породы» [18]. Но тут далеко не все ясно даже с размерами самого породного образца, который определяется как *представительный объем* (англ. — *representative volume*) горной породы: «наименьший объем, достоверно характеризующий свойства, состав и строение горной породы».

Согласно новейшим ГОСТам по лабораторным испытаниям пород (в частности, актуализированным в 2013–2014 гг.: ГОСТ 21153.2-84* «Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном сжатии», ГОСТ 28985-91 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии», ГОСТ 21153.5-88 «Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием», ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» [21–24]) варьирование размеров, испытываемых цилиндрических или призматических образцов горных пород и грунтов допускается в довольно широких пределах. Диаметр или сторона квадрата основания образца может изменяться от 30 до 75–90 мм (при предпочтительном размере 42 ± 2 мм), а для полускальных грунтов даже до 100 мм. Такая неопределенность обусловлена требованием, чтобы диаметр образца или сторона квадрата его основания по крайней

мере десятикратно превышали размер зерен и неоднородностей, слагающих испытываемую породу — грунт.

Между тем, как свидетельствует опыт лабораторных исследований, при таком варьировании размерами образцов замеряемые прочностные и деформационные характеристики одной и той же породы изменяются весьма существенно. Так, например, в лабораторных испытаниях серпентинитов ДОН ГОКа при увеличении диаметра и сторон квадрата основания образцов от 30 до 140 мм (Рис 2.1) предел их прочности уменьшался в 5–8 раз.

Но самая главная сложность заключается в том, что объемы массивов горных пород, выделяемые при решении различных научных и прикладных задач, в зависимости от поставленных целей и масштабов объектов недропользования могут отличаться в десятки и сотни раз. Очевидно, что при иерархически блочном строении горного массива в таких условиях о каком-либо универсальном коэффициенте структурного ослабления речи быть не может. И не в последнюю очередь это связано с неопределенностью самого понятия «структурный блок горной породы».

В геотехнологии понятия «блок» и «отдельность», равно как «тектонический блок», «оползневой блок», «блок отдельности» и пр., зачастую смешиваются. Согласно ГОСТу [18], **структурный блок** (англ. — *structural block*) горной породы определяется как «часть массива горных пород, ограниченная системой естественных трещин», а

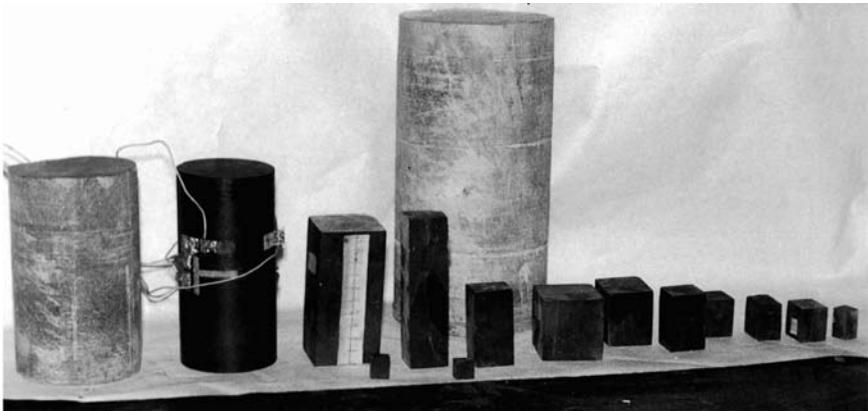


Рисунок 2.1. Образцы серпентинитов ДОН ГОКа, приготовленные для проведения лабораторных испытаний

породная отдельность (англ. — *parting*) — как «кусоч горной породы характерной формы, обусловленной генезисом, образующийся в результате разрушения по естественным плоскостям ослабления». В соответствии же с ГОСТом [19] структурный тектонический блок — это «совокупность скальных грунтов, отделенная от соседних блоков разрывами или трещинами», а блок отдельности — «часть массива скальных грунтов, ограниченная трещинами, свойства которой могут быть охарактеризованы лабораторными исследованиями образца скального грунта». В последнем определении вновь предпринимается попытка увязать характеризующее понятие со свойствами породных образцов. Непродуктивность такого подхода только что была показана.

Вместе с тем наиболее существенный недостаток всех нормативных определений состоит в том, что блочность в них рассматривается не как универсальное, изначально присущее любым породным массивам свойство, а как степень их нарушенности в конкретный момент времени. Такой подход вполне оправдан при решении практических задач геотехнологии, в первую очередь методов дробления горных пород, сейсмоки, гидро- и газодинамики. Однако для задач геомеханики и геодинамики более важной является потенциальная возможность концентрации деформаций и развития процессов разрушений на трещинах и дислокациях, с последующим согласованным деформированием и смещением того или иного объема массива в качестве целостного структурного образования, вне зависимости от степени его сплошности, трещиноватости и прочностных свойств на конкретный момент времени. Поэтому в данной работе под блочностью будет пониматься любое разделение горных массивов поверхностями нарушений и дислокаций самого различного вида: тектоническими разломами, разрывными нарушениями, естественными и техногенными трещинами и т.п., в том числе и такими, которые сразу визуально не обнаруживаются, но проявляются при последующих механических воздействиях.

При таком подходе характеристика блочности оказывается напрямую зависима от механического состояния горного массива: **напряженно-деформированного состояния** (англ. — *stressed and strained state*) — «совокупности компонентов напряжений и деформаций, возникающих в нем вследствие механического нагружения» [18]. Вследствие иерархически-блочного строения реального породного массива пространственно-временное распределение механических напряжений, именуемое **полем механических напряжений**

(*mechanical stress field*), также имеет иерархическую структуру, что и отражено в современных нормативных определениях.

Согласно ГОСТу [18] действующие в горной породе напряжения подразделяются на **структурные** (*structural stress*) и **текстурные** (*texture stress*), представляющие собой средние механические напряжения и возникающие, соответственно: «в минеральных зернах горной породы, уравнивающиеся в минеральном агрегате и вызванные различием свойств породообразующих минералов» и «в минеральных агрегатах горной породы, уравнивающиеся в представительном объеме и вызванные различием свойств минеральных агрегатов». А поскольку из представительных объемов (которые, как уже отмечалось, в ГОСТах отождествляются с понятием «породные образцы») формируются более крупномасштабные структуры, то вполне логично распространить данный подход и на определение напряженного состояния всей иерархии структурных блоков горного массива, вплоть до литосферных плит. Таким образом, в каждом структурном блоке горного массива, независимо от его масштабного ранга, уравниваются напряжения, вызванные различием свойств формирующих его структурных блоков более мелкомасштабных рангов, определяемые его положением в системе более крупномасштабных блоков и, соответственно, параметрами напряженного состояния на их границах.

Очевидно, что аналогичный «иерархически-блочный» подход должен распространяться и на пространственно-временное распределение в горном массиве **поля деформаций** (*deformation field*) всех видов: линейной, сдвиговой и объемной, представляющей собой «показатель изменения размеров, формы и объема куска или породного массива в результате воздействия внешних факторов» [18].

Процессы деформирования иерархически-блочной среды по определению должны быть неразрывно связаны с процессами ее повреждения и разрушения (дезинтеграции), что приводит к переходу в некое опасное состояние, именуемое предельным. Однако данные понятия в ГОСТы не включены, поскольку для них не существует четкого физического описания.

Представленное в Горной энциклопедии [20] определение **разрушение горных пород** (англ. — *rock breaking*) как «нарушение сплошности природных структур горных пород под действием естественных и искусственных сил» не учитывает структурную блочность реальных горных массивов и, соответственно, изначально, т.е. еще до при-

ложения нагрузки, отсутствие этой самой физической сплошности. С другой стороны, оно не учитывает того, что вдали от естественных или искусственных плоскостей обнажения и, соответственно, в отсутствие условий для обрушения породных отдельностей, деформируемый горный массив в целом сохраняет математическую сплошность при любой степени трещиноватости и раздробленности (дезинтеграции).

По этим причинам многочисленные критерии разрушения, используемые в инженерной практике и отражающие различные теории прочности, применимы лишь для конкретных и заранее оговоренных материалов и процессов. Так, например, при нагружении конструкций и массивов из несвязанных между собой блоков (типа «сухой» кирпичной кладки, блочных фундаментов, египетских пирамид и т.п.) до тех пор, пока не начались взаимные подвижки отдельных блоков, модель деформируемой среды при инженерных расчетах в целом вполне обоснованно рассматривается как математически сплошная. Под разрушением такого рода сред и конструкций понимается возникновение условий для взаимных смещений блоков. Когда эти условия изменяются (например, меняется угол воздействия нагрузки) и взаимные смещения блоков прекращаются, то среду снова рассматривают как сплошную. В этом случае реализуется явление «консолидации» деформируемой блочной среды.

Сходный механизм проявляется при деформировании горных массивов, устойчивость которых во многом зависит от условий сцепления и трения контактов между взаимно смещающимися породными блоками. Аналогично этому и в геотектонике, при рассмотрении вопросов сейсмоактивности различных регионов Земли, в условиях постоянных движений структурных блоков земной коры и повсеместных проявлений микросейсмичности, понятия целостности и разрушения деформируемой среды всецело зависят от рассматриваемых пространственных и временных масштабов.

Таким образом, термин «разрушение» — это не более чем общепринятое в быту и инженерном сообществе нечеткое понятие, значение которого определяется конкретными условиями нагружения и деформирования твердых тел. В данной работе под этим термином будет пониматься переход рассматриваемого породного объема в новое механическое состояние, именуемое запредельным или постпиковым (англ. — *post-peak*), при котором необратимо (а если быть точным, то на некий достаточно длительный период времени) ухудшается его

способность противостоять внешней механической нагрузке. Это состояние проявляется в снижении напряжений в условиях роста запредельных деформаций, и происходит как с необратимой утратой сплошности среды за счет хрупкого трещинообразования и дезинтеграции, так и с необратимыми пластическими деформациями, т.е. с деформациями без видимой утраты сплошности нагружаемого породного объема. На диаграмме механического состояния это соответствует переходу кривой «напряжения — деформации» на запредельную ветвь. Разрушающие механические нагрузки при этом могут быть самых различных видов: сжимающие, растягивающие, статические, динамические, однонаправленные, повторно-переменные и т.п.

Процессы разрушения, происходящие под действием несиловых факторов, таких как выветривание, эрозия, метаморфизм и пр., в данной работе рассматриваться не будут, равно как и различного рода технологические процессы: поверхностное разрушение (истирание), скалывание, дробление и т.п.

Дело в том, что сам по себе предмет исследований геомеханики в основном распространяется на механические процессы, происходящие в горном массиве под действием так называемого **горного давления** (англ. — *rock pressure*) — «совокупности механических напряжений в породном массиве, обусловленных воздействием естественных внешних факторов и их перераспределением в процессе отработки месторождения» [18]. Соответственно, во избежание путаницы по возможности следует избегать смешивания геомеханических характеристик горных пород со сходными понятиями, используемыми в геотехнологии.

Так, представленные в ГОСТе [18] геомеханические характеристики, в частности:

— **прочность горной породы** (*strength of a rock*) — предельное напряжение, при котором происходит разрушение горной породы;

— **длительная прочность горной породы** (*long-term strength of a rock*) — предел прочности горной породы при соответствующей длительности действия нагрузки;

— **предельная деформация горной породы** (*destroying deformation*) — максимальная деформация горной породы при нагрузке, равной ее пределу прочности;

— **запредельная деформация горной породы** (*behind limit deformation*) — деформация горной породы после ее разрушения за пределом прочности;

— **модуль спада горной породы** (*modulus of decrease*) — коэффициент пропорциональности между напряжениями и продольными запредельными деформациями горной породы и т.п. желательно разделять со сходными геотехнологическими характеристиками, а именно:

— **контактная прочность горной породы** (*contact strength*) — параметр, характеризующий сопротивляемость поверхностного слоя горной породы разрушению при внедрении индентора в необработанную поверхность;

— **крепость горной породы** (*toughness*) — горно-технологическое свойство, характеризующее сопротивляемость горной породы разрушению в процессах горного производства;

— **твердость горной породы** (*hardness*) — параметр, характеризующий сопротивляемость поверхностного слоя горной породы разрушению или деформированию;

— **дробимость горной породы** (*crushability*) — параметр, характеризующий разрушаемость горной породы приложением к ней динамических нагрузок и т.п.

Это же касается и фигурирующего в паспорте специальности ВАК 01.02.04 «Механика деформируемого твёрдого тела» термина **механическое повреждение**, представляющего нечеткое и скорее юридически-правовое понятие, которое в геомеханике практически не употребляется.

В действующих нормативных документах нет единого определения и для понятия **предельное состояние** (англ. — *limit state design*; — *load and resistance factor design*), под которым обычно понимается такое состояние нагружаемого породного объема или объекта недропользования, при котором они перестают удовлетворять нормативным требованиям вследствие физической невозможности, недопустимости или нецелесообразности дальнейшей эксплуатации. Однако для различных объектов и, соответственно, при различных нормативных требованиях условия перехода в предельное состояние могут быть самыми разными.

Как правило, предельное состояние определяется исчерпанием несущей способности объекта и, соответственно, совпадает

— с пределом пропорциональности или упругости — для хрупкого разрушения;

— с пределом текучести — для пластического деформирования;

— с пределом выносливости — для усталостного разрушения.

Вместе с тем на практике нередко и другие нормативные критерии, при которых ограничивается эксплуатация объекта или исчерпывается ресурс его долговечности, в частности вследствие предельного уровня пластических деформаций, амплитуды колебаний, раскрытия трещин и т.п.

В итоге на основании проведенного анализа базовых понятий и определений, характеризующих напряженный массив горных пород как главный объект геомеханики, можно сделать вывод, что вести речь о физико-механических свойствах или напряженно-деформированном состоянии какой-либо определенной точки массива в принципе некорректно. Можно говорить лишь о средних значениях тех или иных параметров для рассматриваемой конечной области массива, напряженно-деформированное состояние которой определяется суперпозицией разномасштабных полей напряжений и деформаций, каждое из которых соответствует своему иерархическому уровню. В зависимости от специфики решаемой геотехнологической задачи, один и тот же горный массив объективно будет характеризоваться различными физико-механическими свойствами и напряженно-деформированным состоянием, которые определяются пространственными и временными масштабами рассматриваемого объекта недропользования и, соответственно, масштабами его взаимодействия с окружающей средой: размерами области деформирования и разрушения, продолжительностью и интенсивностью этих процессов и т.п.

Разработка таких модельных представлений о массиве горных пород, которые учитывали бы все эти факторы с необходимой и достаточной для решения практических задач степенью идеализации и схематизации, и является одной из основных задач геомеханики.

2.2 Основные модельные представления о массиве горных пород и его напряженно-деформированном состоянии

Создание универсальной обобщенной модели, отображающей поведение такого сложного объекта, как горный массив: неоднородного, иерархически блочного, повсеместно в той или иной степени трещиноватого, зачастую представленного разнотипными литологическими разностями, и вдобавок ко всему находящемуся в объемном

напряженном состоянии — представляет собой чрезвычайно трудную задачу. В этой связи на протяжении всей истории развития геомеханики разрабатывались специализированные теоретические положения, отражающие отдельные особенности механического состояния горных пород и их массивов, наиболее существенные и значимые в конкретных условиях. Единый же физический процесс нагружения, деформирования и разрушения подразделялся на следующие основные направления:

1) Исследования процессов допредельного деформирования, под которыми понимаются обратимые изменения размеров и формы нагружаемого породного объема, происходящие до достижения предела его прочности, как в линейно-упругом режиме, т.е. без утраты сплошности среды, так и в нелинейно-упругом — с временной утратой сплошности за счет обратимого раскрытия трещин.

2) Исследования процессов разрушения, под которыми понимается запредельное деформирование нагружаемого породного объема, происходящее за пределами его прочности, как с необратимой утратой сплошности среды за счет хрупкого трещинообразования и дезинтеграции, так и с необратимыми пластическими деформациями — без видимой утраты сплошности.

3) Исследования параметров структурного строения горного массива.

4) Обоснование источников и закономерностей формирования горного давления.

Решение практических задач геомеханического обеспечения объектов недропользования сводилось к совместному анализу закономерностей формирования в горном массиве полей напряжений, изменяющихся в процессе строительства и эксплуатации объектов, а также закономерностей, отражающих механизм деформирования и разрушения вмещающих пород под действием этих напряжений. В задачу же идеализированной математической модели входило отображение напряженно-деформированного состояния горного массива в виде систем уравнений, решаемых либо в строгом аналитическом виде, либо с помощью тех или иных приближенных численных методов. По мере совершенствования техники вычислений решались как двухмерные геомеханические задачи — для условий плоско-деформированного или плоско-напряженного состояния, так и трехмерные — для условий объемного нагружения и деформирования.

При разработке геомеханических моделей напряженно-деформированного состояния горного массива в той или иной степени использовались следующие допущения и упрощения:

1) Гипотеза о сплошности: среда непрерывно заполняет весь рассматриваемый объем пространства.

2) Гипотеза об однородности и изотропности: физико-механические свойства среды во всех точках и по всем направлениям одинаковы и не зависят от пространственных и временных масштабов нагружения и деформирования.

3) Гипотеза об идеальной упругости: деформируемый объем среды полностью восстанавливает свою первоначальную форму и размеры сразу же после устранения причин, вызвавших деформацию.

4) Гипотеза о справедливости закона Гука: перемещения точек деформируемого объема среды прямо пропорциональны силам, вызывающим эти перемещения.

5) Гипотеза о малости деформаций: деформации среды настолько малы, что не оказывают значимого влияния на взаимное расположение прикладываемых внешних нагрузок.

6) Принцип суперпозиции (независимости действия внешних сил): результат воздействия нескольких внешних факторов равен сумме результатов воздействия каждого из них, прикладываемого в отдельности, и не зависит от последовательности их приложения.

7) Принцип Сен-Венана: в точках среды, достаточно удаленных от мест приложения нагрузки, деформация не зависит от конкретного способа нагружения и определяется только статическим эквивалентом нагрузки.

ГЛАВА 3.

Геофизические методы исследований при изучении современной геодинамической активности. Изучение вещественного состава пород коры выветривания в комплексе геодинамической диагностики горного массива

Геофизические методы используются при изучении современной геодинамической активности для выявления, определения пространственных параметров разрывных нарушений в горном массиве и для его предварительного геодинамического районирования.

3.1. Геофизические методы, применяемые для выявления, определения пространственных параметров разрывных структур в горном массиве

Электротомография

Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) являются основной методикой исследований, направленных на изучение горизонтально-слоистых разрезов. Развитие этого метода привело к появлению новой методики, которая нацелена на изучение сложнопостроенных сред и которая позволяет проводить интерпретацию в рамках двумерных и трехмерных моделей [25, 26].

Электротомография — это набор методик, включающий как методику полевых наблюдений, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных. Ее особенностью является многократное использование в качестве питающих и измерительных одни и те же фиксированные на профиле наблюдения положения электродов. Такой подход позволяет, с одной стороны, работать с современной высокопроизводительной аппаратурой, а с другой стороны, применять эффективные алгоритмы моделирования и инверсии.

Интерпретацию данных электротомографии проводят в рамках двумерных и трехмерных моделей. Это принципиально расши-

рывает круг решаемых электроразведкой задач за счет исследования сред, значительно отличающихся от «классических» горизонтально-слоистых [27].

Методика электротомографии, благодаря использованию высокой плотности наблюдений, позволяет существенно повысить разрешение, особенно в горизонтальном направлении.

Разрешающая способность (т.е. количество деталей геоэлектрического разреза, устойчиво проявляющихся в электрическом поле) и, соответственно, качество интерпретации данных электротомографии тесно связано с числом и плотностью измерений на одном профиле. Их число обычно достигает первых тысяч, поэтому вопрос о производительности полевых измерений имеет принципиальное значение и во многом определяет возможность практического использования этого метода. Для достижения максимальной эффективности при проведении полевых работ применяется специальная аппаратура с программируемой автоматической коммутацией электродов [28–29]. Применение двумерной электроразведки целесообразно при всех детальномасштабных (масштаб 1:2000 и крупнее) геофизических исследованиях, в том числе при инженерно-геологических и гидрогеологических изысканиях.

Для изучения геоэлектрических разрезов, значительно отличающихся от горизонтально-слоистых, применение электротомографии является необходимым условием для надежной интерпретации. Такое сложное строение характерно для зон тектонических нарушений, оползней, насыпных и искусственных грунтов в зонах городской застройки, многолетнемерзлых пород, при крутом падении слоев и при наличии карста.

В качестве примера приведем методику двумерных измерений для электротомографической 48-канальной станции. Измерения выполняются по профильным линиям. Каждая профильная линия может состоять из нескольких расстановок. Необходимо предусмотреть перекрытие расстановок. На каждой расстановке в работе используется до 48 заземленных электродов. Если шаг между электродами был выбран 3 м, соответственно полная длина одной расстановки составит 141 м. Максимальная длина расстановки зависит от максимального шага электроразведочной косы, имеющейся в распоряжении исследователя.

Измерения выполняются в автоматическом режиме согласно заранее загруженным в коммутирующую аппаратуру протоколом, в ко-

торых описывается порядок подключения питающих и измерительных электродов на электрометрической косе.

В зависимости от взаимного расположения приемных и питающих электродов различают электроразведочные установки (Шлюмберже, Веннера, дипольная осевая, трехэлектродная) [30]. Для примера ограничимся дипольной осевой установкой и установкой Шлюмберже. На каждой расстановке одним типом применяемой установки получим от 400 до 550 точек физических наблюдений. На разных расстановках выполняются измерения различными установками, результаты измерений установками Шлюмберже и дипольной осевой, которые располагаются на одной расстановке, совмещаются. При перемещении расстановки по профилю несколько расстановок собираются в один профиль.

В результате одного измерения записываются различные параметры, в зависимости от комплектности и возможностей оборудования, приведем основные: номера питающих и приемных электродов, положение электродов, сила тока генератора, разница потенциалов между приемными электродами, остаточная разница потенциалов между приемными электродами на определенном времени после прекращения подачи электрического импульса либо дифференциальный фазовый параметр (ДФП) между 1 и 3-й гармониками.

Инверсия данных двумерной электротомографии выполняется в специальном программном пакете, например, ZondRes2D, Res2DInv, AGI EarthImager™ 2D, BERT.

На первом этапе производится оценка качества полевых данных с помощью принципа взаимности, суть которого в том, что при зеркальной смене позиций питающих и приемных электродов измеряемое значение разницы потенциалов напряжения должно оставаться неизменным. Пример такой проверки по профилю 01 показан на (Рисунок 3.1), где видно, что качество полевых данных удовлетворяет требованиям. Сплошной заливкой показаны измеренные данные, а пунктирной — данные, соответствующие полученным при моделировании разреза среды. По результатам проверки некачественные измерения удаляются. Отклонение результатов, измеренных от модельных, анализируется, параметры и алгоритм инверсии подбираются до достижения минимально возможной невязки между измеренными, модельными данными, а также в соответствии с априорной информацией [31].

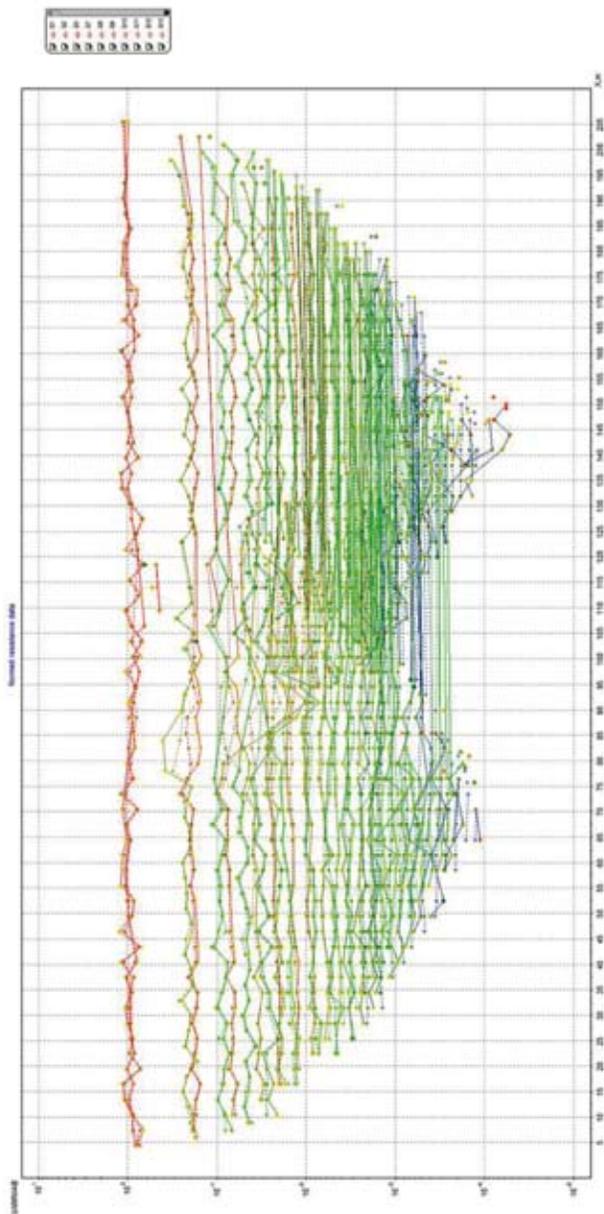


Рисунок 3.1. Нормированная измеренная разница потенциалов

Конечным этапом обработки и интерпретации является построение модели среды — достоверной и соответствующей геологии по наблюдаемым значениям. Конечная ошибка моделирования, как правило, не превышает $\pm 5\%$.

Экспериментальные исследования по применимости электро-томографии для выявления и определения пространственных параметров структурных неоднородностей выполнялись на солеотвале и подстилающем массиве месторождения калийных солей, расположенного в Пермском крае.

Цель работы — исследование геоэлектрического строения участка горных пород с целью поиска и оконтуривания карстовых неоднородностей для обеспечения безопасного выполнения сваяустроительных работ. Для решения поставленных задач был использован комплекс геофизических методов, включающий в себя электроразведку методом сопротивлений и методом вызванной поляризации (ВП) по методике электротомографии (ЭТ), а также георадиолокационное зондирование.

Солеотвал сложен отходами калийной промышленности. Отходы в общем случае представляют собой кристаллический хлористый натрий (не менее 93 %) с примесями хлористого калия (не более 2,7 %), хлористого магния (не более 0,3 %), сернокислого кальция (не более 2,0 %) и нерастворимого остатка (не более 2,0 %). По своим технологическим свойствам материал солеотвалов является продуктом гигроскопичным, имеет способность к слеживаемости, в холодное время — к смерзанию. По внешнему виду соль крупнокристаллическая и комковатая сероватого цвета с красноватыми вкраплениями.

Подстилающий массив представлен суглинками, мелкозернистыми песками, мергелями.

Карстовые процессы оказывают негативное влияние на состояние зданий и сооружений на солеотвале. Наблюдается просадка конвейерной эстакады. Непосредственно под частью опор эстакады наблюдаются выходы карстовых полостей на поверхность глубиной не менее нескольких метров.

В результате использования метода электротомографии получена объемная модель УЭС и поляризуемости среды, которая использовалась для определения структуры массива (Рисунок 3.2).

В результате анализа результатов исследований на солеотвале определен механизм процесса карстообразования. Он заключается в следующем: в результате проявления современной геодинамической

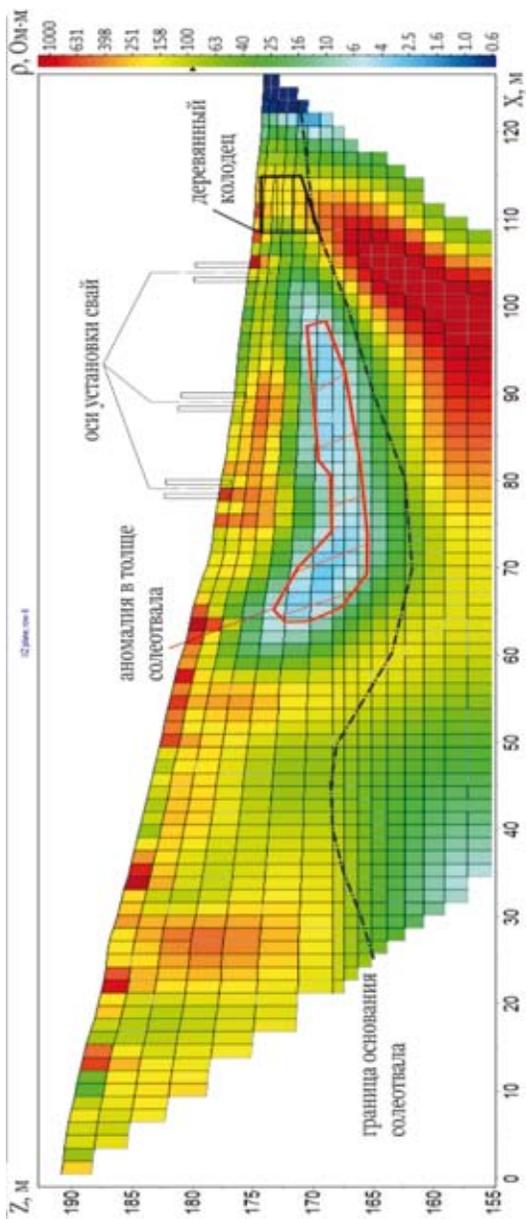


Рисунок 3.2. Разрез блочной модели удельных электрических сопротивлений на солеотвале

подвижности разрывных структур подстилающего горного массива в солейотвале формируются участки разуплотнения, которые являются путями миграции для талых вод и инфильтрационных осадков, в результате чего здесь происходит образование карстовых полостей, представляющих опасность для инженерных сооружений.

Электротомография позволяет изучить распределение УЭС и поляризуемости как в 2D (отдельные профили), в 3D (серии профилей с перекрестными измерениями), так и в 4D (вариант мониторинга с повторением измерений через определенные промежутки времени).

Площадные исследования методом срединного градиента

Электроразведка методами сопротивлений и ВП установкой срединного градиента (СГ) является площадным вариантом электропрофилеирования, что позволяет на конкретном разное питающих электродов A и B , неизменном на протяжении всего процесса измерений, изучить распределение удельного электрического сопротивления по площади. Термин «установка» в электроразведке методом сопротивлений используется для обозначения взаимного расположения питающих (A, B) и приемных (M, N) электродов. Выбор установки является важнейшим элементом метода электроразведки и зависит от геологических задач, технологических условий, используемой аппаратуры, глубинности исследований, уровня помех. Установка срединного градиента обеспечивает максимальную производительность, возможность работы с несколькими измерителями одновременно, но требует более мощных источников тока [32, 33].

Полученные на местности разности потенциалов пересчитываются в параметр кажущееся электрическое сопротивление (ρ_k) по формуле (3.1):

$$\rho_k = K \cdot U_{\Delta} / I, \quad (3.1)$$

где K — коэффициент установки, $K = 2\pi / (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN)$;

U_{Δ} — разность потенциалов, измеренная с помощью приемных электродов M и N ;

I — сила стабилизированного тока в цепи AB .

Расчитанные значения кажущегося электрического сопротивления (ρ_k) выносятся на план нужного масштаба, где в изолиниях строится карта распределения кажущегося электрического сопротивления, на которой выявляются зоны высокого и низкого относительно друг друга сопротивления, что позволяет определить по площади

субвертикальные контакты пород разного кажущегося электросопротивления, что отражает либо смену пород разного состава, либо изменение свойств пород одного состава (зоны структурного ослабления, трещиноватости, азимуты простираения кливажа, сульфидизации, присутствие солевых растворов и др.).

Для физической реализации метода в исследуемой среде создавался переменный ток с частотой 4,88 Гц по форме меандра с помощью генератора и гальванических заземлений. Такой ток в данном методе считается постоянным, и для пересчета в кажущиеся сопротивления среды выполненных измерений используются формулы для постоянного тока. Данный прием позволяет упростить задачу расчета. При этом в рамках одного планшета питающие электроды остаются неподвижными, а приемные электроды перемещаются с выбранным шагом по профилю с приемных электродов снимается разница потенциалов с помощью измерителя.

Экспериментальные исследования по применимости метода срединного градиента для выявления и определения пространственных параметров структурных неоднородностей, проявлений современной геодинамической активности выполнялись на полигоне, расположенном на территории месторождения хромитовых руд в Пермском крае.

Измерения выполнялись на участке в районе северного фланга месторождения хромитов.

В 2018 г. была проведена первая серия измерений методом сопротивлений установкой срединного градиента (СГ).

При электропрофилеировании по методике срединного градиента измерения производятся по параллельным профилям с выбранным шагом. Профили располагаются внутри квадрата со сторонами в половину длины генерирующего диполя (линия АВ), сам квадрат расположен в центре генерирующего диполя. Это позволяет получить площадное распределение кажущегося сопротивления на участке исследований, ρ_k (Ом·м). Глубина исследований зависит от длины линии АВ.

При выполнении измерений на участке исследований использовалась длина разноса АВ 140 м, что примерно соответствует глубине исследований до 23 м. Всего на участке был сделан один планшет, было пройдено 5 параллельных профилей на расстоянии 15 метров друг от друга с шагом по профилю, равным длине приемного диполя MN 3 м.

Исследуемый участок представлен серицит-кварцевыми, серицит-хлорит-кварцевыми сланцами. Значения кажущегося сопротивления пород, определенные в результате обработки данных, полученных электропрофилированием по методике срединного градиента, лежат в диапазоне 80–1200 Ом·м (Рис. 3.3). Проинтерпретировав планшет, выявили две четко выделяющиеся зоны пород с более низкими кажущимися сопротивлениями относительно всего планшета в целом (80–350 Ом·м).

Первая зона — в северной части участка. Вторая вытянутая зона — в южной части участка, проходящая через весь планшет в северо-восточном направлении.

Также сделано предположение, что разломы, разграничивающие сланцы разного состава, направления сланцеватости и угла падения связаны с тектоническими нарушениями (разломами), показанными на рисунке 3.3 фиолетовыми штрихпунктирными линиями.

Согласно имеющейся информации о геологическом строении исследуемого участка, здесь расположен стык комплексов сланцев с различными направлениями простираения и углами падения (Рисунок 3.3). Так, более ярко выраженный разлом, находящийся восточнее, приурочен к стыку сланцев с углами падения 30° и 88°, соответственно. Предполагаемый разлом, находящийся западнее, приурочен к стыку сланцев с углами падения 73° и 30° с противоположными направлениями простираения.

В 2019 г. площадь исследования была расширена на северо-восток с целью изучения территории домовых хозяйств. Всего было выполнено 2 планшета электроразведкой методом сопротивлений и вызванной поляризации (ВП) установкой СГ-ВП с длиной разноса АВ 140 м и длиной MN 3 м. Всего было пройдено 13 профилей с расстоянием между профилями 10 м и шагом по профилю 3 м. В результате появилась возможность более комплексного изучения участка работ по геофизическим параметрам не только планового распределения ρ_k , но и планового распределения кажущейся поляризуемости пород η_k (%), планового распределения фазово-частотного параметра PFE (%). Это открывает дополнительные возможности в интерпретации и анализе получаемых материалов.

Результаты исследований 2019 г. Измерения были выполнены с помощью электроразведочного генератора АСТРА-100 и измерителя МЭРИ-24. Данное оборудование позволяет выполнять исследования методами сопротивлений и ВП. Результат электропрофилирования

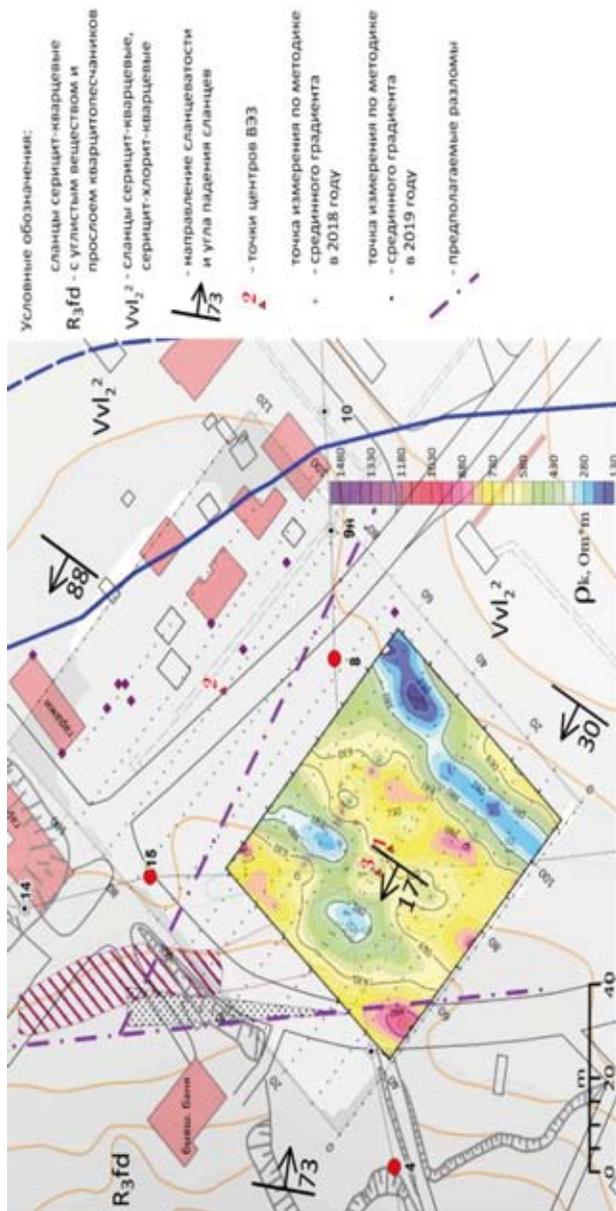


Рисунок 3.3. План кажущихся сопротивлений среды до глубины 20 метров, результаты измерений 2018 г. Месторождение хромитов, Пермский край

методом сопротивлений 2019 г. в виде плана распределения ρ_k представлен на (Рисунок 3.4).

Значения ρ_k по результатам интерпретации измерений лежат в диапазоне 80–2000 Ом·м. При построении плана ρ_k в алгоритм интерполяции данных были внесены две искусственные границы. Положение границ подобрано в соответствии с априорной геологической информацией, а также по наиболее контрастным изменениям значений ρ_k , например, по резкой разнице повышенных (более 1000 Ом·м) и фоновых (350–700 Ом·м) значений ρ_k , которую можно наблюдать в западной и восточной частях исследованной территории.

Следует отметить, что первая низкоомная зона (расположенная в центре участка), которая примыкает с севера к месту с нарушением в рельефе, в результате сгущения сетки измерительных профилей в 2019 году, стала по форме отображаться треугольной аномалией. Предполагается техногенная природа данной аномалии.

Форма второй вытянутой низкоомной зоны претерпела изменения. Вторая низкоомная зона за период с 2018 по 2019 год выпрямилась и переместилась в направлении на юго-восток. Перемещение и трансформацию данной зоны нельзя объяснить погрешностями

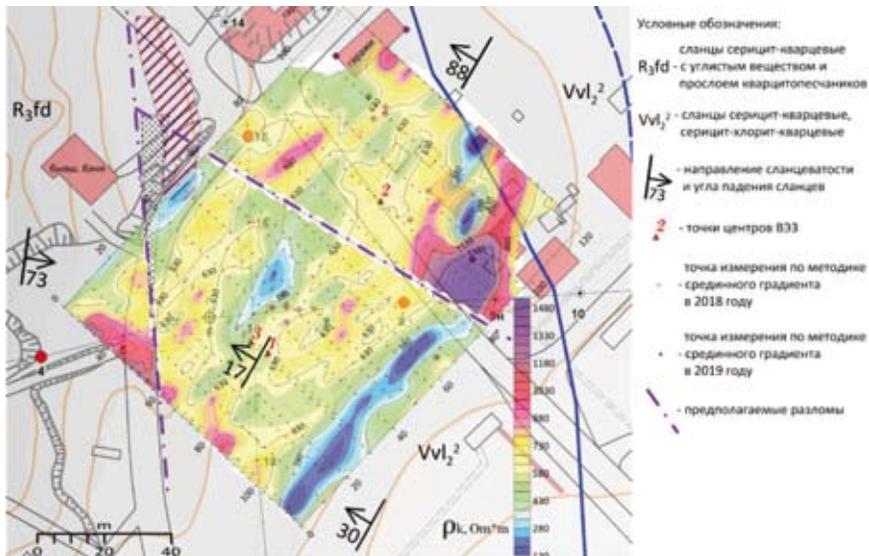


Рисунок 3.4. План кажущихся сопротивлений среды до глубины 20 м, измерения 2019 г. Месторождение хромитов, Пермский край

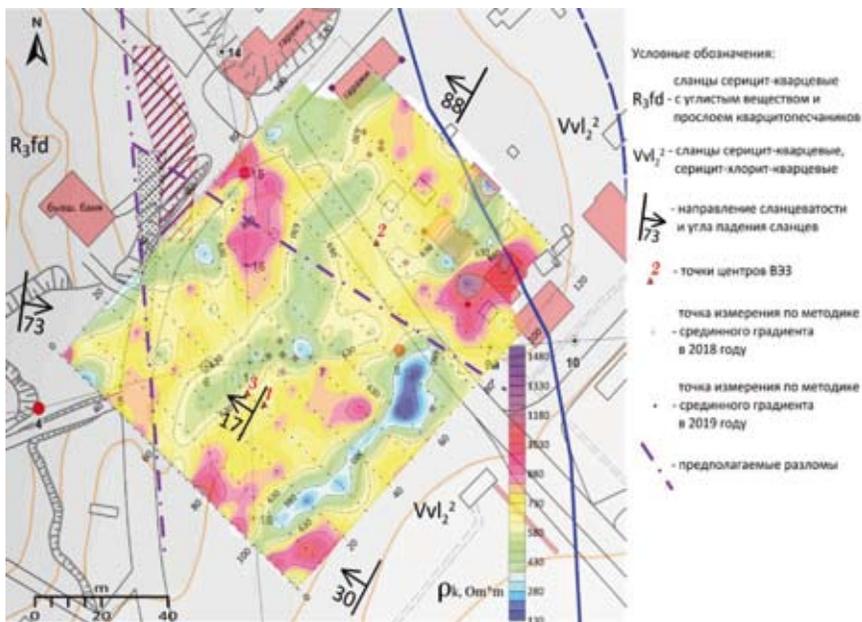


Рисунок 3.5. План кажущихся сопротивлений среды до глубины 20 м, измерения 2021 г. Месторождение хромитов, Пермский край

измерений и геодезической привязки. Причем перемещение частей зоны неравномерно, а плавно увеличивается с 6 м в северо-восточной части зоны до 10 м в юго-западной. Следует отметить, что на участке данной аномалии наблюдается локальная заболоченность территории.

В 2021 г. была проведена третья серия измерений на данном участке. Из результатов мониторинга методом срединного градиента следует, что в период наблюдений происходили морфологические трансформации основных низкоомных аномалий, связанных с разрывными структурами. Также изменялись значения ρ_k внутри границ аномалий (Рисунок 3.5).

Георадарное зондирование

Метод георадиолокации относится к группе электромагнитных методов, то есть изучает отклик среды на излучаемое электромагнитное поле. Метод георадарного зондирования относится к группе

электроразведочных методов на токах высокой частоты, основан на явлении отражения электромагнитных волн от границ раздела поверхностей, обладающих различным значением диэлектрической проницаемости (ϵ). Диэлектрическая проницаемость величина безразмерная, физический смысл состоит в следующем, во сколько раз скорость распространения электромагнитной волны в изучаемой среде ниже, чем в вакууме (скорости света) [34, 35].

Скорость распространения электромагнитной волны в среде связана с диэлектрической проницаемостью следующим уравнением (3.2):

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (3.2)$$

где c — скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

Зная время прихода отраженной волны и определив диэлектрическую проницаемость среды, возможно определить расстояние до отражающих слоев. Немаловажными характеристиками при интерпретации данных георадарного зондирования являются параметры затухания электромагнитной волны, тангенс угла диэлектрических потерь, а также частотный состав и волновой рисунок в целом. На стадии обработки и интерпретации, как правило, оперируют действительной частью комплексной диэлектрической проницаемости среды [36, 37].

При георадарном зондировании измеряется время прихода отраженной электромагнитной волны. Даже когда произведен переход к глубинному разрезу, этот переход может быть осуществлен по грубым скоростным законам, что будет влиять на итоговый результат, внося искажения, про которые нужно помнить. Отражения появляются при переходе электромагнитной волны через границу раздела сред с разными электромагнитными свойствами. Причем чем сильнее различаются свойства сред, тем ярче будет отражение на радарограмме. Если же электромагнитные свойства сред окажутся одинаковыми, то и отражения мы не увидим.

В георадарном зондировании измерения времени э/м волны очень точны и составляют доли нсек. На каждой точке измерения производится накопление сигнала до 128 раз. На радарограмме отображаются особенности распространения э/м волны в изучаемом пространстве [38].

Горизонтальная разрешающая способность метода определяется шагом исследования и варьируется от первых сантиметров до десятков сантиметров, в зависимости от решаемых задач. Вертикальная разрешающая способность (минимальные размеры объекта по вертикали, что может быть видно на радарограмме) определяется длиной зарегистрированной волны, а она определяется условиями исследуемой среды и выбором антенны с определенной центральной частотой. Чем выше скорость, тем больше длина волны, в то же время, чем выше частота регистрируемого сигнала, тем меньше длина волны. Чем меньше длина волны, тем лучше разрешающая способность, но тем меньше глубинность метода [39]. Разрешающая способность варьируется от первых сантиметров до десятков сантиметров.

Глубинность метода в общем считается равной 20 длинам регистрируемых волн, варьируется от первых десятков сантиметров до первых десятков метров. Но в средах с высоким затуханием глубинность падает, т.к. сигнал затухает сильнее обычного. К таким средам относят вещества с высоким содержанием подвижных ионов, например, водонасыщенные глины и суглинки, вода с растворенными солями, бетон. Также есть правило трех раз: э/м волна распространяется в породе в 3 раза медленнее, чем в воздухе, эм. волна распространяется в воде в 3 раза медленнее, чем в породе [40].

Центральная частота антенного блока определяет спектр принимаемых частот, отчего зависит разрешающая способность и глубина зондирования. Типичный энергетический спектр принимаемых частот имеет куполообразную форму с максимумом на центральной частоте антенного блока F . Ширина спектра определяется, как правило, в пределах $(0.5 \div 2) \cdot F$.

Представлены результаты использования георадарного зондирования:

I. Для исследования структуры вмещающего массива ствола «Вентиляционный» шахты в 2020 году.

II. При определении причин деформаций здания детского сада в г. Березовский в составе комплексных геофизических исследований фундамента и подстилающего горного массива. С помощью георадарного зондирования определялись изменения толщины железобетонной фундаментной плиты.

Георадарные исследования проводились с помощью георадара ОКО-2 с антенным блоком АБ-400, что позволяет исследовать массив до глубины порядка 5 м при времени регистрации 100 нсек.

Результаты исследований структуры вмещающего массива ствола «Вентиляционный» шахты в 2020 году

С поверхности и до глубины 39 м вмещающий массив представлен песчано-глинистыми отложениями. В интервале глубин 39–160 м массив сложен габбро-амфиболитами, амфиболитами различной степени выветрелости и раздробленности. Трещины обводнены. Химический состав подземных вод характеризуется преобладанием солей кальция.

Некоторые геофизические характеристики встречающихся типов изучаемой среды и использованной антенны приведены в таблице 3.1.

Всего в стволе «Вентиляционный» было выполнено 2 серии наблюдений. В первой серии измерения выполнялись до тампонажных работ с целью определения геомеханического состояния закрепного массива, положения и параметров водотоков. Вторая серия выполнялась после выполнения тампонажа для определения его результативности.

В первой серии исследования проводились по горизонтальным и по вертикальным сечениям ствола по бетонной крепи в интервале глубин 62,3–114,0 м.

Всего было пройдено 2 вертикальных профиля, каждый длиной 76 м, и 37 горизонтальных профилей, каждый длиной 25,1 м, расположенных через 2 м по высоте ствола. Общая длина составила 1080 погонных метров.

Таблица 3.1

Характеристики изучаемых сред

Тип	ϵ	V , м/нсек	Средняя длина волны для антенны 400 МГц, м	Затухание (дБ/м)
Бетон влажный	10–18	0,095–0,070	0,210	80
Бетон сухой	7–10	0,110–0,095	0,250	75
Габбро-амфиболиты	8–9.5	0,106–0,097	0,250	2
Вода соленая	81	0,033	0,083	320
Полиуретановая пена сухая	1–1.2	0,300–0,270	0,710	

Обработка зарегистрированного отраженного сигнала заключалась в следующих основных операциях. На первом этапе производилась корректировка положения нулевой отметки глубины. Далее удалялась постоянная составляющая сигнала, являющаяся помехой. Осуществлялась полосовая фильтрация и корректировка уровня усиления для наилучшего отображения волновой картины. Для повышения информативности изображения выполнялось сглаживание сигнала.

Пример результатов зондирования в первой серии измерений по вертикальному георадарному профилю представлен на рисунке 3.6.

На отметках глубин 63,5, 64,5, 65,5, 66,5 м по профилю на радарограмме выделяются петли дифракции, возникшие в результате отражений от временной кольцевой крепи. На отметке глубины 72,1 м по профилю наблюдается эхо-эффект отражений от полости, расположенной в районе контакта бетон / порода.

Стальные элементы конструкции железобетонной крепи при проведении георадарного зондирования использовались как параметрические. Определенное георадарным зондированием положение временной кольцевой крепи и железной арматуры соответствует проекту и данным журнала проходки, что подтверждает достоверность результатов исследований.

По выявленным на вертикальных профилях дифракционным петлям удалось измерить диэлектрическую проницаемость бетонной крепи, она составила $\varepsilon = 9.57 \pm 0.5$, что соответствует зрелому бетону согласно таблице 3.1.

Результаты анализа радарограмм вертикальных профилей:

— околонуно 10 пустотных полостей на границе крепь/порода мощностью до 0.1 м и протяженностью до 1.3 м;

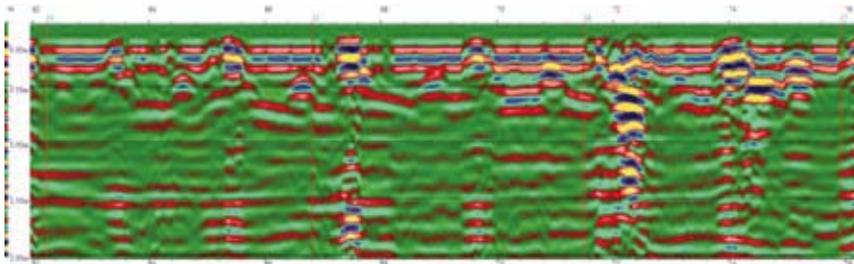


Рисунок 3.6. Участок вертикального сечения профиля между ярусами 14–17. Ствол «Вентиляционный» шахты. Первая серия зондирования, 2020 г.

— выявлено два участка дезинтеграции пород, соответствующих областям сильных отражений. Первый расположен между 16 и 17 ярусами, второй начинается с середины между 19 и 20 ярусами и заканчивается за 20 ярусом. По волновой картине можно сделать вывод, что за крепью присутствует область дезинтеграции пород, а сама крепь имеет дефекты. Наличие дефектов подтверждено визуальными наблюдениями.

Результаты анализа радарограмм горизонтальных профилей:

— определена мощность бетона, которая варьируется от 0,25 до 0,9 м, в зависимости от участка, средняя мощность составляет около 0,5 м;

— бетон подразделен на бетон с дефектами, бетон без дефектов, железобетон. Качество сцепления бетон / порода по результатам георадарного зондирования изменяется от надежного до ненадежного.

Результаты анализа данных георадарного зондирования конкретных сечений и информации о поведении породного массива в процессе проходки ствола позволяют получить четкую картину для проектирования тампонажных работ с выделением приоритетных зон (зон обводнения) по контуру ствола (Рисунок 3.7).

Во второй серии измерений выполнено георадарное зондирование участка ствола в интервале глубин 70–106 м.

В пределах опытного участка был пройден 1 вертикальный профиль протяженностью 26 м.

Повторно выполнены измерения по 9 горизонтальным профилям, каждый длиной 25,1 м. Общая длина повторных измерений составила 252 погонных метра.

При камеральной обработке и анализе материалов георадарного зондирования второй серии исследовался отраженный сигнал в области первых 40 нсек записи трасс. Это позволило сократить время на обработку и оперативно решить поставленную задачу в полном объеме.

На первом этапе, согласно выработанной методике, была произведена обработка результатов георадарных измерений нескольких серий. Для уменьшения возможных искажений итоговой картины применялся постоянный граф обработки. Стандартный граф обработки состоял из пикировки прямой волны, коррекции начального времени трасс по результатам пикировки, удаления низкочастотной составляющей алгоритмом Dewow, фильтрации ФНЧ фильтром для удаления высокочастотных шумов, выбора коэффициентов усиления, удаления некорректных трасс, слабой амплитудной коррекции.

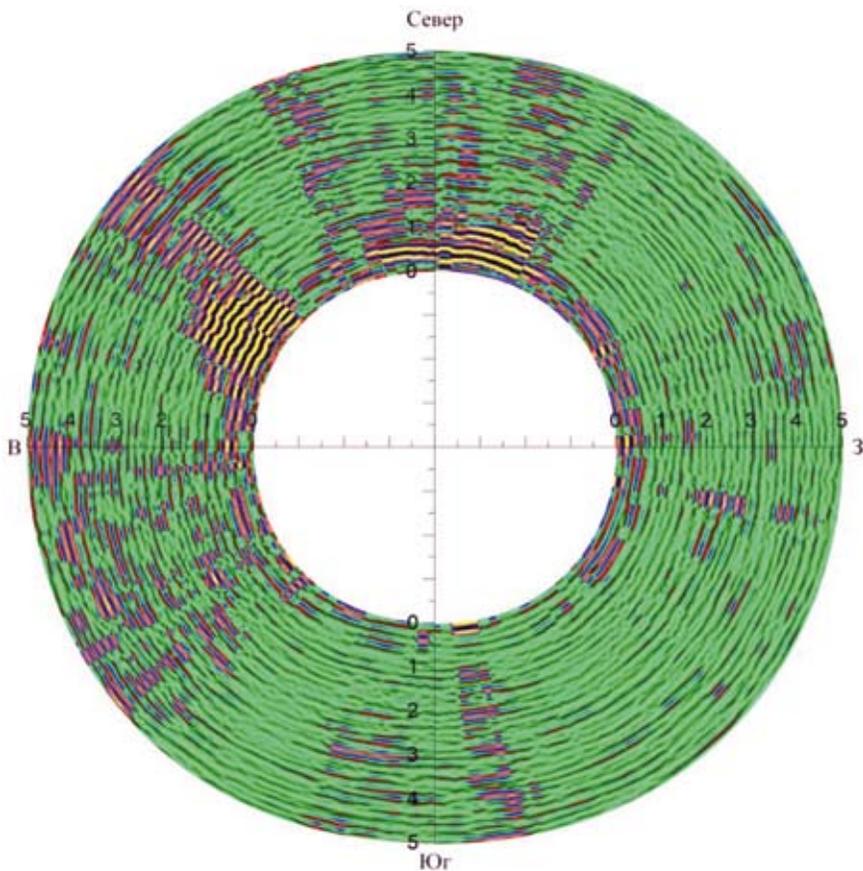


Рисунок 3.7. Результаты георадарного зондирования на опытном участке. Ствол «Вентиляционный» шахты. Горизонтальный профиль № 20

Далее производился анализ изменения амплитуды отражения от преломляющей границы, соответствующей контакту бетон/приконтурный массив (Рисунок 3.8).

По результатам изучения характера изменения преломляющей границы была составлена таблица 3.2 с координатами и размерами выявленных мест обводненности. Для дальнейшего анализа места обводненности разделили на группы — ликвидированные/сохранившиеся/новые по результатам тампонажа.

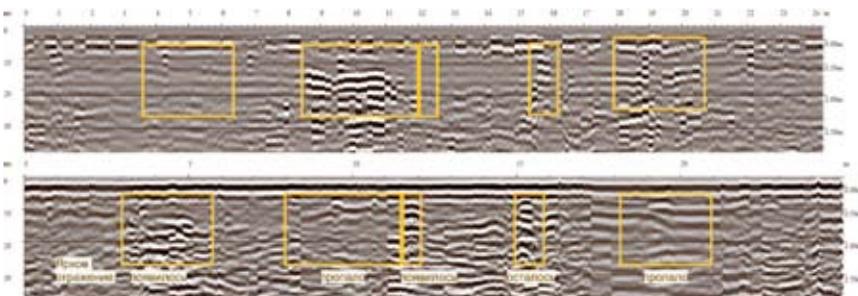


Рисунок 3.8. Пример анализа результатов измерений по георадарному вертикальному профилю 22 (Ярус 16+0.8м) до тампонажа (сверху), после тампонажа (снизу). Ствол «Вентиляционный» шахты, 2020 г.

Эффективность тампонажных работ по данным георадарного зондирования определена в процентном соотношении в зависимости от сокращения протяжённости зон обводненности до и после тампонажа (таблица 3.2). В результате массив подразделяется на три основные части:

1. 15–17 ярусы. Эффективность тампонажа составила 60 %. По данной части видно, что одновременно с вытеснением воды из приконтурного массива появляются участки новых водопроявлений.

1. 20 ярус, профиль 14. Здесь ситуация ухудшилась, к существующим зонам обводненности добавились две новых, эффективность тампонажа составила –25 %. По геологическим материалам данный участок расположен рядом с зоной разрушенных габбро-амфиболитов. Сведения об объемах тампонажных работ на данном участке отсутствуют. Если же в данном месте производился тампонаж, то, вероятно, сочетание физических свойств вмещающей породы с постоянным водопритоком не позволит на данном участке возвести успешную гидроизоляцию ствола.

3. 20–24 ярусы. Эффективность тампонажа варьируется в диапазоне 83–100 %. На этом участке качество гидроизоляции на момент повторных измерений зафиксировано на высоком уровне.

В целом по результатам двух серий георадарных измерений по горизонтальным профилям протяженность обводненных участков составила 73 погонных метра до тампонажа и 26 погонных метров после тампонажа.

Таким образом, эффективность тампонажных работ в целом по данным георадарного зондирования составила 65 %.

Таблица 3.2
Участки обводненности по данным георадарных исследований после тампонажа на опытном участке

№ профиля	Местоположение обводненных участков	Ликвидированные	Сохранившиеся	Вновь образованные	Ликвидированные	Сохранившиеся	Вновь образованные	Эффективность тампонажа		Характеристика разреза
								Положение на профиле	Положение на профиле	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
22	16+0.8	70.697	8-11		3-6		3.00	60	Лабро-амфиболиты рассланцованные интенсивно хлоритизированные сосоритизированные	
			16-22		11-16		4.00			
21	16-0.5	72.997	0-7	12-16	8-9	4.00	1.00			
			19-25		16-18		2.00			
20	17+0.2	75.803	0-1.5		1.5-2.5		1.00			
			2.5-6							
			18-25							

Таблица 3.2, окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14	20+1.8	87.721		1.5-4.5	4.5-5.5	3.00	1.00	-25	Лабро-амфиболиты милонитизи- рованные и сосориитизированные, кварц-кремнистый заполнитель, трещин с пиритными корками
				5.5-7.1	8-8.5	1.60	0.50		
				20-21.5		1.50		100	
13	20+0.5	89.021	3-3.5						
			19-21.5						
			22.5-24.5						
11	21+0.3	93.727	9.5-11						
			15-17.5					83	Амфиболиты мас- сивной текстуры хлоритизиро- ванные и сосори- тизированные
09	22+1.3		4-8						
06	23-0.8	103.839	0-3						
			15-18					1	
			20-25						
05	24+1.5	106.045	12.5-15	10-12.5	9-10	2.5			

При сравнении результатов георадарного зондирования в стволе до и после тампонажа четко наблюдаются изменения в зоне контакта бетон/порода. Обводненные полости трещин в период первой серии зондирования, по результатам второй серии заполнены тампонажным материалом на основе пенополиуретана MasterRoc-355. Эти изменения хорошо заметны из-за снижения контраста преломляющей границы и, следовательно, наблюдается более слабая амплитуда отражений согласно закону Снеллиуса.

Определение изменения толщины железобетонной фундаментной плиты здания детского сада с использованием георадара в г. Березовский

Город Березовский полностью расположен на территории одноименного месторождения золота, что определяет сложные инженерно-геологические условия. Более 150 лет здесь добывалось золото в приповерхностной части массива на глубинах, не превышавших 45–50 м. За этот период было построено более 1000 мелких шахт. Информация по расположению и параметрам выработок носит ограниченный характер, а зачастую отсутствует.

Современные технологии добычи подземным способом вызвали образование на земной поверхности воронок обрушения, провалов и формирование мульд сдвижения.

При отработке месторождений полезных ископаемых подземным способом нарушается устойчивость горных пород в области влияния очистных и подготовительных горных выработок, что вызывает сдвижение горных пород.

Сдвигения и сопровождающие их деформации горных пород и земной поверхности могут вызвать разрушительные деформации в горных выработках, в зданиях и сооружениях, попавших в область влияния горных работ как в массиве, так и на земной поверхности.

Были выполнены исследования по определению причин деформаций здания детского сада в г. Березовский в составе комплексных геофизических исследований фундамента и подстилающего горного массива.

Березовское месторождение находится в пределах зоны, сложенной осадочными и субвулканическими образованиями, вмещающих интрузий основного и кислого составов, и представляет собой совокупность многочисленных крутопадающих даек березитизирован-

ных гранитоидов, к которым приурочены сульфидно-кварцевые золотоносные жилы. Длина жил изменяется в пределах 10–30 м, а их мощность — от долей сантиметров до 1,5 м.

Рыхлые мезокайнозойские отложения в пределах Березовского рудного поля представлены глинистой корой выветривания. Мощность коры выветривания, развитой повсеместно, составляет 2–3 м. По вещественному составу среди глинистых продуктов в зависимости от состава исходного субстрата выделяется несколько типов: каолиновый, каолин-гидрослюдистый, каолин-монтмориллонитовый, нонтронитовый.

Для определения толщины железобетонной плиты было проведено георадарное зондирование. Фундаментная плита исследована по равномерной сети из 300 профилей георадарного зондирования суммарной длиной более 2000 м. В результате удалось построить карту мощности бетонной плиты (Рисунок 3.9).

Согласно рисунку 3.9, участки с аномально низкими значениями толщины бетонной плиты сосредоточены в ее центральной части.

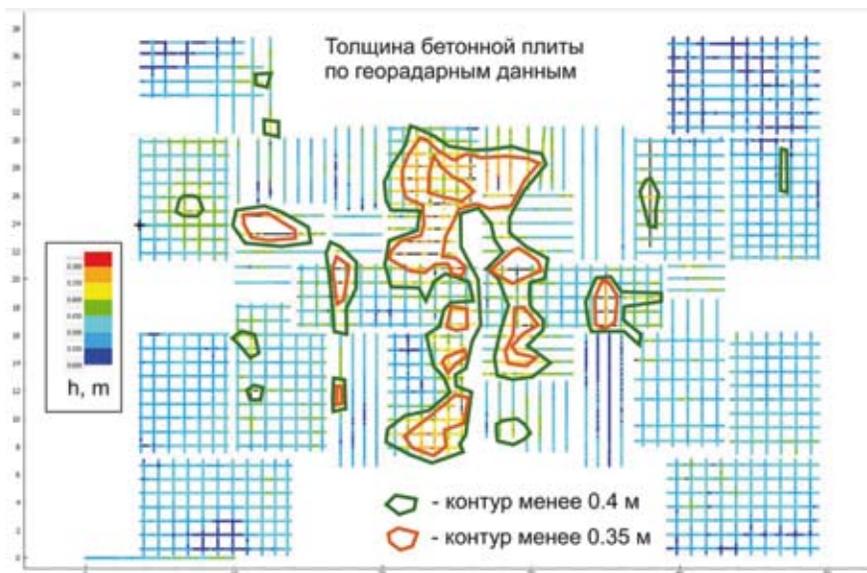


Рисунок 3.9. Карта мощности бетонной плиты по результатам георадарных измерений с контурами аномально низких значений мощности плиты, г. Березовский, здание детского сада

Такие участки зачастую на радарограммах отображаются куполообразными структурами (Рисунок 3.10).

Также по результатам георадарных исследований удалось оценить обводненность фундаментной щебневой подушки (Рисунок 3.11).

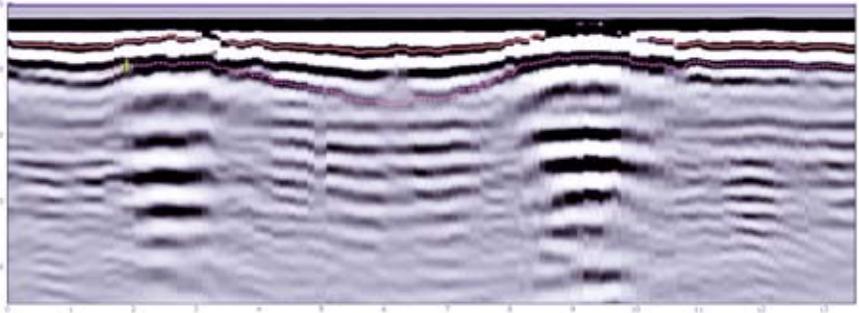


Рисунок 3.10. Радарограмма с куполообразными аномалиями мощности бетона, г. Березовский, здание детского сада, 2021 г.



Рисунок 3.11. Карта обводненности гравийной подушки под фундаментной бетонной плитой, г. Березовский, здание детского сада, 2021 г.

Спектральное сейсмопрофилирование

Спектральная сейсморазведка (ССП) отличается от традиционной, лучевой сейсморазведки. В данном геофизическом методе земная толща по акустическим свойствам рассматривается как совокупность колебательных систем. Поэтому акустический импульс, возникающий в результате ударного воздействия, уже в самой зоне удара исчезает, превращаясь в гармонический (синусоидальный) затухающий сигнал. Границы, выявляемые с помощью спектрально-акустических (спектрально-сейсморазведочных) методов, представляют собой поверхности, по которым возможно взаимное проскальзывание соседних сред [41].

Основными структурными неоднородностями, выявляемыми методом СПП, являются как открытые, так и сомкнутые трещины, их совокупности (зоны трещиноватости).

Методом спектрального сейсмопрофилирования выполнены исследования структуры горного массива одного из месторождений хромитов, охваченного процессом сдвижения от подземных горных работ. Вмещающий массив горных пород месторождения сложен метаморфическими скальными породами, по составу и свойствам которых делится на две части.

До глубины 910 м массив сложен преимущественно габбро, амфиболитами, габбро-амфиболитами. На глубине 910 м происходит смена пород на трещиноватые серпентиниты — гипербазиты (по дуниту, перидотиту).

Разработка месторождения хромитов системой нисходящих слоев с твердеющей закладкой ведется с 2017 г. по настоящее время.

На основе анализа данных и инструментальной диагностики результатов зондирования методом СПП оценено состояние пород подработанного горного массива, сделан прогноз развития процесса сдвижения и даны рекомендации по мониторингу состояния зданий.

Инженерно-геофизические исследования, позволяющие сделать выводы о состоянии подземных горных выработок и стадии развития процесса сдвижения, направлены на поиск и оконтуривание возможных пустот и на исследование параметров области дезинтеграции подработанных горных пород. Как правило, в подработанном горном массиве пустоты больших размеров — довольно редкое явление. Чаще всего полости от старых шахт находятся в состоянии полного или частичного заполнения и отличаются степенью заполнения и плотностью заполнителя. Наполнение пустот горной массой может

изменяться в достаточно широком диапазоне как по плотности заполнения, так и по геометрическим параметрам.

На исследуемой территории методом спектрального сеймопрофилирования глубина зондирования составила 150 м для определения состояния глубоких слоев горного массива на всю возможную глубину подработки. Выбранная частота и глубина зондирования обеспечивают поиск и оконтуривание крупных горных выработок и поверхностей скольжения от сдвижения горных пород.

Некоторые результаты спектрального сеймозондирования в виде сейсмограмм вертикальных сечений по профильным линиям приведены на рисунке 3.12.

Аномалии, выявленные методом спектрального сеймопрофилирования показаны на разрезах двумя цветами – желтым и красным. Желтым цветом выделены аномалии, выявленные на периферии подработанной территории, красным – непосредственно над горными выработками.

До глубины 40 м никаких признаков процессов сдвижения не обнаружено, на глубине 20–30 м четко прослеживается граница глинистых отложений со скальными горными породами. В интервале

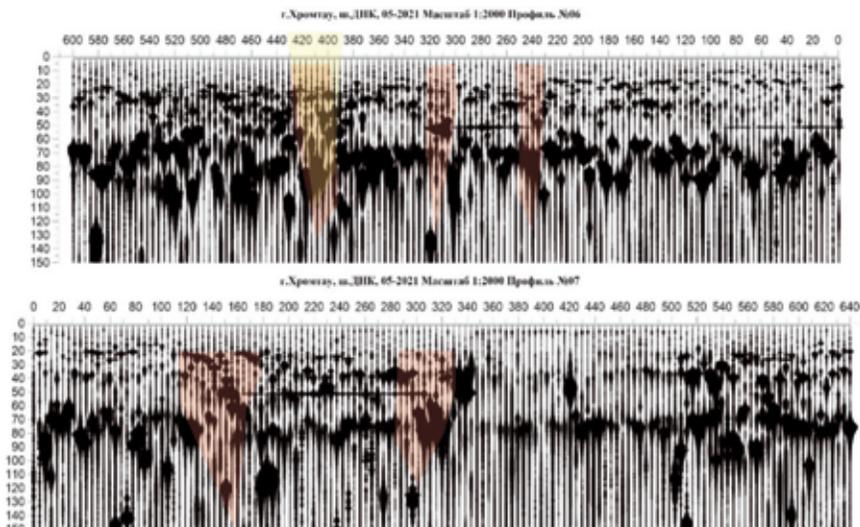


Рисунок 3.12. Спектральные сейморазрезы по профилям № 6 и № 7. Промплощадка в районе месторождения хромитов

40–80 м прослеживаются структуры, которые могут соответствовать дезинтеграции массива над горными выработками. Для получения более точных оценок необходима априорная геологическая информация и заверочное бурение на промплощадке в районе месторождения хромитов.

На рисунке 3.13 представлена карта распределения структурных нарушений исследуемого массива промплощадки по результатам геофизических исследований методом ССП.

Геофизические исследования методом ССП в мониторинговом режиме на забое ствола позволяют оперативно получить опережающую прогнозную информацию по трассе проходки ствола на предстоящих



Рисунок 3.13. Схема расположения выявленных методом ССП дизъюнктивных нарушений горного массива промплощадки

глубинах по структурно-тектоническому строению вмещающего массива горных пород и выявить участки с аномальными зонами дезинтеграции (Рисунок 3.14).

На рисунке 3.15 представлены результаты зондирования трассы проходки при последовательной углубке ствола «Скиповой» шахты по добыче хромитов: нахождении забоя на глубинах 820, 864 и 923 м.

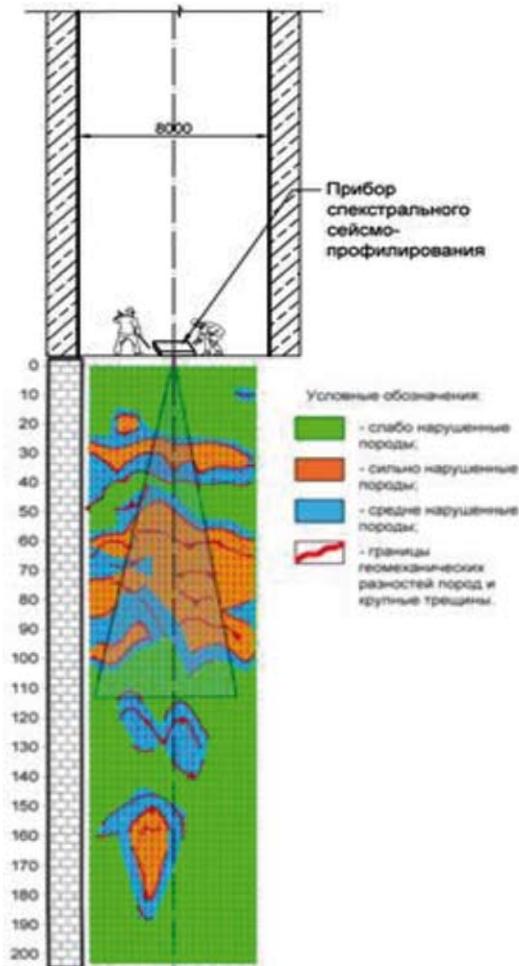


Рисунок 3.14. Пример использования метода спектрального сейсмопрофилирования ССП при проходке ствола

Первоначально по результатам ССП от забоя на глубине 820 м, было выделено пять трещиноватых зон: а) 15–20 м от забоя; б) 28–30 м от забоя; в) 36–55 м от забоя; г) 55–60 м от забоя; д) 90–125 м от забоя. В процессе проходки ствола все выделенные зоны подтвердились.

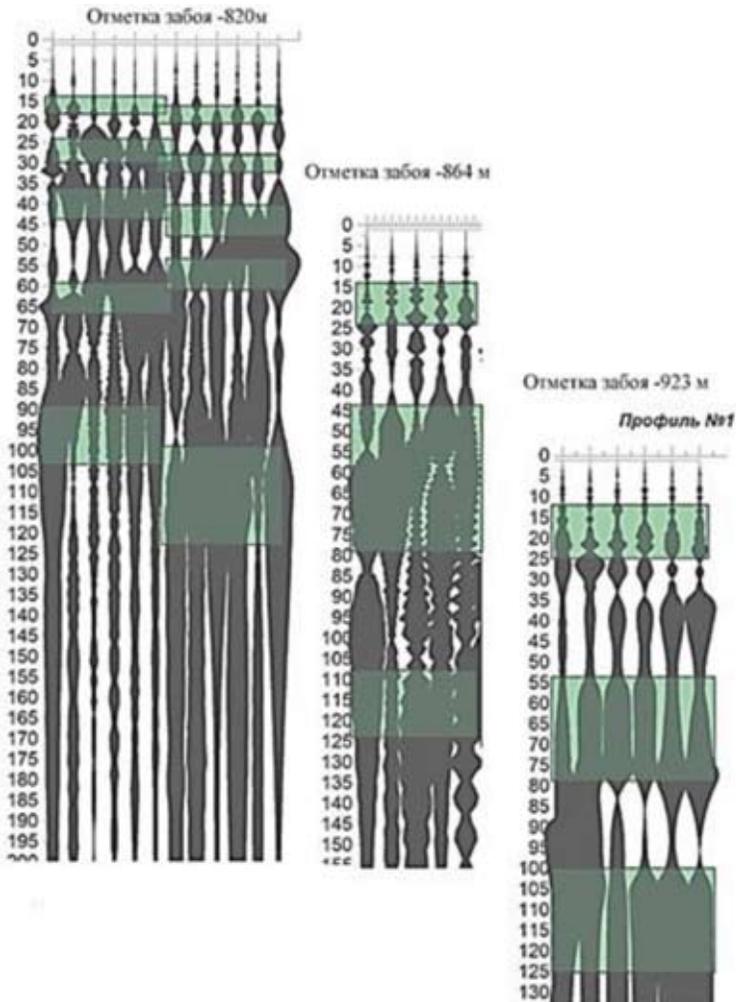


Рисунок 3.15. Спектральные сейсморазрезы по трем измерениям на отметках 820 м (1), 864 м (2) и 923 м (3). Ствол «Вентиляционный»

По геологическому строению массив в этих отметках представлен интенсивно раздробленными серпентинитами со слабой устойчивостью, что привело к заколообразованию и частичному осыпанию стенок ствола. По результатам мониторинга были даны рекомендации по безопасной проходке наиболее опасных участков и вслед за продвижением забоя предусматривается установка временной крепи, согласно проекту строительства ствола, с опережающим упрочнением вмещающего массива горных пород.

По данным последней серии зондирования, при нахождении забоя на глубине 923 м опасения вызывает зона, отстоящая от забоя на 70–95 м и находящаяся на глубине 993–1018 м. Эта зона выявляется также и зондированием от забоя на глубине 864 м. Этот участок протяженностью порядка 35 м наиболее опасен при проходке ствола и может привести к проблемам в обеспечении его устойчивости.

Представленные результаты опережающего геофизического зондирования породного массива по трассе проходки ствола наглядно свидетельствуют, что метод ССП может использоваться в качестве ценного дополнения (а в перспективе, возможно, и как альтернативный метод) к результатам, получаемым бурением передовых разведочных скважин.

Сейсморазведочное профилирование методом преломленных волн

Объектом исследования сейсморазведки является геологическая среда, целью изучения — ее акустические свойства, а в качестве метода используется распространение упругих волн [42].

Сведения о свойствах пород верхней части разреза (скорости распространения продольных волн) на исследуемой территории могут быть получены в результате проведения сейсморазведочных работ методом преломленных волн (МПВ). В первом приближении чем выше скорость сейсмической волны, тем менее нарушен массив углей.

Результаты сейсмических работ — это сведения об упругих (акустических) свойствах изучаемого геологического разреза. Акустические свойства, в свою очередь, связаны с составом и условиями осадконакопления отложений и образования пород, что используется при геологической интерпретации сейсмических результатов для прогнозирования геологического строения изучаемой территории и месторождений полезных ископаемых (нефти, газа, угля, руды и т.п.),

определения прочностных свойств пород и насыщения водой при инженерно-гидрогеологических изысканиях [43, 44].

В основе проведения сейсмических работ (полевых наблюдений, обработки получаемых материалов и интерпретации результатов) лежит физическое представление о волновой картине, возникающей в некоторой геологической среде при возбуждении в ней упругих волн. Хотя геологическая среда по упругим свойствам, как правило, очень сложная — неоднородная и анизотропная, ее можно с разной степенью приближения представить в виде упрощенных упругих моделей, в которых распространение волн можно описать простыми физическими законами.

В методе преломленных волн в качестве полезных чаще всего используют продольные преломленные и преломленно-дифрагированные волны, хотя иногда используют обменные и реже поперечные колебания. Это означает, что методика работ и обработка материалов должны быть направлены на возбуждение, регистрацию и использование только полезных волн. Все прочие сейсмические волны относят к помехам.

В процессе выполнения работ на земной поверхности раскладывается специальная кабель («коса») с подключенными сейсмоприемниками. В качестве средства возбуждения волн используется импульсный источник — кувалда с массой рабочей части 6 кг. В нескольких точках вдоль профиля (пункты возбуждения, ПВ) осуществляются удары кувалдой с одновременной регистрацией сейсмостанцией производимого сейсмического эффекта.

Обработка сейсморазведочных данных выполняется с помощью программного комплекса «RadExPro» [45], в котором производится фильтрация исходных данных, амплитудная регулировка и полосовая фильтрация с целью подавления помех и выделения полезных сигналов. Затем производится поканальная пикировка первых вступлений, построение годографов первых вступлений, и по ним производится оценка послышного разделения исследуемого массива по скорости продольной волны (V_p , км/сек).

Результаты сейсморазведочных исследований

Экспериментальные исследования по применимости сейсморазведки в варианте МПВ для выявления и определения пространственных параметров структурных неоднородностей выполнялись на полигоне, расположенном на прибортовом массиве угольного разреза.

В геологическом строении месторождения принимают участие терригенно-карбонатные отложения, представленные мелко- и грубозернистыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами, суглинистыми породами и углями. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород в районе угольного разреза весьма неоднородное. Характер проявления современной геодинамики на бортах разреза постоянный и умеренный. Здесь характерно дискретное распределение деформационных участков.

Результаты сейсморазведочных исследований на экспериментальном блоке № 3, 1В2, угольный разрез

На участке произведены сейсморазведочные работы по двум профилям, по четыре расстановки на каждом. В результате обработки построены сейсморазрезы распределения скоростей распространения продольных волн в среде (Рисунок 3.16). Отличительной особенностью блока от остальных является его повышенная обводненность с образованием луж на поверхности. Вода, заполняющая поры и трещины, увеличивает плотность пород. Кроме того, здесь в угле отмечается присутствие многочисленных прослоев аргиллита, которые

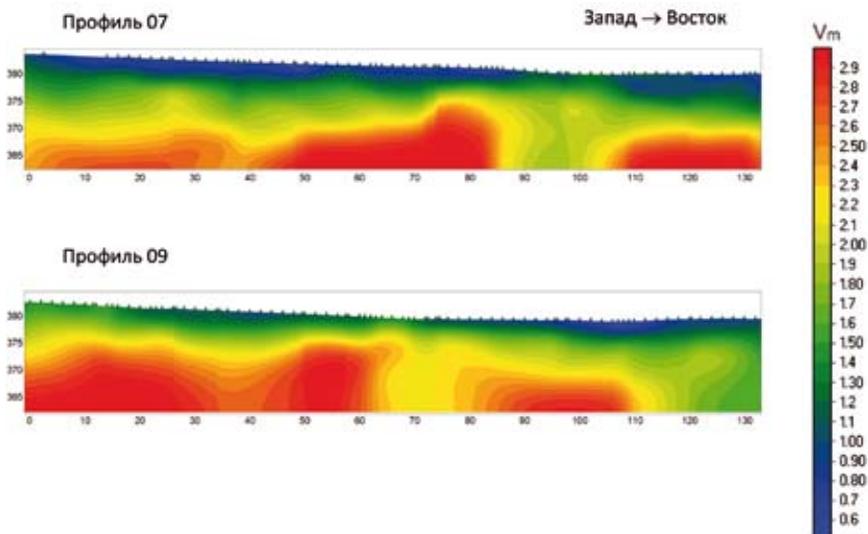


Рисунок 3.16. Разрезы распределения продольных скоростей исследований на участке № 3 1В2, угольный разрез

также характеризуются более высокими значениями скоростей распространения упругих волн, чем уголь.

Таким образом, на скорость распространения сейсмических волн в массиве влияют дополнительно два фактора, что и приводит к повышению показателя.

Уголь на профиле 07 в целом более дезинтегрирован, чем на профиле 09. Его верхняя часть (2–3 м) более трещиновата по сравнению с профилем 09. На профиле 07 на всю глубину исследований выделяется зона нарушенных углей в интервале 85–105 м. На профиле 09 зоны ослабленных углей отмечаются в интервалах 60–80 и 110–135 м. Поперек профилей на отметках 30–40 м наблюдается зона небольшого ослабления углей.

3.2 Геодинамическое районирование горного массива с использованием геофизических методов

Радонометрические исследования

Использование радонометрии в геодинамической диагностике основано на положительной корреляционной статистически выраженной связи между интенсивностью эманирования радона из горных пород и степенью воздействия на них напряженно-деформационного поля, поскольку поле радоновых эманаций надразломных участков формируется в соответствии с [46–48]:

- с дифференциацией по степени проницаемости, характерной для подвижных участков разломной зоны и определяющей условия миграции флюидов;

- с распределением степени воздействия упругих волновых колебаний, вызванных современной геодинамической активностью, на горные породы;

- со свойствами радона.

Измерения объемной активности радона (Бк/м³) в почвенном воздухе изучаемого массива выполняются радиометрами альфа-активных газов, например, РГА-500 по профильным линиям из шпуров, глубиной 0,8–1,0 м.

Расстояние между профильными линиями 20–30 м. Расстояние между точками измерения 5–10 м.

Поле радоновых эманаций формируется в зависимости от параметров поля напряжений горного массива. Но также его формирование зависит от ряда нетектонических факторов.

С целью определения геодинамической составляющей формирования поля радона выполняется нормирование. Для этого исследуемая территория подразделяется на участки с характерным, выдержанным фактором формирования поля радоновых эманаций, не связанного с современной геодинамической активностью:

- по вещественному составу горных пород;
- по гранулометрическому составу покровных отложений;
- по положению уровня грунтовых вод;
- по степени увлажнения покровных отложений и т.д.

Далее выполняется нормирование каждого значения объемной активности радона в почвенном воздухе, Q_i (Бк/м³), измеренной в границах выделенных участков:

$$N_i = \frac{Q_i}{Q_{\text{ср. группы}}}, \quad (3.3)$$

где N_i — нормированная объемная активность радона точки измерения i , безразмерная величина;

Q_i — значение объемной активности радона в почвенном воздухе точки измерения на профильной линии, Бк/м³;

$Q_{\text{ср. группы}}$ — среднеарифметическое значение объемной активности радона в почвенном воздухе группы точек измерений, Бк/м³.

Далее, применяя метод интерполяции, строится карта геодинамического районирования изучаемой территории на основе распределения нормированных значений объемной активности радона в почвенном воздухе изучаемой территории.

Исходя из того, что полученные нормированные значения объемной активности радона в почвенном воздухе характеризуют именно геодинамическую составляющую формирования поля радоновых эманаций, их распределение на изучаемой территории используется для геодинамического районирования. Интерпретация результатов радонометрии для геодинамического районирования осуществляется по принципу прямой зависимости формирования поля радона от распределения интенсивности современной геодинамической активности.

Исследования в этом направлении выполнены на геодинамическом полигоне одного из железорудных месторождений Урала.

Участок исследования расположен над залежью шахты и находится в зоне высокого уровня техногенного воздействия на горный массив — между двумя зонами обрушения от ведения подземных горных работ, в непосредственной близости от карьера и отвала этого карьера.

Исследуемый горный массив сложен вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами, представленными диоритами, габбро-диоритами, габбро, мраморизованными известняками.

Разрывные нарушения имеют субмеридиональное и субширотное простирание.

На начальном этапе отработки всего лишь одного рудного тела Южной залежи в 2009–2010 годах было зафиксировано anomальное проявление процесса сдвижения, что было вызвано особенностями напряженно-деформированного состояния горного массива. Предварительные расчеты показали устойчивость поверхности при отработке всей Южной залежи. Но на стадии отработки на глубине более четырехсот метров четырех секций камеры площадью всего лишь 3150 м² и объемом 271000 м³ произошло неожиданное обрушение поверхности в районе автодороги (рисунок 3.17).



Рисунок 3.17. Юго-западное направление зоны обрушения

Обрушение произошло по причине особенности поля напряжений массива — аномально депрессивного еще до начала разработки южной залежи. Трансформация поля напряжения под техногенным влиянием горных работ на массив происходит весьма интенсивно. Данная характеристика определила создание здесь геодинамического полигона для проведения экспериментальных исследований по применению радонометрии в геодинамической диагностике горного массива. Для производства маркшейдерско-геодезических наблюдений за процессом сдвижения на данном участке оборудована наблюдательная станция, состоящая изначально из двух профильных линий и ряда реперов для спутниковых измерений (Рисунок 3.18).

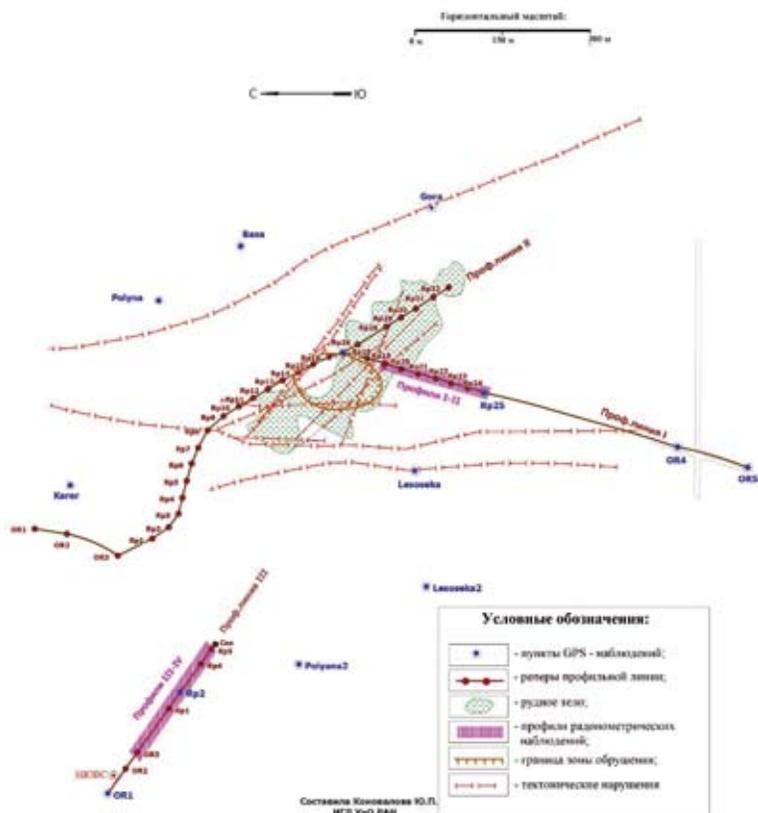


Рисунок 3.18. Наблюдательная станция над Южной залежью шахты

Радонометрические измерения выполнялись по двум профилям I-I и II-II на участке от $Rp19$ до $Rp25$ профильной линии I. Расстояние между профилями составляет 40 м. Расстояние между точками измерения 6–10 м. (Рисунок 3.18).

На рисунке 3.19 представлены результаты измерений, выполненных с 2013 по 2015 год. Сопоставление результатов трех серий

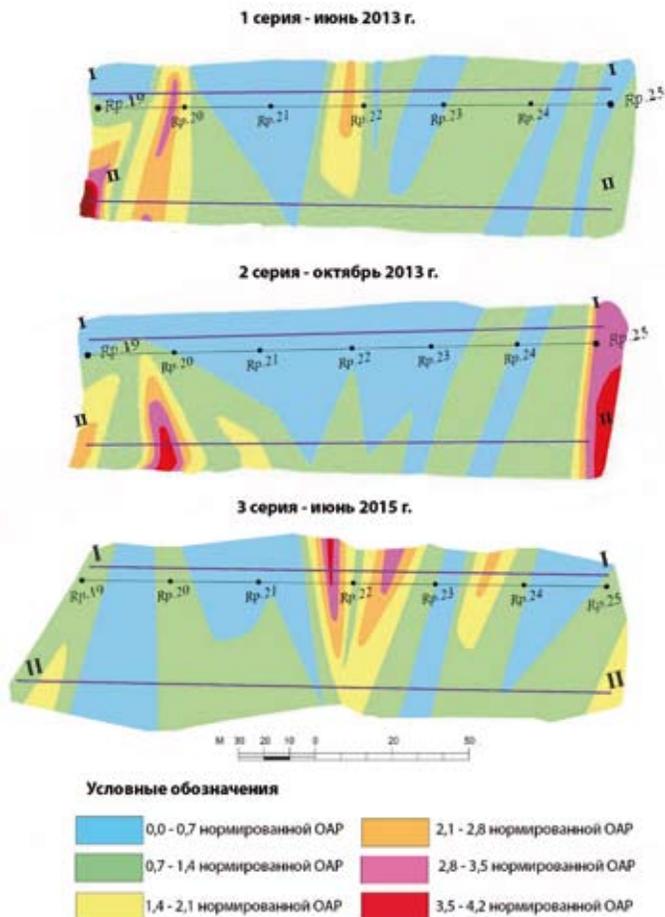


Рисунок 3.19. Результаты трех серий режимных наблюдений поля радона в зоне подземной разработки Южной залежи

режимных радонометрических измерений свидетельствует о значительных эволюционных изменениях деформационного поля изучаемого массива за периоды между сериями. Наблюдается «затухание» аномалий, выявленных в предыдущих сериях, и формирование новых. Так, например, между первой и второй сериями на участке $Rp19 - Rp24$ произошло снижение нормированных значений объемной активности радона, что свидетельствует об уменьшении растягивающих напряжений. Этот вывод подтверждается данными маркшейдерско-геодезического мониторинга. На рисунке 3.20 представлен график горизонтальных деформаций в интервале $Rp19 - Rp25$.

Геодезические наблюдения подтвердили достоверность результатов геодинамической диагностики с использованием радонометрии на исследуемом участке. Изменения поля радона в почвенном воздухе отражают трансформацию напряженно-деформированного состояния массива. При этом радонометрический метод позволяет без периодических измерений в отличие от геодезических измерений выявить зоны сосредоточения деформаций [49].

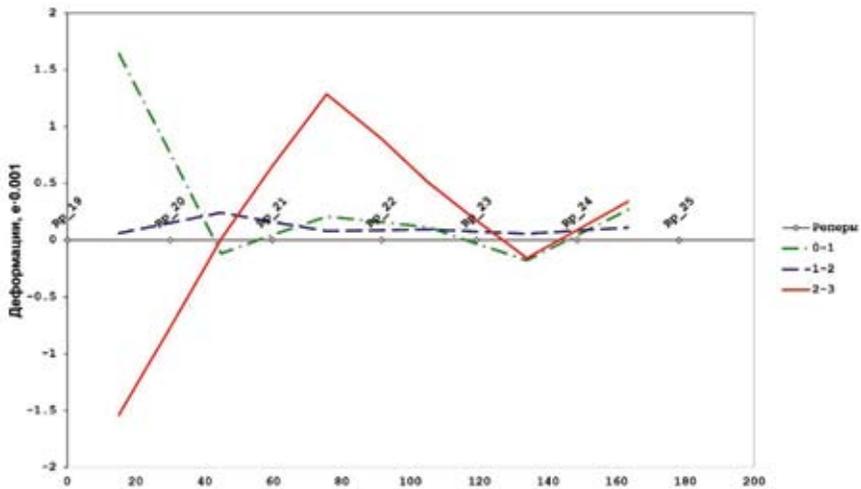


Рисунок 3.20. График горизонтальных деформаций по результатам геодезического мониторинга на участке профильной линии I за периоды, соответствующие трем сериям режимных наблюдений поля радона

Использование распределения нормированных значений объемной активности радона для ранжирования разрывных структур по степени геодинамической активности

С 2017 по 2018 год, одновременно с продолжающимися радонометрическими наблюдениями вдоль профилей I-I и II-II, были выполнены исследования возможности ранжирования деформационных участков по степени современной геодинамической активности с использованием данных радонометрии.

Данные радонометрические исследования выполнялись на участке «Вентиляционный» вдоль вновь заложенной линии геодезических наблюдений – профильной линии III-III. Здесь влияние горных работ на массив на момент начала исследований не столь значительно и геодинамическая ситуация более «спокойная», чем на участке профилей I-I и II-II. Исходя из этого, было сделано предположение, что положение в пространстве аномальных деформационных участков должно быть более стабильным, чем на профилях I-I и II-II.

Измерения параметров поля радона в почвенном воздухе выполнялись по профилям III-III и IV-IV (участок «Вентиляционный»). Расстояние между точками измерения составляет 10 м, между профильными линиями 30 м (Рисунок 3.21).

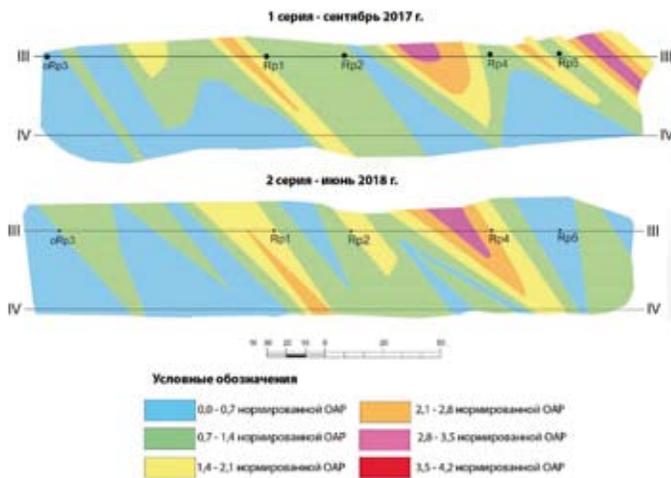


Рисунок 3.21. Результаты наблюдений поля радона в зоне действия подземных работ шахты на участке «Вентиляционный» 22.09.2017 и 21.06.2018.

Сопоставление результатов измерений параметров поля радоновых эманаций демонстрирует трансформацию напряженно-деформационного поля исследуемого горного массива за период между первой и второй сериями. Серии наблюдений фрагментарно отражают процесс трансформации поля напряжений исследуемого массива.

При оценке геодинамической ситуации используется индекс геодинамической активности рассматриваемой аномальной зоны:

$$I_{\text{геод. активн. зоны}} = \Sigma N : n = N_{\text{среднее по зоне}}, \quad (3.4)$$

где ΣN — сумма значений нормированных значений объемной активности радона в почвенном воздухе аномальной зоны в серии наблюдений;

n — количество измерений в пределах аномальной зоны в серии наблюдений.

За период между сериями радонометрических наблюдений на участке «Вентиляционный» произошли следующие изменения напряженно-деформационного состояния горного массива:

1. Аномальная зона, располагавшаяся в период наблюдений 2017 года восточнее *Rp.5* в 2018 году трансформировалась в участок с низким геодинамическим индексом:

$$\begin{aligned} I_{\text{геод. активн. зоны Rp.5 в 2017 г.}} &= 1,73; \\ I_{\text{геод. активн. зоны Rp.5 в 2018 г.}} &= 0,77. \end{aligned}$$

Геодинамическая активность на участке восточнее *Rp.5* снизилась на 55,5 %

2. Аномальная зона на участке *Rp.2-Rp.4*. Здесь наблюдается повышение геодинамической активности за период наблюдений:

$$\begin{aligned} I_{\text{геод. активн. зоны Rp.2- Rp.4 в 2017 г.}} &= 1,22; \\ I_{\text{геод. активн. зоны Rp.2- Rp.4 в 2018 г.}} &= 1,53. \end{aligned}$$

Геодинамическая активность на участке *Rp.2-Rp.4* увеличилась на 25,4 %

При этом:

— максимальные значения N в пределах участка «Вентиляционный» изменились с $N_{\text{max 2017}} = 2,8$ до $N_{\text{max 2018}} = 3,5$;

— минимальные значения N в пределах участка «Вентиляционный» изменились с $N_{\text{min 2017}} = 0,2$ до $N_{\text{min 2018}} = 0,5$.

3. В 2018 году по данным радонометрии наблюдается повышение геодинамической активности на *Rp.2*. Значения индекса геодинамической активности по данным радонометрии на *Rp.2* составили:

$$\begin{aligned} & \text{— в 2017 г. } I_{\text{геод. активн. зоны Rp.2 в 2017 г.}} = 0,8; \\ & \text{— в 2018 г. } I_{\text{геод. активн. зоны Rp.2 в 2018 г.}} = 1,45. \end{aligned}$$

Геодинамическая активность на *Rp.2* увеличилась на 81,25 %.

Результаты радонометрических наблюдений на локальном участке *Rp.2* соответствуют результатам геодезического мониторинга. Здесь за период между серией 1 и серией 2 зафиксированы вертикальные деформации.

4. В 2018 году наблюдается активизация геодинамической аномалии в районе *Rp.1*:

$$\begin{aligned} & \text{— в 2017 г. } I_{\text{геод. активн. зоны Rp.1 в 2017 г.}} = 1,34; \\ & \text{— в 2018 г. } I_{\text{геод. активн. зоны Rp.1 в 2018 г.}} = 1,51. \end{aligned}$$

Геодинамическая активность участка *Rp.1* увеличилась на 12,7 %.

Для участка «Вентиляционный» в целом по данным радонометрии индексы геодинамической активности за период между сериями наблюдений (22.09.2017 г. — 21.06.2018 г.) практически не изменились и составили:

$$\begin{aligned} I_{\text{участка «Вентиляционный» 2017}} &= 1,05; \\ I_{\text{участка «Вентиляционный» 2018}} &= 1,02. \end{aligned}$$

За период между сериями наблюдений, в выявленных на участке «Вентиляционный» аномальных зонах наблюдается увеличение индекса геодинамической активности по данным радонометрии. Исключением является зона, расположенная восточнее *Rp.5*. Индекс геодинамической активности здесь снизился на 55,5 % (Таблица 3.3).

Таблица 3.3

Изменение индекса геодинамической активности *I* на участке «Вентиляционный» с 2017 по 2018 год

Интервал реперов	$I_{2017 \text{ г.}}$	$I_{2018 \text{ г.}}$	Изменение индекса, %
<i>OR3-Rp1</i>	1,34	1,51	+12,7
<i>Rp1-Rp2</i>	0,8	1,45	+81,2
<i>Rp2-Rp4</i>	1,22	1,53	+25,4
<i>Rp4-Rp5</i>	1,73	0,77	-55,5

Проведенные исследования и разработанная методика применения эманационной съемки для геодинамической диагностики массива горных пород позволили сформулировать следующие выводы:

- радонометрический метод позволяет с высокой степенью детальности определить геодинамическую ситуацию горного массива без периодических измерений, т.е. может являться экспресс-методом геодинамической диагностики;
- периодические измерения поля радона позволяют наблюдать изменения геодинамической ситуации исследуемого участка;
- геодинамическая модель, построенная на основе нормированных значений объемной активности радона, отражает геодинамическую составляющую, которая сформирована всем спектром частот современной геодинамической активности;
- определение геодинамической ситуации с использованием нормированных значений объемной активности радона позволяет ранжировать локальные участки массива по степени современной геодинамической активности [50].

Данная методика была использована для геодинамического районирования на прибортовом массиве угольного разреза.

В геологическом строении горного массива месторождения принимают участие терригенно-карбонатные отложения, представленные мелко- и грубозернистыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами, суглинистыми породами и углями. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород в районе угольного разреза весьма неоднородное. Характер проявления современной геодинамики на бортах разреза постоянный и умеренный. Здесь характерно дискрет-

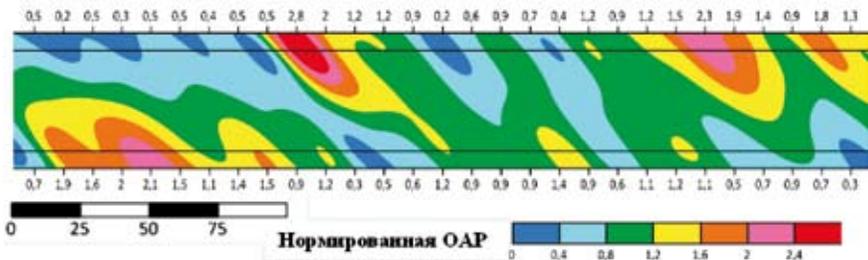


Рисунок 3.22. Карта геодинамического районирования горного массива по результатам радонометрии. 2-й радонометрический участок. Прибортовой горный массив угольного месторождения, 2019 г.

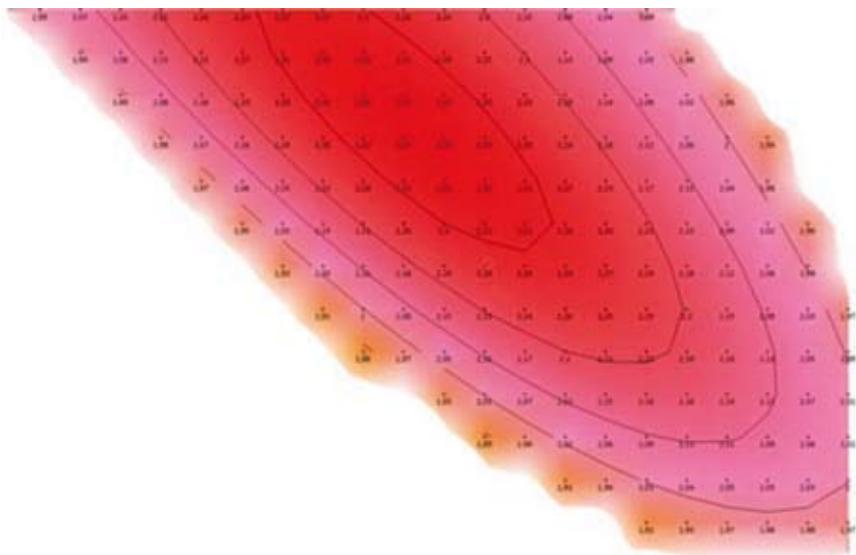


Рисунок 3.23. Пример использования программы «*Surfer*» при определении индекса геодинамической активности. Аномальная зона на 2-м радонометрическом участке. Прибортовой горный массив угольного месторождения [51]

ное распределение деформационных участков. В результате исследований была построена карта геодинамического районирования прибортового участка по данным радонометрии (Рисунок 3.22).

Для ранжирования деформационных зон (аномалий эманаций радона) по степени геодинамической активности определены индексы геодинамической активности $I_{\text{геод. активн. зоны}}$ (3.3).

Использование программы моделирования и анализа данных «*Surfer*» при определении индекса геодинамической активности позволяет повысить достоверность результата за счет привлечения к расчетам кроме нормированных значений объемной активности радона в почвенном воздухе N , определенных по результатам натурных измерений, значений, полученных при интерполяции (Рисунок 3.23).

Сейсмомикрорайонирование

С целью изучения геодинамического воздействия вмещающего горного массива на объект недропользования, с учетом результатов

геодинамического районирования, выполняются сейсмические и сейсмологические исследования.

В рамках разработки методики интерпретации данных сейсмического мониторинга была проведена работа по анализу достижений в области цифровой обработки сигналов (ЦОС), сейсмологии, инженерной сейсморазведки, механики грунтов.

В рамках предлагаемого подхода задача сводится к определению и анализу резонансных характеристик охраняемых объектов, грунтов в основании охраняемых объектов, определение возможных сейсмических событий, их характерных особенностей (выделяемой энергии, повторяемости, частоты, амплитуды смещений).

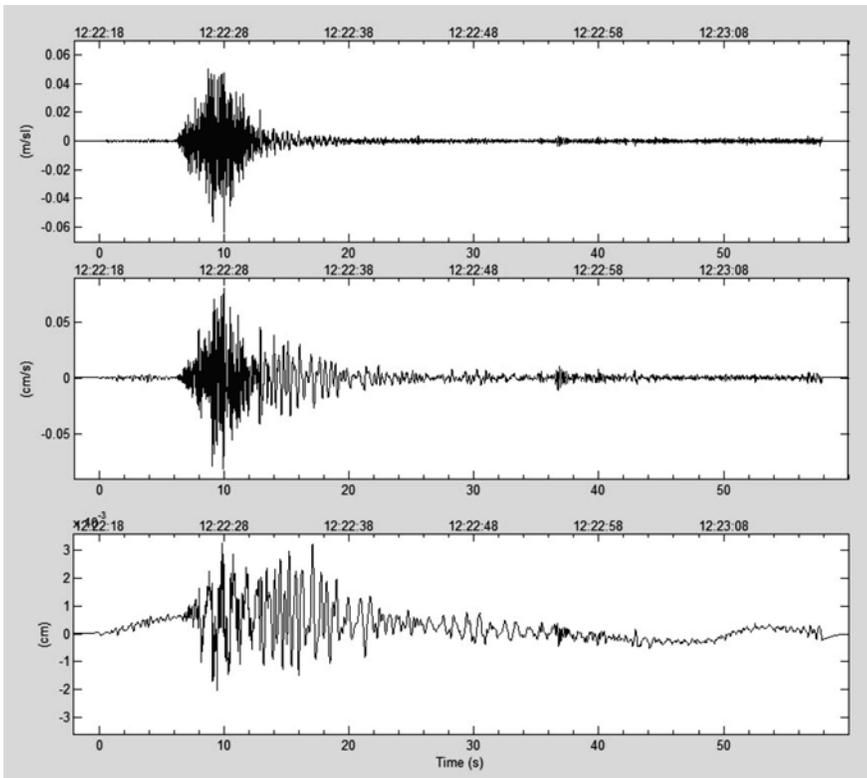


Рисунок 3.24. Сигнал с записью одной компоненты сейсмического воздействия от взрыва на удалении 2 км с рассчитанными из скоростей смещений смещениями и ускорениями смещений

Естественная и техногенная сейсмичность — это «быстрая» составляющая геодинамического процесса [52]. Исследование сейсмичности территории позволит определить механизм воздействия «быстрой» части спектра современных геодинамических движений земной коры на объекты недропользования. Для реализации этих целей предлагается следующий набор методов:

1. Исследование сейсмического волнового поля участка исследований. На этапе полевых исследований производится регистрация трех компонент скоростей смещений (либо ускорений смещений) грунта (с записью как естественного и техногенного шумов земли, так и сильных движений, наподобие удаленных землетрясений, сейсмического воздействия взрывов) на участке исследований в течение необходимого времени на каждой точке измерений с организацией опорной точки измерений. Далее производится анализ волновых форм и пересчет выбранных участков зарегистрированного сигнала в смещения, ускорения смещений грунта (Рисунок 3.24). Данный прием позволяет сократить используемую базу инструментов при сохранении получения большого объема информации.

2. Спектральный анализ сигнала с применением алгоритма Быстрого преобразования Фурье (БПФ) (Рисунок 3.25). Анализ плотности спектральной мощности. Построение спектров реакции

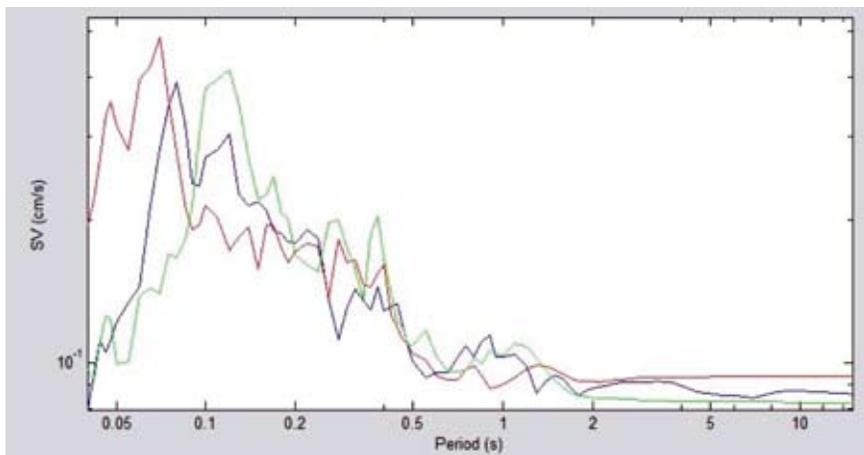


Рисунок 3.25. Спектр записи скоростей смещений трех компонент
Примечание: синяя — горизонтальная, запад-восток; зеленая — горизонтальная, север-юг; красная — вертикальная компонента

грунта — это удобный способ для анализа получаемого материала (Рисунок 3.26).

3. Расчет действующего, среднего и максимального значений амплитуды сигнала, преобладающей частоты, коэффициента пространственного затухания и нормированной площади спектра для зарегистрированных событий, пиковых ускорений грунта. Данные параметры необходимы для моделирования при прогнозировании опасных воздействий.

При необходимости применяется фильтрация для устранения помех.

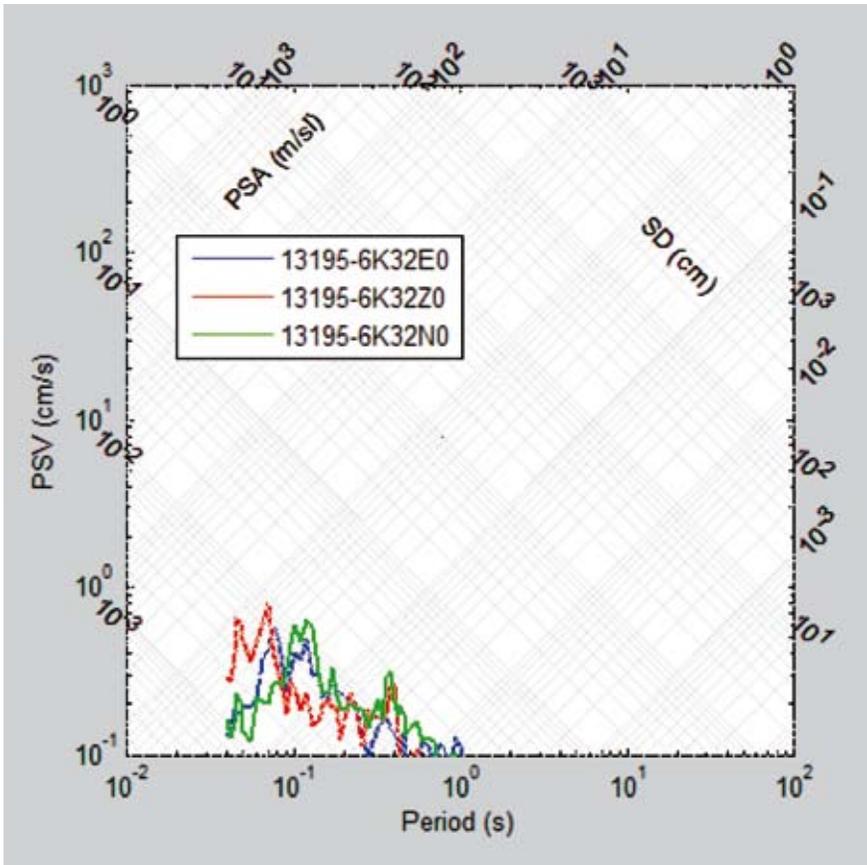


Рисунок 3.26. Спектр реакции грунта на сейсмическое воздействие взрыва

Применение вейвлет-преобразования для определения частотно-временных характеристик сигнала при исследовании сильных движений грунта, например, при исследовании влияния сейсмического эффекта от взрывов на охраняемые объекты (Рисунок 3.27). Применение вейвлет-преобразования позволяет эффективно исследовать состав и изменение сигнала во времени. При необходимости применяется фильтрация для устранения помех.

Расчет отношений спектров по методу Накамура. Необходим для исследования анизотропии упругих свойств грунтов через определение максимальной разницы по уровню амплитуд вертикальных к горизонтальным колебаниям с привязкой по частоте (Рисунок 3.28). Данная методика дополнительно позволяет определять либо мощность

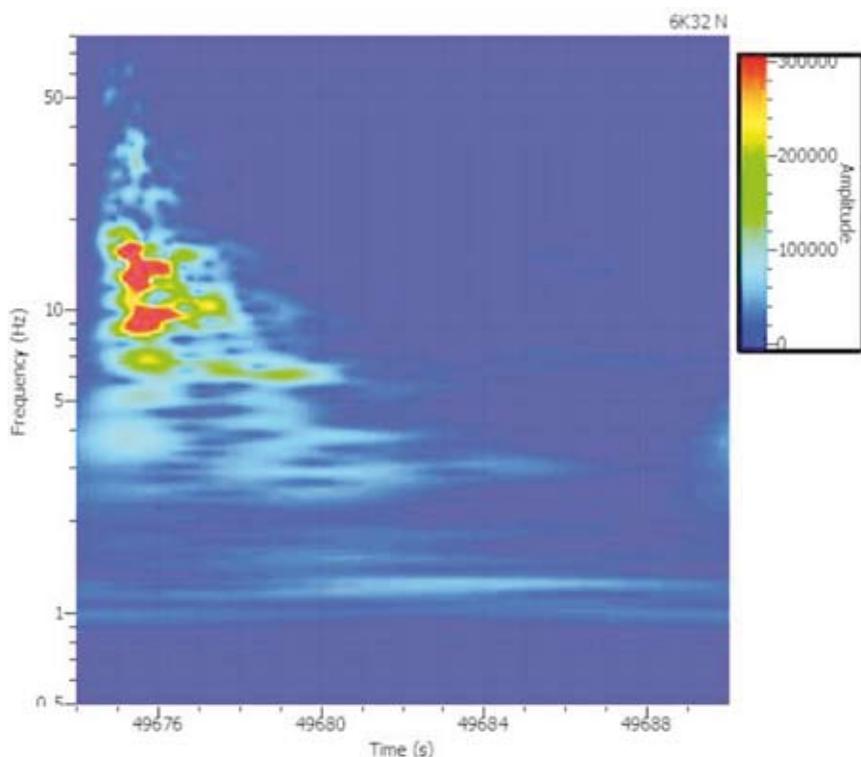


Рисунок 3.27. Частотно-временная характеристика одной компоненты записи сейсмического эффекта от взрыва, амплитуда в мкВ

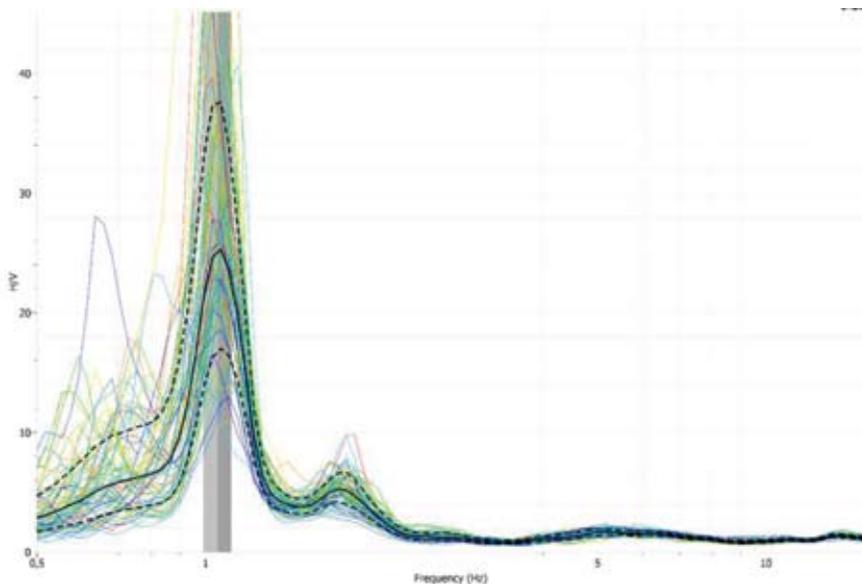


Рисунок 3.28. Спектр отношений H/V грунта по методу Накамура

рыхлых отложений, либо средневзвешенную скорость поперечных волн рыхлых отложений.

Определение сейсмических жесткостей грунтов в основании охраняемых объектов методами многоволновой сейсморазведки (МПВ, МОГТ, MASW, SASW, ReMi).

Ранее было продемонстрировано, как определить свойства опасных ожидаемых сейсмических событий. Данные методики позволяют получить достоверную информацию об изменении сейсмических колебаний при прохождении через грунты, лежащие в основании охраняемых объектов и о том, какое в итоге воздействие они окажут непосредственно на фундамент сооружения, а также что произойдет с грунтами в этот момент с учетом нелинейности.

Следующий шаг – определение реакции охраняемого объекта. Для решения этой задачи в качестве перспективного мы предлагаем применять метод стоячих волн, позволяющий получить пространственное распределение резонансных характеристик объектов недропользования [53].

Методика структурно-геодинамической диагностики горного массива в различных вариантах комплексирования геофизических

методов исследований позволяет определить его геомеханическое состояние и выполнить предварительное районирование, определить индекс геодинамической активности подвижных структур по данным радонометрии.

Результаты структурно-геодинамической диагностики позволяют снизить риск и уменьшить тяжесть последствий техно-природных катастроф в сфере недропользования для различных горно-геологических условий.

Методика позволяет выявить разрывные структуры, определить их пространственные и геодинамические параметры, смоделировать механизм и характеристики воздействия современных движений в верхней части литосферы на объекты недропользования на этапах изысканий, строительства и эксплуатации.

Исследования по использованию мониторинговых наблюдений методом срединного градиента для геодинамического районирования

В ИГД Уро РАН выполнены аналитические исследования по проверке возможности использования метода срединного градиента для геодинамического районирования горного массива. Идея исследований заключается в подтверждении соответствия распределения геодинамической активности по данным периодических измерений методом срединного градиента и по результатам периодических геодезических измерений.

Современная геодинамическая активность изменяет объем пор и трещин, в той или иной степени заполненных водным раствором различных солей, являющимся электролитом. Это отражается на изменении значений поля электрического сопротивления. Но кроме современной геодинамической активности на формирование электропроводности горных пород в приповерхностной зоне существенно влияют метеорологические условия (атмосферные осадки, температура воздуха, скорость ветра в зависимости от метеорологических условий, которые различны в периоды между сериями измерений). В то же время их влияние на участок распределяется равномерно. Таким образом, электрическое сопротивление горных пород в приповерхностной зоне изменяется под влиянием двух факторов: метеорологических условий и современной геодинамики. Для определения только геодинамической составляющей формирования значений кажущегося электрического сопротивления при мониторинговых

исследованиях методом срединного градиента предложено использовать метод нормирования.

С целью поиска возможных зависимостей между изменениями в замеренном геофизическом поле и изменениями в результатах геодезических измерений было проведено их сравнение. Для устранения влияния метеорологических факторов (атмосферных осадков) на результаты измерения кажущихся электрических сопротивлений было выполнено нормирование. Нормирование произведено путем деления каждого значения кажущихся электрических сопротивлений

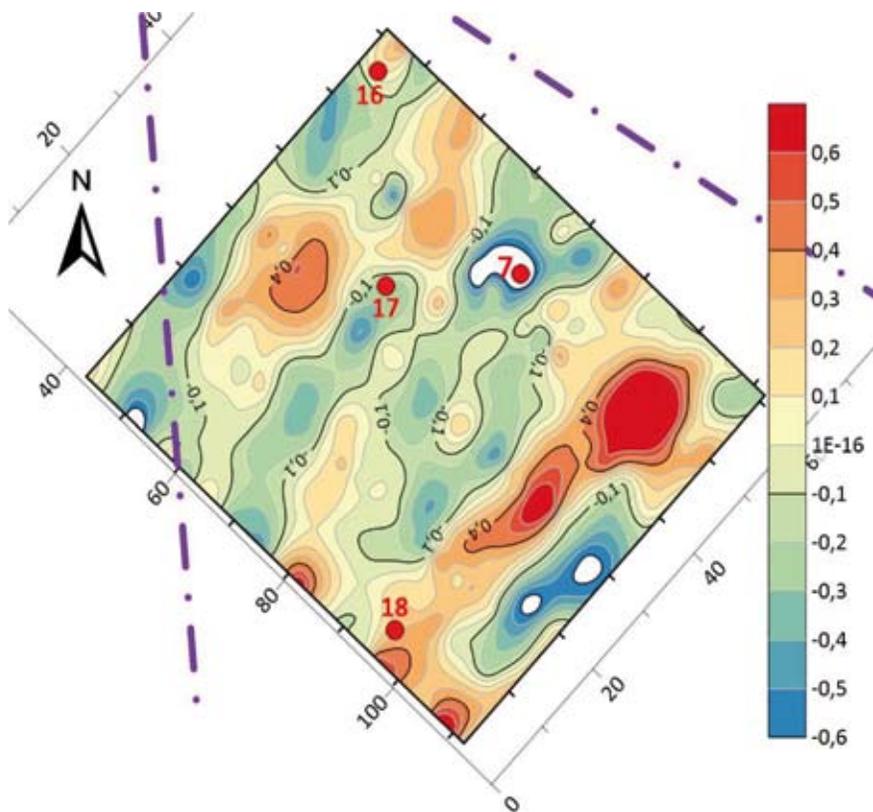


Рисунок 3.29. План распределения разницы нормированных значений кажущихся сопротивлений между измерениями 2021 и 2019 гг. Месторождение хромитов, Пермский край

на участке исследования на среднее значение кажущихся электрических сопротивлений по участку (3.5):

$$R'_i = R_i / R_m, \quad (3.5)$$

Далее из нормированных значений кажущихся электрических сопротивлений за 2021 г. были вычтены нормированные значения кажущихся электрических сопротивлений за 2019 г. По полученным величинам построена карта (Рисунок 3.29). Предполагается, что распределение полученных в результате величин отражает изменение напряженно-деформированного состояния изучаемого горного массива за период между сериями наблюдений.

Красными окружностями на рисунке 3.29 показаны актуальные геодезические реперы, попадающие на рассматриваемый участок. По результатам обработки геодезических измерений для данных реперов была составлена таблица 3.4, в которой также приведены осредненные значения, полученные с карты, приведенной на рисунке 3.29.

Таблица 3.4

Изменения на рассматриваемом участке за период 2021–2019 гг.

Номер реперной точки	По данным электроразведки		По данным геодезических измерений					
	Разница нормированных значений ρ_k	Среднее ρ_k между реперами	Оседания реперов, мм	Наклоны линий, $i \cdot 0.001$	Скорость наклонов, мм/м в месяц	Изменения длин, мм	Гориз. деформ., $e \cdot 0.001$	Скорость деформ., мм/м в мес
1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	-0,70		3					
		-0,32		-0,25	-0,010	0	0,01	0
17	0,05		1					
16	0,35		2					
		0,16		0,03	0,001	-5	-0,16	-0,006
17	0,05		1					
		0,08		-0,13	-0,005	10	0,22	0,009
18	0,02		7					

Для наглядности по некоторым данным из таблицы были построены графики. Они представлены на рисунке 3.30.

Сравнивая графики *а* и *б*, можно заметить схожий характер изменений параметров, а сравнивая графики *а* и *в* (и зависящий от него график *г*), можно увидеть обратную зависимость. На межреперном интервале «7–17» при практически нулевом изменении его длины наблюдается значительный наклон, что затем находит отражение в уменьшении нормированного значения кажущегося удельного электрического сопротивления. На межреперном интервале «16–17» наклон линии близок к нулю, и имеется сокращение его длины, что выражается в увеличении нормированного значения кажущегося удельного электрического сопротивления. На межреперном интервале «17–18» вновь отмечается наклон линии, а также значительное растяжение в горизонтальной плоскости, что приводит к небольшому увеличению нормированного значения, кажущегося удельного электрического сопротивления.

В связи с имеющейся малой выборкой делать однозначные выводы преждевременно. Однако представленные результаты являются

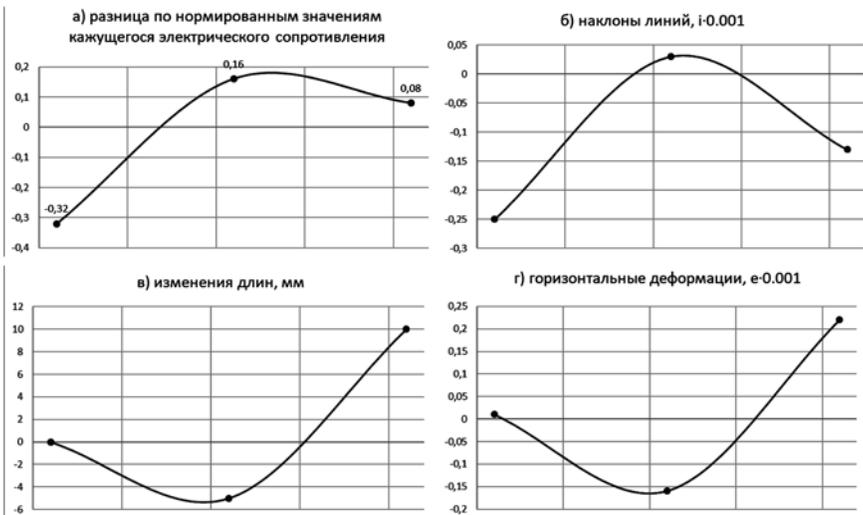


Рисунок 3.30. Изменения на рассматриваемом участке между измерениями 2021 и 2019 гг. Точки на графиках принадлежат межреперным интервалам «7–17», «16–17» и «17–18», соответственно. Месторождение хромитов, Пермский край

предпосылкой для продолжения изучения применения мониторинговых наблюдений методом срединного градиента в исследованиях проявлений современной геодинамики.

3.3. Изучение вещественного состава пород коры выветривания в комплексе геодинамической диагностики горного массива

Для обеспечения безопасной эксплуатации объектов недропользования необходимо прогнозировать возможность и условия формирования критических состояний процесса деформирования горного массива. При этом продуктивно привлекать и соответствующим образом интерпретировать всю, в том числе общегеологическую, информацию об исследуемом горном массиве. Так, при выполнении геодинамической диагностики следует в том числе учитывать и выполнять исследование динамических свойств горных пород — изменения физико-механических характеристик (реакции горных пород) при динамическом воздействии на них. Динамические свойства горных пород — это различные формы реакции грунтов на динамические нагрузки, или их динамическая неустойчивость, под которой понимается увеличение деформируемости и снижение прочности грунта при динамическом нагружении по сравнению со статическими условиями.

Одним из комплекса факторов, формирующих деформационный процесс горного массива, являются физико-механические свойства горных пород и, в частности, их способность к тиксотропному разупрочнению.

Тиксотропия — физико-химическое явление, возникающее в дисперсных породах и выражающееся в их разжижении и полной потере прочности под влиянием внешних динамических воздействий и быстром восстановлении прочности при снятии внешних воздействий. Такие обратимые явления характерны для пород, обладающих структурными связями, обусловленными непосредственным взаимодействием частиц и агрегатов между собой. Эти связи отличаются малой прочностью, мобильностью и обратимостью.

Степень тиксотропного разупрочнения зависит от внешних и внутренних факторов. К внешним факторам относятся динамические

воздействия на горный массив: современная геодинамическая активность, воздействие взрывных работ, движения транспорта и т.д.

К внутренним факторам относятся гранулометрический состав породы, ее минеральный состав и влажность.

Гранулометрический состав грунтов имеет принципиальное значение возможности тиксотропных изменений. Тиксотропные явления начинают наблюдаться уже при наличии в грунте глинистых частиц в количестве 1,5–2,0 %.

Наиболее склонны к проявлению тиксотропии глинистые породы, имеющие в составе монтмориллонит и гидрослюды.

Для минералов монтмориллонитовой группы ($m\{Mg_3[Si_4O_{10}][OH]_2\} \cdot p\{Al, Fe\}2[Si_4O_{10}][OH]_2\} \cdot nH_2O$), вследствие особенностей строения кристаллической решетки, характерным признаком является переменное содержание в них воды, изменяющееся в зависимости от влажности окружающей среды. Вода легко проникает в кристаллическую решетку монтмориллонита, раздвигает ее и обуславливает сильные его гидрофильность и набухаемость. Высокие гидрофильность и набухаемость определяют тиксотропность монтмориллонита.

Гидрослюды являются промежуточным продуктом выветривания слюд. Разрушение кристаллической решетки слюд (на примере мусковита) $KAl_2(OH)2AlSi_3O_{10}$ происходит по схеме замещения ионов калия ($K+1$) на связанные молекулы воды (H_2O).

Кристаллическая структура гидрослюды незначительно отличается от структуры слюды и является переходной к структуре монтмориллонита. Пакеты слюды переслаиваются с пакетами монтмориллонита.

Молекулы H_2O располагаются в межпакетных пространствах, т.е. проникают вдоль плоскостей, разграничивающих плоские пакеты кристаллической структуры. Каждый пакет с обеих сторон на внешних плоскостях содержит гидроксильные ионы и, следовательно, пакеты примыкают друг к другу по поверхностям. Поэтому при проникновении воды происходит раздвижение этих пакетов. При этом межплоскостные расстояния кристаллической решетки могут колебаться в значительных пределах — от 9,6 до 28,4 Å в зависимости от количества молекул H_2O , участвующих в кристаллической структуре минерала.

Опыт исследований на различных горных предприятиях подтверждает необходимость изучения минерального состава глинистых пород в комплексе геодинамической диагностики [54, 55].

В качестве примеров изучения динамических характеристик дисперсных горных пород в комплексе геодинамической диагностики представлены исследования горных массивов одного из железорудных месторождений, обрабатываемого открытым способом, и Березовского месторождения золота.

Исследования оползневого участка карьера

На Северном борту карьера, периодически, в течение десятилетий, происходили крупные оползни при углах наклона борта 220. По всем расчетным оценкам скальные осадочные породы, слагающие этот борт, должны обеспечивать его устойчивость при углах 28–30° с нормативным запасом устойчивости 1.3. Взаимосвязь оползнеобразования с временами года отсутствует. Многочисленные исследования, выполненные по всем правилам традиционными методами, так и не раскрыли причины и механизм оползнеобразования.

Институтом горного дела УрО РАН под руководством А.Д. Сашурина выполнена комплексная геодинамическая диагностика, по результатам которой был определен механизм формирования оползневого процесса и пути борьбы с ним.

Оползнеопасный участок расположен на Северном борту карьера в зоне широтного разлома, мощностью около 500 м. Северный борт карьера в верхней и средней части сложен слоистыми породами устькутской и верхоленской свит, а в нижней части туфогенными образованиями.

Породы устькутской свиты представлены чередующимися пачками толстослоистых известняков, известняковых песчаников и тонкоплитчатых разновидностей этих пород с прослоями алевролитов, аргиллитов, мергелей, глин. В основании породы устькутской свиты имеют более низкие прочностные характеристики, чем вверху. Породы устькутской свиты залегают с углом падения 10–12° в сторону выработанного пространства карьера. На контуре карьера в нагорной части их мощность составляет 80 – 90 м. (Рисунок 3.31).

Средняя часть Северного борта сложена породами верхоленской свиты: аргиллитами, алевролитами и мелкозернистыми песчаниками.

В нижней части Северного борта залегают в основном туфогенные образования. В тектонических зонах породы разрушены до состояния дресвы, брекчии, глины.

Глины отмечаются по всему разрезу Северного борта. Они заполняют межблочное пространство. Вещественный состав глин опреде-

ляет их особенности и принципиально важен. По данным В.Г. Зотева, на месторождении глинистая фракция выветрелых пород представлена монтмориллонитом и гидрослюдами, как было описано выше, наиболее склонными к проявлению тиксотропии глинистыми породами.

В Северном борту карьера находится гидротехнический тоннель, по которому из карьерного поля отведена река. При обследовании тоннеля было установлено, что монолитная железобетонная крепь на участке разломной зоны трещинами разрыва разбита на отдельные секции длиной 7–10 м, из которых в тоннельное пространство поступают подземные воды, иногда фонтанируя под давлением, что свидетельствует о значительной обводненности массива [56].

По сведениям Н.И. Ермакова, очевидно, непосредственно наблюдавшие оползни Северного борта карьера месторождения, отмечали, что они имели селеподобный вид. Для селеобразования определяющее значение имеют тиксотропность и плавучатость горных пород.

Комплекс геодинамической диагностики, использованный ИГД УРО РАН при изучении горного массива Северного борта карьера, включал:

- 1) Геодезические исследования;
- 2) Геофизические исследования;
- 3) Гидрогеологические исследования;
- 4) Лабораторные испытания.

Геодезические исследования. Наблюдения с применением технологий спутниковой геодезии *GPS* в районе оползневой зоны показали высокий уровень современной геодинамической активности.

Для геологической среды характерна постоянная подвижность как естественная форма существования. Современные геодинамические движения подразделяются на трендовые и циклические.

Относительное перемещение блоков происходит по разрывным нарушениям.

Трендовые движения сохраняют на относительно продолжительных промежутках времени направление и скорость смещения [57– 59]

Циклические геодинамические движения имеют периодические знакопеременные изменения направления движения и характеризуются частотой циклов и амплитудой перемещения в цикле [60].

В результате исследований определено, что в районе Северного борта карьера короткопериодные циклические геодинамические дви-

жения вызывают до 20–25 циклических нагружений массива в час с амплитудами 0,2–0,3 МПа. Длиннопериодные циклические геодинамические движения обуславливают здесь изменения напряжений в массиве за годичный цикл до 0,3 – 0,5 МПа. А за 30-летний период изменения напряжений достигают 2 – 3 МПа.

Геофизические исследования. Определение структурных особенностей массива Северного борта выполнены с использованием методов ССП (спектрального сейсмопрофилирования), геоэлектрическим методом в варианте срединного градиента. С целью выявления подвижных разрывных структур и предварительного геодинамического районирования была выполнена эманационная радоновая съемка.

Согласно результатам радонметрических исследований в варианте эманационной съемки в оползневой зоне были выявлены две подвижные системы разрывных нарушений:

- с азимутом простирания 355° ;
- с азимутом простирания 11° (Рисунок 3.31).

Анализ *гидрогеологической ситуации* исследуемого массива показал, что на участке Северного борта сформировались условия для



Рисунок 3.31. Северный борт карьера. Результаты радонметрических исследований 2007 года

переувлажнения глинистых пород, заполняющих межблоковые зоны горизонтальной и вертикальной ориентировкой залегания.

Лабораторными испытаниями с использованием пенетрометра Разоренова установлено, что глинистые породы горного массива оползневой зоны и тела оползня, при влажности от 20 до 40% проявляют тиксотропные свойства с коэффициентами чувствительности от 1,05 до 1,97. Результаты испытаний приведены в таблице 3.5. Порода считается тиксотропной при значении величины тиксотропного упрочнения больше 1,0. Лабораторные испытания показали, что уже при влажности 0,200 д. е. порода, отобранная из оползня (переотложенный алеврит), обладает тиксотропными свойствами (величина тиксотропного упрочнения 1,96).

Таблица 3.5

Результаты лабораторных испытаний тиксотропных свойств пород

№ пробы	Место отбора пробы	Влажность, W, д.е.	Плотность породы, ρ , г/см ³	Удельное сопротивление пенетрации, мгновенное, кг/см ²	Удельное сопротивление пенетрации через 10 суток, кг/см ²	Величина тиксотропного упрочнения
1	Северо-зап. борт, гор. 345	0,304	1,94	0,20	0,21	1,05
2	Северо-зап. борт, гор. 345	0,341	1,71	0,30	0,59	1,97
3	Из оползня	0,391	1,69	0,19	0,20	1,05
4	Из оползня	0,360	1,77	0,34	0,64	1,88
5	Из оползня	0,315	1,85	0,14	0,23	1,64
6	Из оползня	0,200	1,85	0,26	0,51	1,96

Примечание. Испытания проводились из отсева фракции менее 2 мм, при заданной влажности.

Кроме того, проба № 1 при заданной влажности 0,4 д. е. приобрела свойства пльвуна. Даже при незначительном встряхивании наблюдалось разжижение породы.

По результатам комплексной диагностики была подтверждена гипотеза о механизме оползнеобразования, наблюдаемого в пределах Северного борта карьера. Под влиянием современных короткопериодных геодинамических движений переувлажненные, характеризующиеся тиксотропным разупрочнением глинистые породы, заполняющие межблоковые пространства, находятся в неустойчивом, потенциально текучем состоянии. Далее длиннопериодные цикличные нагрузки в определенный момент, когда параметры системы приобретают «благоприятные» значения, в так называемой точке бифуркации переводят подготовленный массив в селеобразные оплывины.

Таким образом, процесс оползнеобразования на Северном борту карьера определяют три фактора:

1. Увлажнение глинистых, склонных к тиксотропному разупрочнению глинистых пород.

2. Воздействие на массив короткопериодных циклических геодинамических нагрузок, поддерживающих глинистые, гидрослюдистомонтмориллонитовые породы в неустойчивом состоянии.

3. Периодические длиннопериодные цикличные геодинамические движения, как спусковой механизм, вызывают сползание подготовленного массива в виде масштабных оплывин.

Природа перечисленных факторов, формирующих оползневые процессы в карьере, позволяет реально воздействовать только на гидрогеологический режим с целью уменьшения увлажнения глинистых пород.

Исследования горного массива на Березовском месторождении золота

Березовское месторождение находится в пределах зоны, сложенной осадочными и субвулканическими образованиями, вмещающих интрузии основного и кислого составов, и представляет собой совокупность многочисленных крутопадающих даек березитизированных гранитоидов, к которым приурочены сульфидно-кварцевые золотоносные жилы. Длина жил изменяется в пределах 10–30 м, а их мощность — от долей сантиметров до 1,5 м.

Рыхлые мезокайнозойские отложения в пределах Березовского рудного поля представлены глинистой корой выветривания. Мощность

коры выветривания, развитой повсеместно, составляет 2–3 м. По вещественному составу среди глинистых продуктов в зависимости от состава исходного субстрата выделяется несколько типов: каолини-товый, каолин-гидрослюдистый, каолин-монтмориллонитовый, нонтронитовый.

Мощные (25–50 м) каолиновые коры выветривания сформировались по гранитоидам даек.

Линейные коры выветривания развиты (до глубин 70–100–120 м) вдоль зон тектонических нарушений и ослабленных зон на контактах пород. Линейные коры особенно хорошо проработаны в верхней части разреза и имеют, в основном каолиновый состав.

Образования кайнозоя на изучаемой территории представлены преимущественно образованиями четвертичной системы. Четвертичные образования различного генезиса покрывают мезозойские породы практически сплошным чехлом.



Дайки

Рисунок 3.32. Фрагмент плана застройки Березовского золоторудного месторождения



Рисунок 3.33. Территория г. Березовский. Образование провала над старательской горной выработкой. Горнотехническая документация по данной выработке отсутствует

История возникновения и развития г. Березовский связана с добычей золота с 1747 года. Город формировался вблизи объектов золотодобычи. В результате вся центральная часть города расположена на подработанной территории. Только некоторые окраинные районы расположены вне зоны влияния подземных разработок (Рисунок 3.32).

За время разработки месторождения применялись различные технологии добычи. Первые 150 лет разработки государственная добыча осуществлялась в приповерхностной зоне на глубинах не более 45–50 м. Глубина разработки ограничивалась гидрогеологическими условиями. В этот период было построено более 1000 шахт, пройденных по дайкам и жилам. В это же время повсеместно велась старательская добыча небольшими горными выработками – шурфами, штольнями, небольшими шахтами. Горнотехническая документация по этим выработкам отсутствует. Информация о существовании этих выработок появляется лишь при возникновении провалов (Рисунок 3.33).

В настоящее время добыча золота осуществляется двумя шахтами — «Южной» и «Северной». Шахта «Южная» разрабатывает южную часть месторождения на глубинах до 314 м, шахта «Северная» — северную часть месторождения до глубины 512 м. На руднике работает комплекс шахтного водоотлива, который обеспечивает осушенное состояние вмещающего горного массива.

В случае затопления рудника, после замачивания верхней части разреза, проявится свойство монтмориллонита и гидрослюд активно адсорбировать молекулы воды и набухать при этом. Обводненные глинистые породы, содержащие монтмориллонит и гидрослюды при внешнем механическом воздействии, легко разжижаются, а после прекращения этого воздействия быстро восстанавливают прочность, т. е. они подвержены проявлению тиксотропии [61].

Таким образом, горный массив территории г. Березовский характеризуется следующими особенностями:

- горный массив в результате добычи золота по дайкам буквально пронизан многочисленными пустотами;

- присутствием в верхней части разреза, в местах непосредственной добычи золота, вдоль тектонических нарушений присутствуют каолин-гидрослюдистые и каолин-монтмориллонитовые глины — породы, склонные к проявлению тиксотропии при увлажнении;

- наблюдается современная геодинамическая активность.

Сочетание перечисленных характеристик является предпосылкой к природно-техногенной катастрофе: затопление рудника приведет к резкой активизации процесса сдвижения, что для инфраструктуры г. Березовский будет иметь крайне негативные последствия. Это будет выражаться в образовании воронок обрушения, провалов, трещин и плавных деформаций, превышающих предельные допустимые значения. Внезапность проявления деформационных процессов определяет их опасность для жителей города, а масштаб деформаций приведет к значительному экономическому ущербу.

Приведенные особенности горного массива г. Березовский необходимо учитывать в долгосрочной стратегии градостроительной политики.

ГЛАВА 4.

Исследование параметров деформаций земной поверхности в зонах обрушения рудных месторождений

Разрушительные деформационные процессы в массиве горных пород при ведении горных работ не только приводят к нарушениям эксплуатации объектов недропользования, но и подвергают опасности жизнь и здоровье людей. Одни процессы проявляются монотонно, другие имеют динамический характер, а третьи носят незакономерный, случайный характер, которым определяется понятие – внезапное аварийное деформирование горных массивов. На внезапность влияют физико-географические условия, физико-механические свойства пород, особенности структурно-тектонического строения горного массива и геодинамическая активность массива, формирующая его напряженно-деформированное состояние.

Параметры геомеханических процессов зависят от множества факторов эндогенного и экзогенного происхождения. Чтобы показать



Рисунок 4.1. География экспериментальных исследований

Таблица 4.1

Перечень экспериментальных объектов

№/п.	Вид техно- генной на- грузки	Название ме- сторождения	Полезное ис- копаемое	Населенный пункт
1	Подземные работы	Северопес- чанское (Юж- ная залежь)	Fe	г. Краснотурьинск (Свердловская обл.)
2		Соколовское	Fe	г. Рудный (Республи- ка Казахстан)
3		Сарановское	Cr	п. Сараны (Пермский край)
4		Березовское	Au	г. Березовский (Свердловская обл.)
5		Пышминско- Ключевское	Cu	г. Верхняя Пышма (Свердловская обл.)
6		Асачинское	Au	г. Петропавловск- Камчатский (Камчат- ский край)
7	Открытые работы	Качарское	Fe	г. Рудный (Республи- ка Казахстан)

многофакторность процессов и проанализировать ее роль, проведе-
ны экспериментальные исследования аварийных деформационных
процессов на месторождениях в нескольких регионах Российской
Федерации и в Республике Казахстан (Рисунок 4.1). Эксперимен-
ты выполнены с использованием геологических, геофизических и
геодезических методов. Основой исследований стали исторические
и современные данные инструментальных наблюдений за дефор-
мированием земной поверхности. Площади экспериментальных
участков (Таблица 4.1), где выполнены измерения параметров де-
формационных полей, достигают нескольких десятков квадратных
километров.

4.1. Обрушение поверхности при безопасной глубине подработки

На начальном этапе разработки (2009 г.) Южной залежи шахты «Северопесчанская» на севере Свердловской области расчетами установлено, что поверхность будет в устойчивом состоянии при отработке всего участка. Горный массив сложен вулканогенными и вулканогенно-осадочными крепкими породами, представленными диоритами, габбро-диоритами, габбро, мраморизованными известняками. Однако при добыче 271 тыс. м³ руды на глубине 400 м в этом же году неожиданно обрушилась поверхность в районе автодороги (Рисунок 4.2).

В декабре 2010 года выполнены первые наблюдения за процессом сдвижения. До 2014 года маркшейдерско-геодезические наблюдения проводились с периодичностью 2 раза в год, затем — один раз в год [62].

Максимальные деформации развивались в течение двух лет после обрушения при продолжении добычи на Южной залежи. Вертикальные деформации за период 2010–2012 гг. достигли значения 28×10^{-5} , максимальные оседания реперов — 1500 мм. Горизонтальные деформации



Рисунок 4.2. Провал земной поверхности над Южной залежью

составили 7×10^{-3} при максимальном растяжении в 334 мм. По данным спутниковых измерений, деформации сконцентрировались в двух областях: растяжения — на западе и сжатия — на востоке. Граница разделения областей проходила через зону обрушения (Рисунок 4.3).

В последующие шесть лет скорости деформационных процессов постепенно снижались при продолжающейся добыче с теми же объемами. Максимальные оседания реперов, расположенных вблизи зоны обрушения, достигли к 2016 г. 3000 мм. Деформационные процессы стали продвигаться в южном направлении в сторону федеральной автотрассы Екатеринбург — Серов (Рисунок 4.4).

Анализ ситуации и результатов наблюдений позволил выдвинуть предположение, что первоисточником аномального развития процесса сдвижения от разработки Южной залежи выступают современные геодинамические движения. Вызванное движениями явление вторичного структурирования иерархически блочного массива приводит к формированию зон концентрации и депрессии тектонических напряжений, выступающих в роли очагов катастрофических процессов [63].

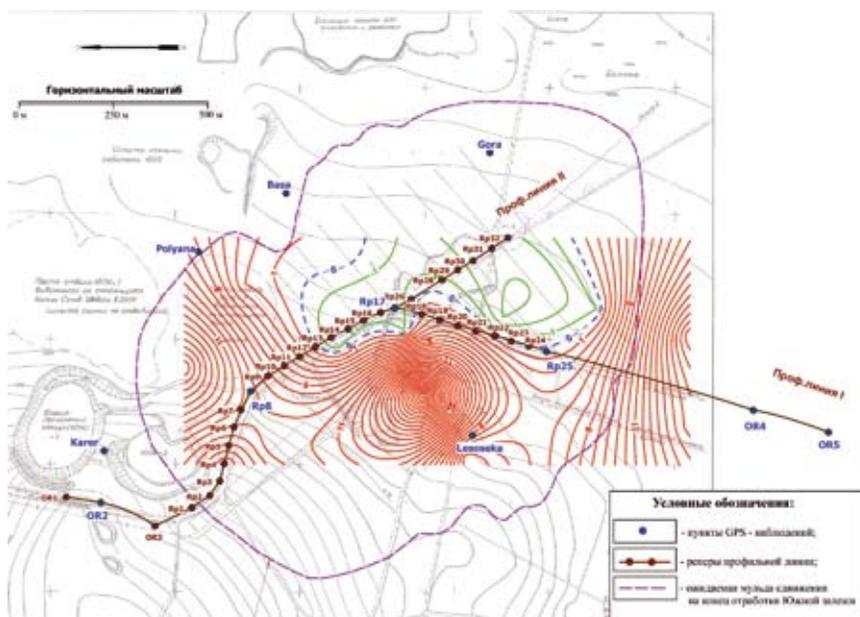


Рисунок 4.3. Напряженно-деформированное состояние массива над Южной залежью за период 2010–2011 гг.

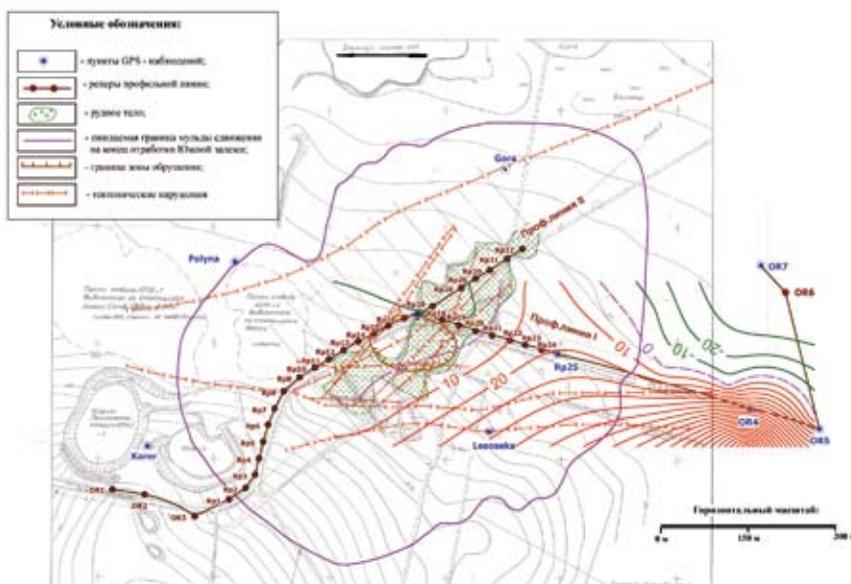


Рисунок 4.4. Деформированное состояние массива над Южной залежью за период 2015–2016 гг.

4.2. Активизация обрушения поверхности в старой зоне сдвижения при комбинированной разработке

Внезапное обрушение земной поверхности на Южном фланге Сарановского месторождения в Пермском крае произошло в июле 2013 г. в краевой части существующей зоны обрушения над непогашенными пустотами ранее отработанных блоков в зоне ведения современных открытых горных работ с формированием отвала пустых пород вблизи зоны обрушения. В результате образовался провал размером 120×70 м и глубиной 30 м (Рисунок 4.5). В обрушение провалились припаркованные самосвалы.

Основой для оценки и прогноза развития деформационных процессов сдвижения являются инструментальные наблюдения, ежегодно выполняемые на месторождении, в том числе за один день



Рисунок 4.5. Обрушение земной поверхности на Южном фланге Сарановского месторождения

до обрушения земной поверхности. С целью выявления возможной корреляции между вертикальными сдвигами и деформациями земной поверхности и последующим ее обрушением проанализированы изменения высотных отметок реперов наблюдательной станции в предшествующий период 2006–2013 гг., а также в период 2013–2019 гг. для оценки последующего поведения массива.

При анализе вертикальных смещений реперов наблюдательной станции Сарановского месторождения как между циклами наблюдений, так и в рамках одной серии наблюдается знакопеременный характер сдвига, выраженный в чередовании участков оседаний и поднятий земной поверхности. Обрушению предшествовало поднятие поверхности до 20 мм.

В последующий за обрушением период 2013–2014 гг. закономерно произошло значительное оседание всяческого бока, особенно резко проявившееся вблизи границы провала.

На первоначальном этапе анализа результатов наблюдений была высказана гипотеза о возможной взаимосвязи между обрушением и предшествующим подъемом земной поверхности на прилегающем участке. Подобные явления также отмечались некоторыми исследователями [64–66].

Таким образом, выявленное по результатам инструментального мониторинга циклическое чередование оседаний и поднятий поверхности Сарановского месторождения, вероятнее всего, обусловлено движениями активной геологической структуры, к которой приурочено месторождение.

Таким образом можно заключить, что в определенных горно-геологических условиях деформационные процессы могут развиваться крайне локализованно, не проявляя видимых признаков влияния на прилегающий массив горных пород и земную поверхность.

4.3. Обрушения поверхности в условиях сильно обводненной налегающей толщи

Сложнейшие горно-геологические условия Соколовского железорудного месторождения определили высокую опасность прорыва обводненных песчано-глинистых масс в подземные выработки [67]. В год происходит до нескольких десятков инцидентов с прорывами. В результате прорыва воды из зоны обрушения случались и аварии, повлекшие затопление выработок и остановку шахты с огромным экономическим ущербом. Полностью исключить эти прорывы нельзя, но постоянная исследовательская и производственная работа, направленная на снижение обводненности, предотвращение прорывов, снижение их частоты, позволила накопить ценный практический опыт подземной разработки в опасных условиях и отработать два горизонта с обрушением налегающих пород.

Соколовское железорудное месторождение расположено у северо-восточной границы города Рудный (Республика Казахстан), оно обрабатывается комбинированным способом: южный и центральный участки протяженностью 2,5 км Соколовским карьером; северный фланг протяженностью 3 км — шахтой Соколовская с производительностью 3 млн т руды в год.

На шахте «Соколовская» по мере ведения горных работ, наряду с усадкой закладочного материала, имели место самообрушения вмещающих пород с выходом воронок обрушения на дневную поверхность. С 1976 по 1998 год заложено 432 камеры, из них в 245 камерах произошло самообрушение руды и вмещающих пород [68]. На дневную поверхность вышли 44 обрушения диаметром $15 \div 30$ м. В условиях мощной обводненной рыхлой толщи после выхода воронки на

поверхность мгновенно из водоносного олигоценового горизонта начинается приток с расходом до $30 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Смена системы разработки вызвала кардинальное изменение параметров процесса сдвижения, которое, наряду с износом системы осушения, выходом из строя некоторых ее элементов, повлекло ряд аварийных ситуаций. К 2002 г. на поверхности шахты Соколовская образовалась довольно развитая сеть заполненных водой воронок обрушения (Рисунок 4.6). С переходом на систему разработки с обрушением, с 1998 по 2006 год засыпка воронок не производилась. За это время появилось 35 воронок. Источники обрушения — выемочные единицы горизонтов –120, –190, –260 м.

Размеры наиболее крупных воронок достигали 0,2 км в диаметре. В мульде сдвижения образовалось десять крупных техногенных водоемов. Объем воды в некоторых из них достигал 70 тыс. м^3 .

В этот период разработки происходит резкий скачок количества прорывов песчано-глинистых отложений в подземные выработки. В период с 2002 по 2017 год инциденты с прорывом ПГО произошли 237 раз.

Кроме инцидентов на Соколовской шахте зарегистрировано три аварии. Первый крупный прорыв ПГО в подземные выработки произошел 21 декабря 2000 г. и реализовался в течение нескольких часов [68]. Объем вод, прорвавшихся из воронки обрушения, составил $16\,000 \text{ м}^3$. При этом водоприток в течение нескольких минут достигал $900 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Второй прорыв воды начался 5 мая 2002 г. и развивался несколько суток. В выработки прорвалось $12\,000 \text{ м}^3$ воды, при этом максимальный водоприток составил $57 \text{ м}^3/\text{ч}$. т. е. лавинной скорости водопритоков не наблюдалось.

К 2005 г. воронки обрушения объединились, сформировав заполненный водой провал протяженностью в субмеридиональном направлении порядка 1 км, а в субширотном — 0,5 км (рисунок 4.6). Самый крупный в истории шахты прорыв произошел 3 октября 2005 г. на горизонте –260 м [69]. В результате были затоплены нижние горизонты, погибли люди и произошла остановка рудника.

К 2008 г. протяженность провала достигла максимальной длины и немногим превышает 1,5 км, большая его часть заполнена водой. К 2013 г. половину воронок обрушения засыпали скальной горной породой.

В 2017 г. провал развивается в субширотном направлении в сторону лежачего бока, достигнув 0,6 км вкрест простираения рудных тел.

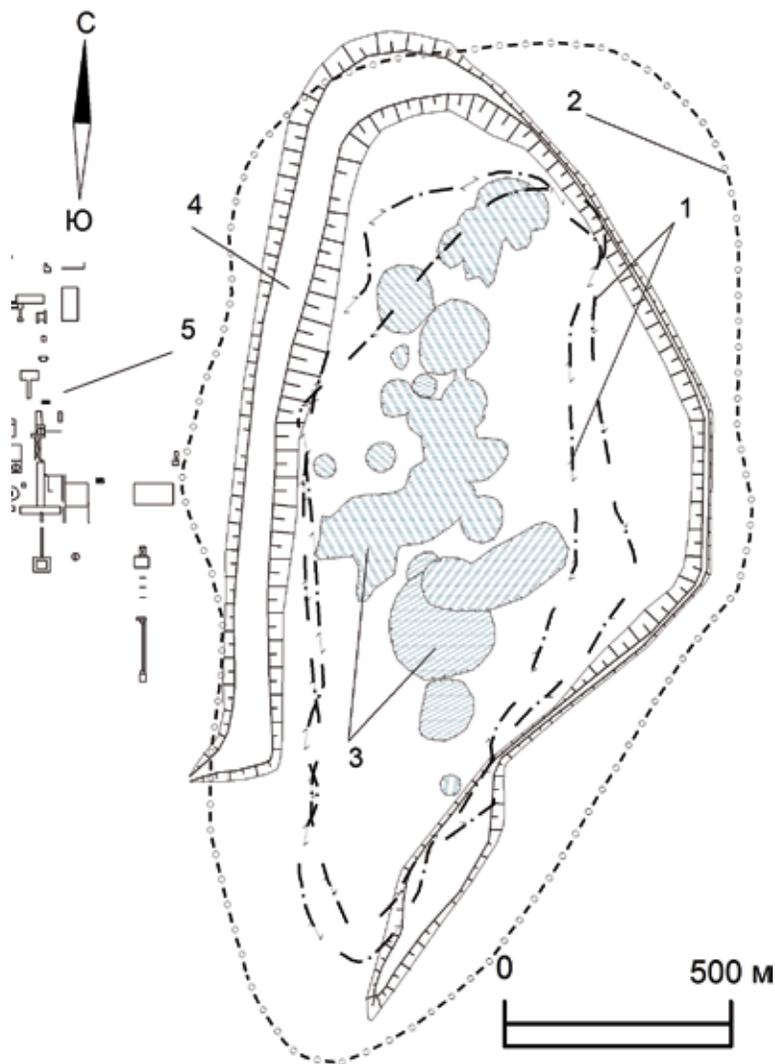


Рисунок 4.6. Поверхность в зоне влияния подземных горных работ шахты Соколовская в 2005 г.

Примечание: 1) зоны обрушения от горизонтов –260 и –330 м; 2) зона опасных деформаций; 3) заполненные водой воронки обрушения; 4) отвал горных пород вокруг зоны обрушения; 5) промышленная площадка шахты Соколовская

К этому времени засыпано более ста воронок обрушения, благодаря чему зона обрушения от шахты Соколовская не выглядит как классический провал. Она напоминает изрытый рельеф с локальными возвышениями и понижениями.

Практика разработки показывает, что обрушение поверхности происходит после накопления в массиве пустот в объеме около 100–150 тыс. м³. Обрушение от отработки смежных панелей в одном эксплуатационном блоке стремится выйти на поверхность по ближайшему, уже сформировавшемуся каналу обрушения. Это приводит к оставлению в массиве над выработанным пространством породных целиков между каналами обрушения и регулярному вторичному и третичному воронкообразованию.

Разработка трех верхних этажей месторождения с твердеющей закладкой, засыпка воронок обрушения скальной породой и блоковое строение месторождения, несмотря на протяженность шахтного поля более 1,5 км при глубине горных работ 430 м, обусловили неполную подработку поверхности. Это способствует развитию процесса сдвижения с меньшими параметрами, чем если бы месторождение изначально разрабатывалось системой с обрушением и без засыпки воронок. Поэтому, несмотря на склонность развития сдвижения в лежачий бок, здания и сооружения промплощадки шахты находятся в удовлетворительном состоянии. Активные процессы трещинообразования в зданиях отсутствуют.

Для оценки безопасности зоны обрушения создана геоинформационная модель, которая включает данные об отклонениях воронок обрушения от вертикали и площади воронок обрушения на поверхности. Установлено, что из 480 гектаров зоны обрушения в текущий момент (1–2 месяца) только 20 % площади опасны для ведения отвальных работ (рисунок 4.6). Для шахты Соколовская отвалообразование в зоне обрушения не только несет экономические выгоды, но и играет решающую роль в обеспечении безопасности подземных горных работ, предотвращая скопление воды в зоне обрушения.

4.4 Обрушения поверхности от исторических разработок

Город-спутник Екатеринбурга — Березовский, один из старейших городов Среднего Урала. Его основание в 1748 г. связано с открытием

первого жильного золота в России. Площадь города порядка 38 км^2 , в числе которых более 25 км^2 занимает само месторождение [70]. Ввиду ограниченной мощности промышленных запасов (до 15 м), крутого падения даек (до 90°), мощных породных участков между ними (несколько мощностей даек) и значительной длины простираения (до 6 км), создались уникальные условия подработки поверхности Березовского месторождения. В результате подработанные территории сильно перемешаны в городской черте (Рисунок 4.7).

Первоначально подземные горные работы велись в приповерхностной зоне до глубины 30 м. Осуществлялись они при помощи проходки с поверхности шурфов, мелких шахт и неглубоко заложенных штолен. Практически все дайки месторождения в местах выхода их на поверхность подработаны старательскими и казенными горными работами.



Рисунок 4.7. План г. Березовский и подработанных участков (выделены штриховкой)

В период 30–50 гг. XX века горные работы опустились ниже первых горных работ до глубины 70 м. Вскрытие залежей по-прежнему осуществлялось преимущественно неглубокими шахтами, хотя развитие получили и горизонтальные горные выработки, которые проходились по рудным телам. Общая численность вертикальных горных выработок на территории месторождения составляет более 1000.

Современные горные работы достигли глубины 700 м. Месторождение вскрыто несколькими капитальными стволами, и хорошо развита система горизонтальных горных выработок.

Подземные горные работы, осуществлявшиеся в разные описанные временные интервалы, зачастую разделены друг от друга участками, не подвергавшимися разработке. Это вызывает задержки в развитии процесса сдвига и растягивание его на десятилетия. Неполная и многоуровневая подработка обусловила неравномерность в развитии процесса сдвига поверхности. Так, от старательских горных работ до сих пор образуются воронки обрушения 2–5 м в плане и до 3 м по глубине (Рисунки 4.8, 4.9). От промышленных горных работ образуются провалы и воронки обрушения до 25 м в плане.

Учет обрушений поверхности ведется на месторождении с 1957 г. Всего зафиксировано 476 случаев обрушения [70, 71]. Максимальное



Рисунок 4.8. Современные проявления обрушений поверхности на территории Березовского месторождения

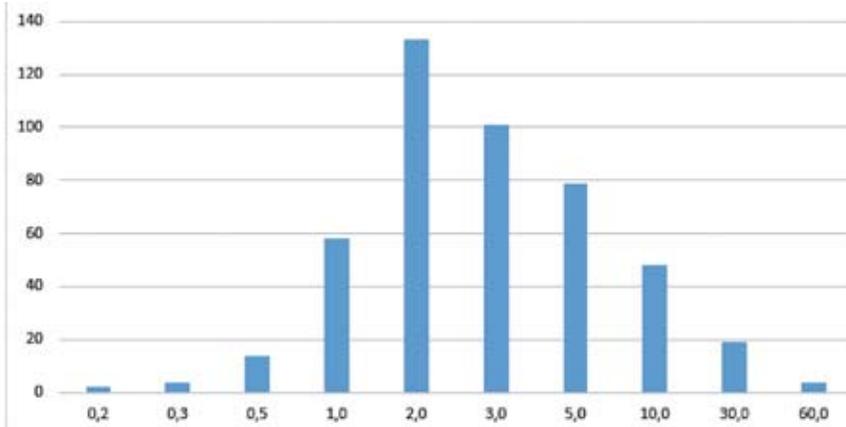


Рисунок 4.9. Диаметр провалов поверхности с 1957 по 2014 год

количество обрушений приходится на период с 1971 по 1980 год и с затуханием прослеживается до 2000 г.

На рисунке 4.9 представлено распределение всех происшедших событий за период наблюдений по глубине провалов и по их диаметру.

4.5. Обрушения поверхности при разработке с частичной закладкой

В 1854 г. вместе с началом разработки медной руды Пышминско-Ключевского месторождения появился медеплавильный завод, который впоследствии стал градообразующим предприятием. В середине года была заложена первая шахта — Ивановская (Ивано-Богословская). В период с 1900 по 1904 год с целью разведки запасов месторождения было пройдено более 900 шурфов. Разработка месторождения происходила периодически, сменяясь консервацией, и наоборот [72]. В 1912 г. на руднике работало 20 шахт, и одновременно развивались старательские работы. В 1918 г. рудники были затоплены. Шурфы, через которые производились старательские разработки, обвалились. В 1936 г. горные работы возобновились и продолжались с разной интенсивностью до 1976 г., когда Пышминский рудник стали подготавливать к ликвидации.

Начиная с 1946 г. в шахтах стали проявляться частые случаи разрушения целиков, которые сопровождалось обрушением кровли на значительных площадях [73]. Активизация обрушения в шахтах привела к сдвигению поверхности. За период с 1947 по 1952 год на руднике имели место девять случаев обрушения поверхности. Применение систем разработок без закладки выработанного пространства, особенно на верхних горизонтах, способствовало накоплению на месторождении пустот и потенциально опасных участков на земной поверхности. Всего на месторождении использовалось два вида закладки — сухая закладка и гидрозакладка с оставлением целиков, а некоторые выработки оставлены незаложенными.

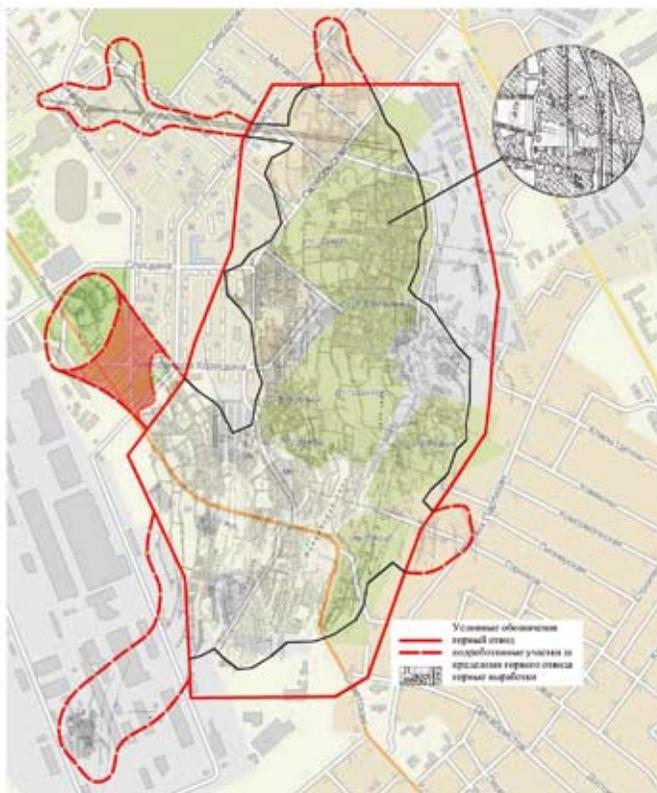


Рисунок 4.10. Участок города с подработанными территориями [74]

Примечание: Топографическая основа – © Городской Информационный Справочник 2ГИС www.2GIS.ru)

На сегодняшний день около 20 % городской территории занимает горный отвод Пышминского рудника, который находится в самом центре города [74]. Процесс сдвижения горных пород сопровождается трещинами и провалами земной поверхности, а когда еще и под этой поверхностью пройдено большое количество горных выработок, отработано много рудных запасов, все эти явления проявляются гораздо чаще. Для прогноза дальнейшего развития процесса сдвижения, безопасной застройки и последующей эксплуатации зданий и сооружений, как вновь возводимых, так и уже построенных, создана геoinформационная модель. Город прогрессирует, развивается, и вся территория с каждым днем становится все востребованней, особенно в центре, где и располагается ликвидированный рудник. Создание общей системы подземных горных выработок и современной поверхности города (Рисунок 4.10) позволяет выявить места подработки горного массива, принять необходимые и оптимальные меры безопасности и вести учет застройки новыми объектами на подработанных территориях.

4.6. Обрушение поверхности при разработке с магазинированием руды

На Асачинском золоторудном месторождении в марте 2019 г. произошло неконтролируемое обрушение потолочины блока. Подземные горные выработки горизонтов +135 и +100 м в районе добычного блока заполнились обводненной горной массой. Обрушение произошло в момент обеденного перерыва. На поверхности мгновенно образовалась воронка обрушения диаметром 20 м и глубиной до 15 м.

На горизонте +135 м обрушенная горная масса вышла полным сечением в орт в виде валунов фракцией 200–300 мм и обводненного песка, заполнив 2/3 по простирацию выработки (Рисунок 4.11). В орты горизонта +135 м соседнего блока обрушенная порода не выходила.

На горизонте +100 м горная масса вышла в незакрытые орты этого же блока. Орт оказался заполнен по всей протяженности на половину сечения и обводненная обрушенная масса вышла в откаточный штрек, заполнив его в этом месте на 1/3 сечения. В отличие от обрушенной породы на горизонте +135 м, здесь фракция существенно мельче (Рисунок 4.12), составляет 10–100 мм, большей частью до



Рисунок 4.11. Обрушенная горная масса, орт 135-36-5



Рисунок 4.12. Обводненные песчаные отложения, орт 100-36-2

50 мм. Водоприток в подземные выработки увеличился на 100 м³/час и после ликвидации воронки обрушения не прекратился.

Сразу начаты ремонтно-восстановительные работы по очистке транспортного штрека гор. +100 м и засыпке воронки обрушения на поверхности. В ортах установлены перемычки из бревен. Воронка на поверхности засыпана скальной породой с помощью скрепера.

Очистной блок после выпуска руды из магазина находился в незаложенном состоянии два месяца. За это время произошло разрушение вмещающих пород в лежачем боку камеры, что сопровождалось расширением очистного пространства в сторону лежачего бока. Это установлено по сокращению протяженности ортов с 15 до 9 м. Ширина выработанного пространства увеличилась более чем в три раза. Возможно, что одновременно происходило обрушение свода над выработанным пространством и сокращение мощности скальной потолочины. Скальная потолочина, разрушившись на куски фракцией от 100 до 500 мм, заполнила незаложенный блок, что вызвало обрушение рыхлых четвертичных отложений.

На месторождении в целом и в области Блока 36 отсутствуют признаки высоких тектонических напряжений, проявления горного давления не обнаружены при осмотре горных выработок. Ранее проведенные исследования показали, что на текущей глубине отработки опасность горных ударов отсутствует. Коэффициент крепости горных пород по М.М. Протодяконову изменяется в диапазоне 6–9. Массив устойчивый, со средней степенью трещиноватости, местами мелкоблочный. В данных условиях главным фактором, влияющим на устойчивость приконтурного массива, является его структурное строение.

Субпараллельно простиранию жилы прослеживается тектоническое нарушение, которое имеет крутое восточное падение под углом порядка 85°. Мощность нарушения достигает 10 м, относится ко II рангу по классификации Раца. Горный массив в области этой зоны разбит серией меньших нарушений III ранга мощностью до 0,4 м, с развитой трещиноватостью по сторонам, шириной до метра. Заполнитель нарушения — глина трения, обводнен, легко разбирается рукой.

В очистном блоке сложились неблагоприятные структурные условия, которые привели к значительному ослаблению лежачего бока путем подсечения его тектоническим нарушением.

Увеличившееся в ширине очистное пространство в совокупности с куполом потолочины и повышенной трещиноватостью законтурного

массива привели к потере устойчивости кровли очистного пространства — обрушению горных пород. Основной причиной обрушения явились структурные особенности и длительный срок стояния блоков в непогашенном состоянии.

4.7. Внезапное обрушение поверхности с сейсмическим эффектом

В практике исследования сдвижения горных пород на разрабатываемых месторождениях встречаются случаи выхода деформационных процессов на поверхность, в то время как геомеханические условия отработки залежи, рудного тела или отдельного очистного блока указывают на локализацию сдвижения в массиве без развития опасных деформаций поверхности. Исследование природы их возникновения и закономерностей развития требует комплексного экспериментального подхода, сочетающего геодезические наблюдения за деформационными процессами с геофизическими исследованиями структурных преобразований массива горных пород [75].

На поверхности над изолированной залежью рудных тел в северной торцевой части Высокогорского месторождения расположена товарная станция рудника «Гора Высокая» и промышленные трехэтажные здания. Залежь представлена свитой из трех рудных тел (2, 4 и 7), которые отрабатываются в интервале глубин 410–650 м системой с обрушением (Рисунок 4.13). По предварительным расчетам устойчивости выработанного пространства изолированных рудных тел [76] установлено, что отработка залежи не вызовет опасных деформаций земной поверхности. Коэффициент надежности прогнозных оценок составил 1.70.

За 9 лет наблюдений оседания поверхности составили от 50 до 110 мм, а деформации $\varepsilon = 0,5-1,0 \cdot 10^{-3}$ и $l = 1-2 \cdot 10^{-3}$. При этом самообрушение выработанных пространств не развивалось, и произошло зависание пустот.

В марте 2009 г. пропласток между рудными телами резко обрушился и вызвал воздушную волну в выработках рудника [77]. Обрушилась и часть горных пород над отработанными залежами, образовав свод обрушения, который из существовавших выработок отслежен до глубины 330 м. На гор. – 210 м (Н = 410 м) по всем доступным выработкам

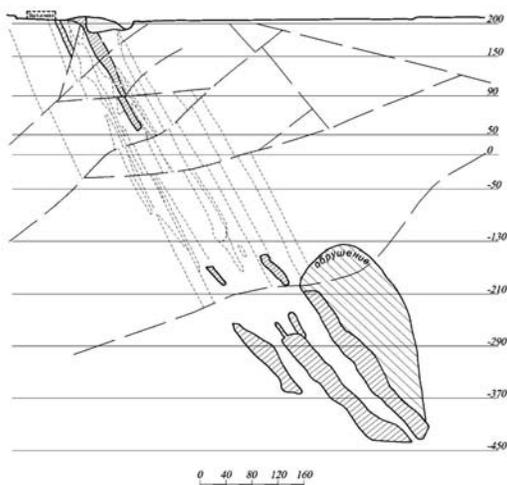


Рисунок 4.13. Разрез вкрест простирания залежей при обрушении проплатка между рудными телами (май 2009 г.)



Рисунок 4.14. Контуры области дезинтегрированных пород по состоянию на май 2009 г., определенные методом спектрального сейсмопрофилирования. Здесь и на рис. 4–6 принято: 4 КЖ — четырехэтажное, каменное, жилое (цифра обозначает этажность, вторая буква — тип материала стен, третья буква — жилое/нежилое); 3КН — трехэтажное, каменное, нежилое; разв. — развалины

зафиксировано классическое развитие процесса сдвижения с зоной обрушения и зоной трещин с затухающими параметрами смещений и раскрытий.

Спустя пять месяцев, в октябре 2009 г. произошло геодинамическое событие, магнитуда которого, по данным Пермской и Артинской сейсмостанций составила 2.2. Это вызвало мгновенное развитие процесса сдвижения, которое сопровождалось хлопком в горном массиве. По словам очевидцев, на поверхности земли вагоны железнодорожного состава подпрыгнули.

Размеры мульды оседания на земной поверхности составили приблизительно 200×300 м [77]. Оседание в центре мульды по отдельным реперам наблюдательной станции превысило 1.5 м. Образовались террасы и трещины раскрытием до 0.5 м. Рельсы железнодорожных путей изогнуло в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Необратимым деформациям подверглось трехэтажное здание бывшей проходной завода (Рисунок 4.14, разв.), а трехэтажное здание диспетчерской (Рисунок 4.14, ЗКН), находящееся практически в эпицентре зоны реализации геодинамической подвижки, осталось совершенно невредимым. Примерно в 22:00 того же дня Пермской и Артинской сейсмостанциями зафиксировано сейсмическое событие с магнитудой 2 в районе Естюнинского месторождения, которое расположено в 10 км от места описываемых событий.

По результатам ежедневных, а затем еженедельных маркшейдерских наблюдений, продолжавшихся до июля 2010 г., установлено, что деформации не имеют трендового характера. Оседания периодически сменяются поднятиями, а изменение отметок колеблется в пределах $\pm 5-15$ мм. То есть в области, подвергшейся влиянию геодинамического события, сначала произошла резкая трендовая подвижка, вызвавшая просадку поверхности, а затем стали развиваться волновые колебания поверхности.

Сложившаяся геомеханическая ситуация указывала на то, что состоявшееся обрушение поверхности реализовало максимальные деформации поверхности мгновенно и дальнейшее развитие горных работ по отработке нижележащего горизонта существенно не осложнит состояние поверхности и расположенных на ней объектов.

4.8 Факторы внезапного развития разрушительных деформаций

Исследованиям по выявлению факторов, влияющих на внезапность деформационных процессов и раскрывающих механизм их протекания на конкретных месторождениях, посвящены работы многих российских [78–82] и зарубежных [83–89] авторов.

Многие процессы, происходящие в массиве горных пород при недропользовании, обуславливают физико-географические условия: климат, рельеф, гидрологические условия.

Петрографические особенности и физико-механические свойства пород — группа факторов, которая очень значима для изучения всех деформационных процессов в горном массиве [90]. Резкие колебания физико-механических свойств изверженных и осадочных пород обуславливаются структурой, текстурой и вторичными изменениями. С точки зрения инженерной геологии, наиболее важными являются последствия вторичных процессов, приводящих к снижению прочностных характеристик. Обычно это связано с низкотемпературным метаморфизмом и выветриванием. Присутствие воды в породах, как правило, снижает их прочностные характеристики. Особенно это значимо для рыхлых пород [91].

Особенности структурно-тектонического строения также определяют склонность массива горных пород к потенциальной аварии. Наличие разломов, зон поперечного сдвига, поверхностей скольжения, геологических возмущений в виде складок, даек свидетельствует о возможном проявлении аварийных деформаций. Присутствие зон ослабления, представляющих собой пространственно вытянутые в массиве горных пород участки, характеризующиеся определенным комплексом структурно-тектонических, петрографических, гидрогеологических и других особенностей строения и состава, где наблюдается понижение прочностных свойств пород относительно пород всего массива, является дополнительным индикатором внезапного разрушения из группы геологических факторов.

Важнейшим фактором, определяющим развитие катастрофических деформационных процессов при недропользовании, является напряженно-деформированное состояние массива горных пород. К настоящему времени экспериментально установлено, что напряженно-деформированное состояние определяется двумя

фундаментальными свойствами массива горных пород — его иерархически-блочным строением и постоянной подвижностью, вызванной современными геодинамическими движениями [92]. Геодинамические движения обусловлены и техногенными, и природными факторами [93]. Взаимодействие этих двух свойств массива горных пород приводит к явлению вторичного структурирования или самоорганизации в нем относительно стабильных структур — геологических блоков, которые могут быть ограничены тектоническими нарушениями различных рангов, а формирующие их более мелко-масштабные структуры ведут себя в течение определенного времени как единое целое, т.е. как сплошная среда [94]. Такие преобразования в массиве приводят к формированию дискретной структуры полей напряженно-деформированного состояния. Как показывает опыт инструментальных исследований, граничные области формирующихся самоорганизованных блоков имеют напряжения и деформации в несколько раз выше, чем внутриблочные, и именно к таким зонам приурочены чаще всего аномальные, в том числе внезапные, деформационные процессы.

В связи с тем, что массив горных пород представляет собой открытую нелинейную систему, обладающую свойствами иерархичности, самоподобия (масштабной инвариантности) и циклическим характером функционирования, то прогноз внезапных аварийных деформационных процессов с помощью классических, линейных методов весьма затруднителен. Идеи иерархичности и многомасштабности деформационных процессов являются фундаментом эволюционной концепции разрушения [95,96]. Любая развивающаяся система должна обязательно пройти определенный эволюционный путь. Как отмечается в работе [12, с. 22], эволюция напряженно-деформированного состояния геологической среды под воздействием природных или техногенных факторов непременно должна пройти стадии адаптации, изменчивости и в стадии отбора — точке бифуркации — завершиться либо катастрофой типа горного удара или землетрясения, либо «аномальным» деформированием. Таким образом, катастрофы в таких системах неизбежны, т. к. динамическая система в силу внутренних нелинейных свойств на широком спектре масштабов стремится к критическому состоянию [96].

На базе многолетнего опыта в изучении напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях его естественного залегания и в области влияния горных работ разра-

ботаны методологические подходы к определению потенциальных участков возникновения опасных явлений и геодинамического районирования подработанных территорий по параметрам напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

4.9. Основные методические концепции геодинамического районирования подработанных территорий по параметрам напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород определяется параметрами современных геодинамических движений. В зависимости от пространственно-временного масштаба наблюдательной системы и способа измерений выделяют два вида современных геодинамических движений — трендовые и короткопериодные.

К трендовым движениям относятся смещения, наблюдаемые за периоды от полугода — года до нескольких десятков лет. При эксплуатации месторождений, в виду перемещения большого объема горной массы происходит нарушение исходного напряженно-деформированного состояния массива и формирование вторичного поля напряжений. Трендовые движения пунктов, расположенных вне зоны влияния горных работ, определяют параметры исходного напряженно-деформированного состояния и, как правило, обусловлены естественными тектоническими факторами. В зоне влияния горных работ трендовые движения формируются в результате перераспределения природных напряжений и деформаций в породном массиве под воздействием техногенных факторов.

К короткопериодным движениям относятся смещения, продолжительность циклов которых укладывается один и более раз в сеансы непрерывных наблюдений, длящихся по несколько часов. Продолжительность циклов наблюдается от нескольких минут до нескольких часов. Определение параметров таких движений выполняется в виде непрерывного мониторинга спутниковыми методами системы реперов в течение нескольких часов. Измерениями фиксируются изменение пространственных координат пунктов мониторинговой сети. Интервал между дискретными измерениями может составлять

от нескольких минут до нескольких десятков минут. Точность измерения смещений между точками обеспечивается технологиями дифференциальной GPS и не превышает 1–3 мм.

В ходе анализа большого объема эмпирических данных по определению параметров геодинамических движений за 30–40-летний периоды наблюдений с различной частотой пространственно-временного опроса на территориях Урала, Казахстана, установлено что скорости деформаций, обусловленных короткопериодными движениями, могут значительно превышать скорости деформаций их трендовой составляющей. Разброс максимальных значений скоростей деформаций, вызванных короткопериодными движениями составляет от 10^{-12} с^{-1} до 10^{-8} с^{-1} для базовых интервалов от пяти-шести километров до десятков метров соответственно, попадая по возможности их фиксирования на стык методов геодинамики (спутниковая геодезия) и сейсмологии.

Методика оценки деформационного поля, создаваемого короткопериодными движениями, приведена в работе [97]. Данная методика также может быть использована в качестве экспресс-метода геодинамической диагностики.

Районирование подработанных территорий рудников выполняется по фактору вариативности напряженно-деформированного состояния, определяемого по результатам измерения геодинамических движений на различных пространственно-временных масштабах соответствующими геодезическими методами (спутниковыми и наземными). Путем совместного рассмотрения деформационных полей разного пространственно-временного уровня с привлечением геологической и геоморфологической информации выделяются самоорганизующиеся геологические структуры (блоки) различных размеров. Такие блоки являются благоприятными с геодинамической точки зрения областями, а границы их представляют опасность как зоны с высокими параметрами геодинамических движений.

Критериями выделения самоорганизующегося блока также является согласованное движение реперов, расположенных в пределах блока, максимальные значения модуля скорости деформации на границах блока.

Для оценки степени опасности деформаций на границах самоорганизующихся блоков целесообразно использовать параметр модуля скоростей деформаций. На основании эмпирических данных по исследованию деформаций, обусловленных трендовыми и циклическими

ми короткопериодными движениями, получены зависимости, определяющие максимальные значения модуля скорости горизонтальных деформаций в зависимости от длины измеряемых интервалов (4.1):

— для трендовых движений

$$|\dot{\varepsilon}|_{\max}(L) = 7 \times 10^{-3} L^{-0.932} \quad (4.1)$$

где $|\dot{\varepsilon}|_{\max}$ — максимальный модуль скорости горизонтальных деформаций, год⁻¹;

L — длина интервала, м; $100 \text{ м} < L < 90\,000 \text{ м}$;

— короткопериодные движения (4.2):

$$|\dot{\varepsilon}|_{\max}(L) = 7 \times 10^{-6} L^{-1.214} \quad (4.2)$$

где $|\dot{\varepsilon}|_{\max}$ — максимальный модуль скорости горизонтальных деформаций, с⁻¹;

L — длина интервала, м; $40 \text{ м} < L < 6\,000 \text{ м}$.

В соответствии с выявленными эмпирическими зависимостями значения максимальных модулей скоростей горизонтальных деформаций, определяемых по короткопериодной составляющей геодинамических движений, находятся в диапазоне от $8.6 \times 10^{-12} \text{ с}^{-1}$, что соответствует 10^{-4} в год и выше для базовых интервалов от 0,4 до 6,0 км, а по трендовой составляющей — от 5.2×10^{-8} до $1.2 \times 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ ($1.6 \times 10^{-15} \text{ с}^{-1}$ до $3.8 \times 10^{-13} \text{ с}^{-1}$) для базовых интервалов от 0,1 до 90 км [98].

Анализ параметров современных геодинамических движений, полученных на различном пространственно-временном масштабе, показал, что для выделения самоорганизующихся структурных блоков на подработанных территориях (10×10 км) необходимы данные трендовых смещений реперов наблюдательной сети (в том числе пунктов Государственной геодезической сети, пунктов опорных маркшейдерских сетей) достаточно равномерно покрывающих изучаемую территорию с ежегодной периодичностью, данные параметров короткопериодной геодинамической составляющей, полученные за многочасовые сеансы измерений по разработанным методикам [99], данные по параметрам сдвигения горных пород на реперах профильных наблюдательных станций. Кроме того, необходимо привлечение информации по региональной геодинамике.

4.10. Выводы по главе 4.

Обрушения поверхности при разработке месторождений — закономерное и частое явление, которое нередко развивается вопреки расчетам. Тем не менее зоны опасных деформационных процессов — это часть среды жизнедеятельности, использование которой востребовано как для управления процессом сдвижения, так и реабилитации этих территорий. Обобщая огромный опыт взаимодействия техносферы с провалами поверхности, можно заключить, что

- пустоты от горных выработок в горном массиве могут пребывать в устойчивом состоянии длительное время (нескольких десятков лет) без деформирования поверхности над ними;

- активное деформирование поверхности внутри воронки продолжается две недели. После этого деформации внутри воронки снижаются до параметров, которые можно уловить только инструментальными измерениями. Это установлено на основе наблюдений более 100 обрушений;

- на отработанных месторождениях обрушения поверхности над старыми вертикальными выработками происходят многократно с диаметром воронки от 2 до 10 м;

- в зонах обрушения только отдельные участки деформируются с параметрами, опасными для людей и техники. При протяженных формах месторождений доля опасных участков может составлять менее трети от площади всей зоны обрушения;

- зоны обрушения успешно используются для ведения открытых горных работ.

На основе экспериментальных данных определение безопасности использования зоны обрушения дневной поверхности от подземной разработки месторождений необходимо выполнять последовательно в три этапа:

- 1 этап — прогноз параметров деформаций на основе эмпирических данных, систематизированных в геоинформационной модели;

- 2 этап — дистанционное зондирование зон опасных деформаций и геодинамический мониторинг прилегающих территорий методами спутниковой геодезии;

- 3 этап — безопасность зоны обрушения определяется по оседанию поверхности в опасной зоне и модулю скорости горизонтальных деформаций массива горных пород.

Глава 5. Исследование современных геодинамических движений и эволюции деформационных полей на земной поверхности при недропользовании маркшейдерско-геодезическими методами

5.1. Современные геодинамические движения массивов горных пород на разных пространственно-временных базах

Одним из приоритетных направлений развития горнодобывающего комплекса является повышение эффективности и безопасности извлечения полезных ископаемых, компенсирующее постоянное ухудшение горно-геологических условий их добычи из недр. Важная роль в решении этой проблемы принадлежит геомеханическому обеспечению технологии разработки месторождений полезных ископаемых, поскольку от обоснованного выбора оптимальных параметров систем разработки и стратегии ведения очистных работ зависят и эффективность горного производства, и безопасность занятого на добыче персонала, а нередко и окружающего населения [100].

При этом основным, а зачастую единственным источником данных об исходном и техногенно измененном напряженно-деформированном состоянии массива горных пород являются натурные измерения параметров процесса сдвижения [101]. В данном случае под сдвижением горных пород — явлением, сопровождающим добычу полезного ископаемого, — понимается весь комплекс деформационных процессов, протекающих в массиве горных пород, (в данном случае в прибортовом массиве), при формировании исходного напряженно-деформированного состояния за пределами области влияния горных разработок и его трансформации внутри нее.

Основными факторами, определяющими формирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород, являются:

- иерархически блочное строение;
- постоянная подвижность;
- вторичное структурирование;
- концентрация современных геодинамических движений на границах вторичных структурных блоков.

При разработке месторождений полезных ископаемых комбинированным способом необходимо учитывать влияние нарушения геодинамического равновесия, вызванное совместным воздействием факторов от открытого и подземного способа разработки [102].

Под воздействием вышеуказанных факторов в реальном массиве горных пород формируется мозаичное, относительно однородное по своим усредненным интегральным параметрам, напряженно-деформированное состояние.

Экспериментальными исследованиями ИГД УрО РАН установлено, что современная геодинамическая активность характеризуется движениями трендового и циклического характера [103].

Трендовые движения происходят в виде взаимных подвижек соседних структурных блоков массива горных пород с относительно постоянными скоростью и направлением в течение продолжительного промежутка времени, сопоставимого со сроком службы объекта. Циклические движения носят полигармонический характер и состоят из многочисленных знакопеременных движений с разными частотами и амплитудами перемещения в циклах.

Трендовые движения могут иметь как естественную природу, обусловленную тектоническими подвижками по границам структурных блоков, так и техногенную, обусловленную перераспределением напряжений и деформаций в породном массиве под воздействием горных работ, откачки подземных вод и других факторов. Зафиксированные инструментальными методами величины трендовых смещений составляют от 0,5 мм/год для имеющих естественную природу до 200 мм/год для техногенных [104]. Короткопериодные циклические геодинамические движения представляют собой полигармонические движения, имеющие широкий спектр частот и амплитуду возвратных движений. Продолжительность циклов изменяется от нескольких секунд, часа, полутора часов и до нескольких месяцев [105].

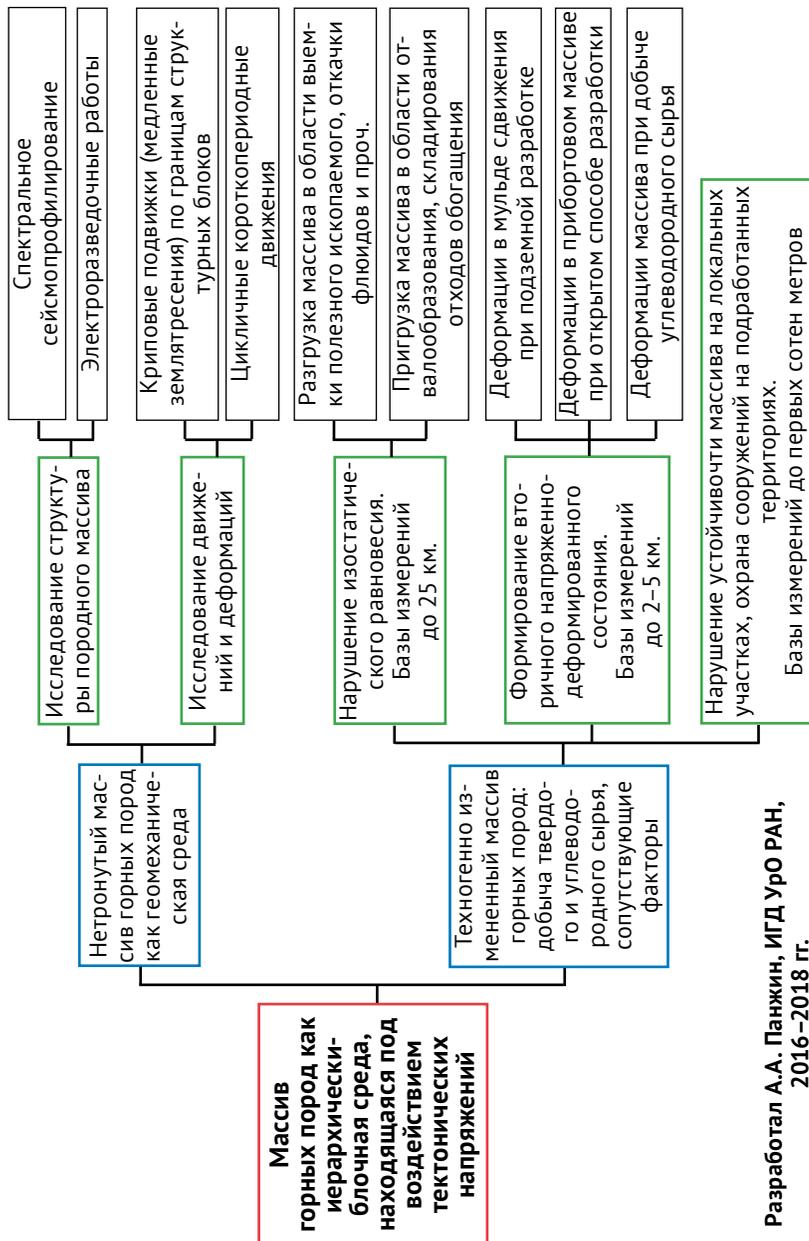
Для исследования трендовых движений в режиме дифференциальной GPS изначально определяется вектор — приращение пространственных координат в геоцентрической системе между фазо-

выми центрами двух и более антенн приемников, отцентрированных над пунктами геодезической сети, координаты которых необходимо определить. В дальнейшем совокупность полученных векторов, образующая пространственную геодезическую сеть, проходит контроль на точность геометрических построений путем определения фактических невязок по замкнутым контурам, и математически строго уравнивается в принятой системе координат – центрируется и ориентирована. При этом определяются современные пространственные координаты пунктов маркшейдерско-геодезической сети, а при их сопоставлении с ранее полученными исходными значениями — определяются геодинамические подвижки, происходящие в массиве горных пород за разные периоды времени.

В целях определения параметров циклических короткопериодных геодинамических движений измерения осуществляются в виде непрерывного мониторинга комплексами спутниковой геодезии за системой пунктов в течение нескольких часов, а в некоторых случаях, для уточнения параметров, связанных, например, с лунно-солнечными приливами, нескольких суток. Измерениями фиксируются изменение пространственных координат пунктов и их компонент мониторинговой сети по методике, изложенной в [106].

Непрерывные наблюдения дискретизируются на нужные интервалы времени, за продолжительность которых и определяются средние значения приращений координат. Интервал дискретизации может составлять от нескольких секунд до нескольких десятков минут. От длительности интервала зависит предел фиксируемых частот циклических движений. Чем меньше интервал, тем больше частоты циклов фиксируются измерениями. Непрерывный мониторинг комплексами спутниковой геодезии обеспечивает получение приращений всех трех координат точки стояния прибора в заданный момент времени.

Таким образом, массиву горных пород как иерархически блочной геомеханической среде присущи движения и деформации, обусловленные как естественными, так и техногенными факторами. Для учета их влияния на объекты недропользования, с целью обеспечения их долговременной сохранности, необходимо проведение комплексного геомеханического мониторинга, включающего как геофизические, так и геодезические методы. Блок-схема геомеханического мониторинга приведена на рисунке 5.1.



Разработал А.А. Панжин, ИГД УрО РАН, 2016–2018 г.

Рисунок 5.1. Блок-схема геомеханического мониторинга

5.2. Инструментальные маркшейдерско-геодезические методы исследования современных геодинамических движений

Исходя из вышесказанного, для горнодобывающих предприятий актуальной проблемой геомеханического обеспечения эффективного и безопасного освоения месторождений твердых полезных ископаемых является выявление параметров и закономерностей формирования исходного напряженно-деформированного состояния массива горных пород, как это было реализовано при геодинамическом мониторинге современными геодезическими методами на карьерах Качканарского ГОКа, особенно при визуализации деформационных полей (Рисунок 5.2) геоинформационными методами [107, 108], а также в виде дивергенции — одной из дифференциальных характеристик векторного поля деформаций, определяемого аналитическим путем (Рисунок 5.3).

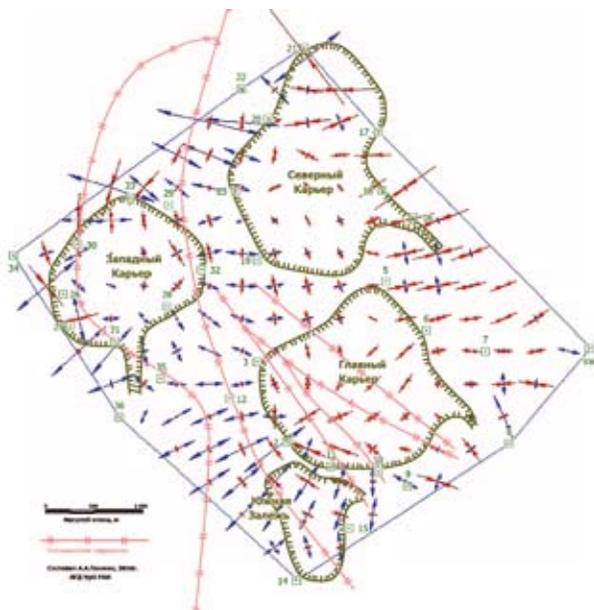


Рисунок 5.2. Поле деформаций на Качканарском геодинамическом полигоне по результатам моделирования методом конечных элементов

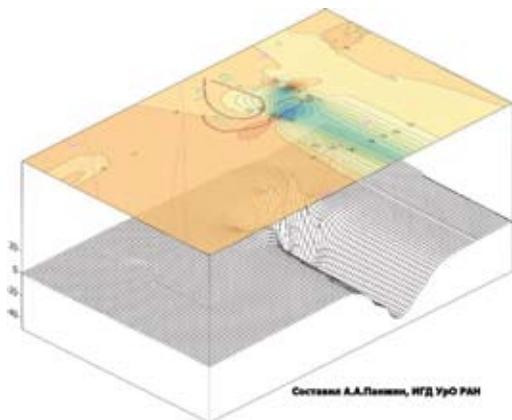


Рисунок 5.3. Дивергенция поля деформаций в районе Киембаевского месторождения хризотил-асбеста

Для разработки геомеханических моделей массива горных пород в области влияния карьеров и отвалов вышеуказанных месторождений были выполнены инструментальные геодезические измерения с использованием комплексов спутниковой геодезии по пунктам государственной геодезической сети (ГГС) и опорной маркшейдерской сети (ОМС) указанного района. При этом были выполнены повторные определения пространственных координат геодезических пунктов на площади до 30х30 км. Сопоставление современных пространственных координат сети с координатами, определенными до начала разработки месторождения, позволило определить полные векторы сдвижения — трендовые сдвижения.

Для решения задачи обеспечения безопасности, открытой и комбинированной геотехнологии необходимо

- оценить экспериментально уровень современных геодинамических движений и параметры формируемого ими напряженно-деформированного состояния, изменяющегося во времени;

- исследовать степень неоднородности напряженно-деформированного состояния, обусловленную вторичным структурированием массива горных пород под влиянием современных геодинамических движений и формирования вторичного поля напряжений в области влияния горных работ.

Таким образом, необходимо получение инструментальным путем двух основных видов информации: параметров интегрального дви-

жения массива, вызванных природными и техногенными факторами, а также данных об иерархически блочной структуре горного массива и его изменениях во времени [109].

Данные о параметрах интегрального движения горного массива возможно получить только прямыми маркшейдерско-геодезическими методами с использованием комплексов спутниковой (ГНСС), традиционной (тахеометры и нивелиры) геодезии и комплексов трехмерного лазерного сканирования. При этом в основу методики заложены многократные мониторинговые измерения сдвижений: либо специально оборудованных реперов, включающих пункты ГС (Государственной геодезической сети), ОМС (Опорной маркшейдерской сети) и наблюдательных станций, в том числе специальных (Рисунок 5.4),

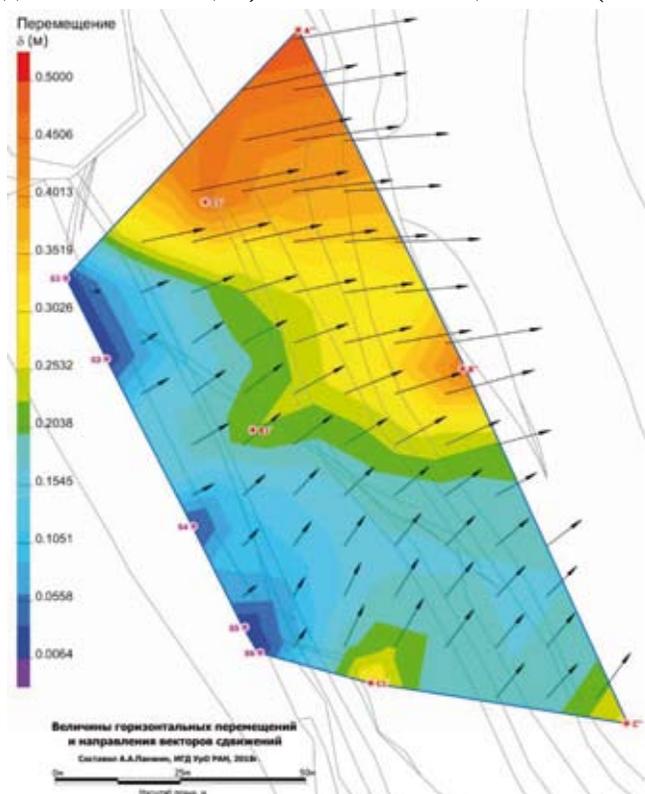


Рисунок 5.4. Величины горизонтальных перемещений и их направления на оползневом участке Качарского карьера

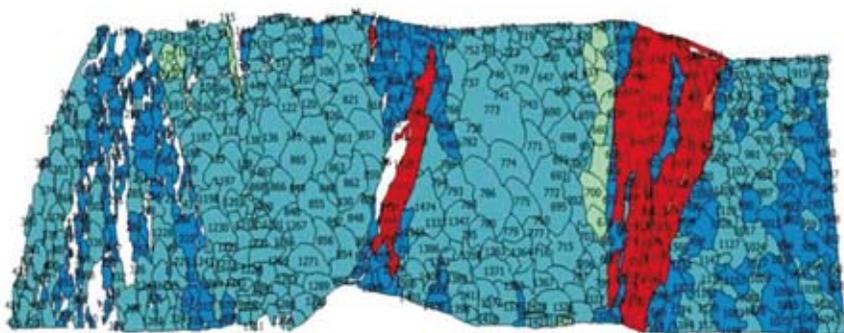


Рисунок 5.5. Результаты исследования на локальных участках структуры породного массива методами трехмерного лазерного сканирования

либо облака точек непосредственно поверхностей горного массива и охраняемых объектов (Рисунок 5.5).

Сопоставление исходных и переопределенных в результате мониторинга пространственных координат реперов и трехмерных поверхностей позволяет математически построить как векторы интегральных сдвижений, так и поле главных деформаций в горизонтальной и вертикальной плоскостях. При этом охват измерениями маркшейдерско-геодезическими измерениями изменяется от десятков и сотен километров до первых метров [109].

Для оценки анизотропии исходного напряженно-деформированного состояния массива по результатам измерений отстраиваются азимут-диаграммы амплитуд горизонтальных и вертикальных сдвижений, по которым определяется пространственная ориентировка действия главных напряжений и деформаций. Приведен пример, на котором видно, что на данном объекте в основном сдвигения распределены достаточно равномерно (Рисунок 5.6). Тем не менее наблюдается небольшая анизотропия в распределении направлений реализации горизонтальных сдвижений, поскольку в широтном направлении их средний уровень выше (сегмент выделен желтым цветом). Наименьший уровень средних горизонтальных сдвижений зафиксирован в субмеридиональном направлении (сегмент выделен зеленым цветом).

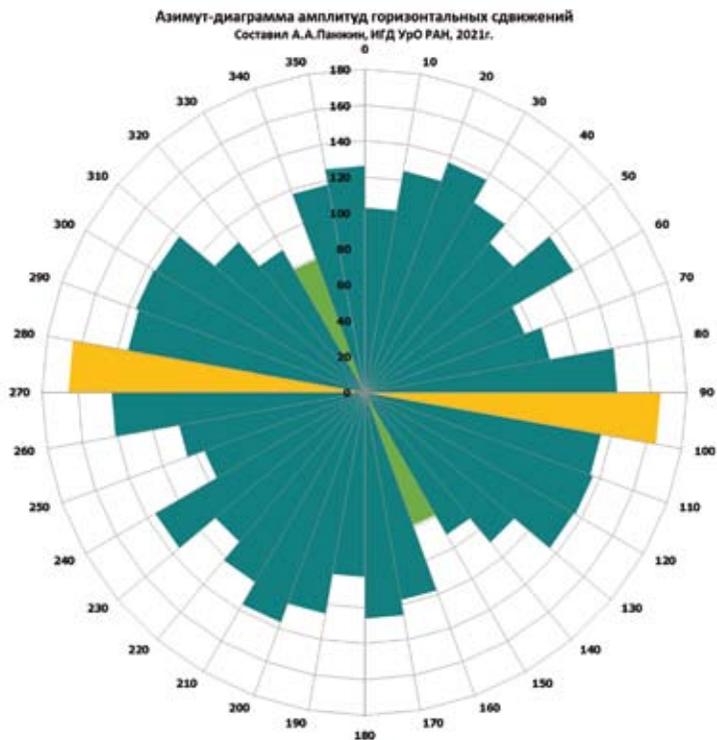


Рисунок 5.6. Азимут-диаграмма амплитуд горизонтальных сдвижений

Далее путем группировки данных о процессе сдвижения выделяются основные кластеры деформируемых структурных блоков и определяются границы между ними. Также по результатам геомеханического моделирования производится сопоставление теоретической и фактической моделей деформирования массива, нарушенного техногенной выемкой, и определяются параметры не только вторичного, но и исходного поля напряжений. Сопоставление моделей, в которых массив представлен упругой однородной средой с моделями метода конечных элементов (МКЭ) и фактическими данными, полученными прямыми деформационными измерениями, показало их адекватность для решения ряда геомеханических задач.

Поскольку при проведении маркшейдерско-геодезических измерений на первом этапе определяются вектора пространственных сдвижений, одной из важных задач является определение «условно неподвижных» пунктов, по которым центрируются и ориентируются в пространстве геометрические построения. В горном массиве, постоянная подвижность которого является одной из форм существования геологической среды, такие исходные пункты выделить невозможно [110]. Для решения задачи центрирования и ориентирования геодезических сетей применяется их привязка к сетям постоянно действующих станций IGS (International GNSS service) или CORS (Continuously operating reference station), что позволяет при многократных сериях мониторинговых измерений выявить трендовые движения реперов в общеземной системе глобальных координат ITRF (International terrestrial reference Frame) и выделить опорные пункты, которые можно принять за «условно неподвижные» [111].

Другим путем решения указанной задачи, позволяющим произвести центрирование и ориентирование геодезической сети в условиях отсутствия многократных серий мониторинговых измерений, является формирование «равновесной системы» с соблюдением принципа метода наименьших квадратов (МНК) для векторов сдвижений. При этом в формировании «равновесной системы» принимаются пункты ГГС, расположенные на удалении от крупных геологических структур и, по результатам геомеханического моделирования техногенного воздействия, вне областей значительного нарушения изостатического равновесия.

Данные об иерархически блочной структуре горного массива и его изменениях во времени возможно получить как прямыми маркшейдерско-геодезическими методами, так и косвенными

геофизическими. Среди прямых методов необходимо отметить дистанционные, при использовании которых не происходит непосредственного контакта с исследуемым объектом. Наиболее хорошо для решения указанной задачи себя зарекомендовали методы лазерного сканирования, локальных наземной и воздушной аэрофотосъемки.

В результате данных видов съемки формируется трехмерное облако точек заранее заданной плотности, каждая его точка которого имеет определенные с высокой точностью пространственные координаты, цветовые и отражающие характеристики. При однократном получении трехмерной модели исследуемого объекта, который может быть представлен геологическим обнажением, карьером или его локальным участком, отвалом, зоной обрушения, охраняемым объектом и проч., выявляются графически или с помощью математических фильтров выделения граней и нарушения сплошности, элементы залегания и размеры иерархических блоков, слагающих массив. При исследовании дистанционными методами состояния охраняемых объектов полученная фактическая трехмерная модель здания или сооружения сопоставляется с его исходными геометрическими параметрами, при этом проверяются размеры конструктивных элементов, их выдержанность в вертикальной и горизонтальной плоскостях и проч. Это позволяет определить значения коэффициентов трещиноватости и структурного ослабления породного массива, которые используются в качестве основных исходных данных при оценке устойчивости бортов и уступов карьеров аналитическими методами.

В случае организации мониторинговых исследований дистанционными методами по результатам сопоставления трехмерных моделей выявляется динамика трансформации геологической и техногенной среды во времени, в том числе скорости и пространственные направления смещений иерархических блоков, раскрытие или смыкание трещин, закономерности формирования оползневых участков и проч.

Для выполнения экспресс-диагностики напряженно-деформированного состояния массива целесообразно проведение исследований параметров циклических короткопериодных геодинамических движений методом непрерывного мониторинга комплексами спутниковой геодезии, обеспечивающего получение приращений всех трех координат точек стояния приборов в заданный момент времени.

Для камеральной обработки полевых наблюдений целесообразно использовать пакет Waypoint GrafNet/GrafNav, поддерживающий мощные возможности по вычислению кинематических траекторий, в том числе не только от одиночных базовых станций, но и для мультибазовой обработки данных, что многократно повышает надежность и точность спутниковых геодезических определений. При этом выполняется переформатирование исходных файлов данных формата RINEX путем физической расстановки в них меток начала и окончания дискретных интервалов. Выбор данного программного обеспечения обусловлен тем, что используемый в работе [112] модуль Motion Tracker фирменного обеспечения Trimble Total Control в результате расчетов дает завышенные амплитуды компонент короткопериодной геодинамики, при этом не позволяя четко выделить направления их действия вследствие значительного уменьшения эллиптичности азимут-диаграммы их распределения.

При этом для каждой линии необходимо производить оценку среднеквадратичных отклонений (СКО), по величине которых можно делать выводы о точности определения компонент короткопериодных движений. В случае, если амплитуда смещений превышает значение СКО 3σ , делается вывод о достоверном наличии короткопериодных движений интервала.

Для представленного на рисунке 5.7 примера можно сделать вывод, что подобное распределение циклических короткопериодных деформаций по интервалам наиболее вероятно в случае подвижности геоблока, в верхнем левом углу приведена азимут-диаграмма.

При этом геодинамические подвижки реализуются по следующим направлениям:

— в диагональном направлении, по азимуту 67° (247°), по поверхностям ослабления (тектоническим нарушениям), ограничивающим выделенный подвижный геоблок с северо-запада и юго-востока;

— в субширотном направлении, по азимуту 109° (289°) и диагональном по азимуту 153° (333°): как по поверхностям ослабления (тектоническим нарушениям), ограничивающим выделенный подвижный геоблок с северо-востока и юго-запада, так и в этих же направлениях, в виде периодических сжатия выделенного подвижного геоблока и снятия с него нагрузки.

Необходимо отметить, что приведенный способ реализации циклических короткопериодных деформаций зафиксирован при выполнении только одной серии диагностики геодинамической активности

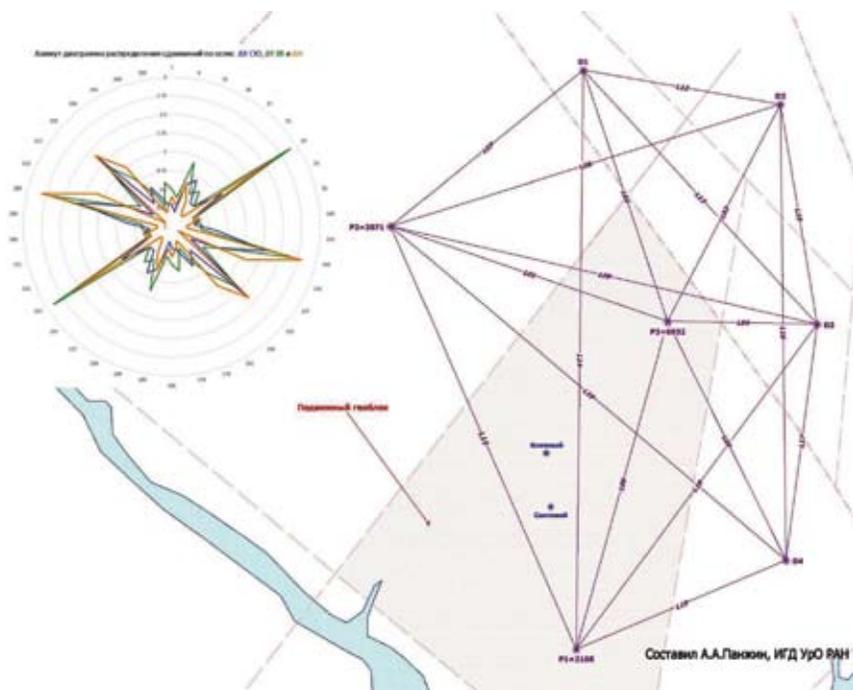


Рисунок 5.7. Схема к выделению подвижного геоблока

массива, и, скорее всего, не будет постоянным во времени. В связи с постоянно протекающими в реальном массиве горных пород явлениями деструкции и самоорганизации [113], при формировании консолидированных геоблоков, неизменно будет меняться и характер межблочного взаимодействия.

При недропользовании важным является не только диагностика геодинамической активности и определение параметров современных геодинамических движений в мониторинговом режиме, но и прогноз их эволюции во времени. Для решения этой задачи необходимо формирование постоянно пополняемых баз данных, включающих результаты инструментальных наблюдений за сдвигами и деформациями на различных пространственно-временных базах.

5.3. Формирование баз данных современных геодинамических движений массивов горных пород

Одной из основных задач, стоящих перед геомеханикой, открывающей дорогу к обеспечению безопасности всего разнообразия объектов недропользования, является раскрытие истоков и закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с их структурными особенностями на разных пространственно-временных базах.

Это стало возможным с внедрением в геомеханику методов и технологий спутниковой геодезии GPS/ГЛОНАСС. Субсантиметровая точность измерения вертикальных и горизонтальных смещений специально оборудованных геодезических знаков, преобразуемых методами механики сплошной среды в поля напряжений и деформаций, возможность проведения непрерывных и дискретных (сериями) наблюдений на различных пространственно-временных базах измерения при относительно невысокой трудоемкости открывают широкие перспективы в исследовании структуры полей напряжений и деформаций, их изменений во времени на разных масштабных уровнях.

Исследования проводятся в два этапа с использованием принципа «от общего к частному» [114, 115]. На первом этапе исследования опираются на международные сети станций IGS, EUREF и, в большей мере, на Фундаментальную астрономо-геодезическую сеть (ФАГС). Для уплотнения сети геодезических построений используются корпоративные станции, как правило находящиеся в ведении крупных университетов, геодезических компаний, подразделений Ростехинвентаризации и др. В настоящее время на территории России и в приграничных с ней областях Казахстана, Украины и Беларуси работают несколько сотен таких постоянно действующих GNSS станций, которые накапливают данные, что позволяет выполнить их высокоточную геодезическую привязку к общемировой сети IGS в режиме цикловых мониторинговых измерений (Рисунок 5.8).

Пространственные координаты станций международных геодезических сетей регулярно переопределяются, при этом для ряда станций доступны не только параметры временных рядов современных геодинамических движений, но и скорости смещений станций в трехмерном пространстве [116–117]. Также имеется возможность



- ◆ — пункты международных сетей; ◆ — пункты федеральных сетей;
◆ — пункты корпоративных сетей

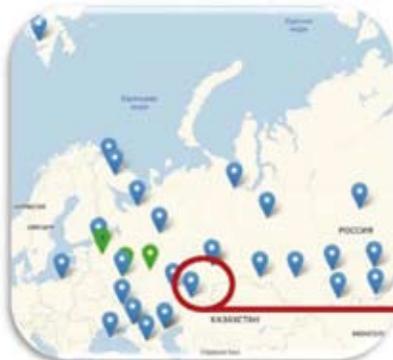
Рисунок 5.8. Схема расположения станций Фундаментальной астрономо-геодезической сети

камеральной обработки накопленных станциями данных в формате RINEX в пакетах программного обеспечения Bernese Software (методом Precise Point Positioning PPP), Waypoint GrafNet (методом Double Difference DD) и специальных on-line сервисах с определением пространственных координат пунктов по каждой суточной серии [118].

Поскольку расстояния между соседними пунктами международных и федеральных сетей могут превышать 1000–2000 км, по их данным проводится укрупненная оценка напряженно-деформированного состояния охватываемого ими района. Конкретизация параметров современных геодинамических движений и формируемого ими напряженно-деформированного состояния на площадках размещения объектов недропользования производится путем сгущения сети мониторинговых станций. Это достигается включением в геодезические измерения и построения пунктов нижних классов, в том числе корпоративных сетей, вплоть до использования пунктов геодезического обоснования предприятий (Рисунок 5.9), населенных пунктов и др. В некоторых случаях возникает необходимость создания специального геодинамического полигона [119].

Трендовые движения пунктов геодинамического полигона и реперов наблюдательной станции определяются на основе анализа

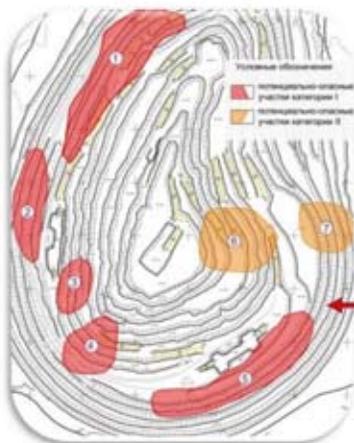
Уровень I – Европейская часть РФ



Уровень II – Южный Урал



Уровень IV – Карьер и прибортовой массив



Уровень III – Месторождение

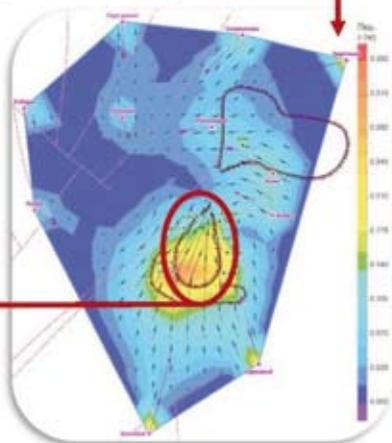


Рисунок 5.9. Иерархия рангов геодезических построений

изменений пространственных приращений координат (векторов) ΔX , ΔY , ΔZ , происходящих в промежутках между повторными циклами измерений [120, 121], а циклические короткопериодные определяются проведением непрерывных измерений [122]. Полученные в результате инструментальных измерений деформации интервалов с использованием математического аппарата механики сплошной среды преобразуются в векторное и тензорное представление деформационного поля с выделением главных компонентов тензора деформаций [123].

Как было показано в работе [124], в качестве ключевого источника информации о геодинамических движениях по результатам мониторинговых измерений, проводимых на больших пространственно-временных базах, целесообразно использовать не абсолютные значения величин векторов сдвижений пунктов GNSS и реперов наблюдательных станций, а их скорости, приведенные к годовому циклу. Приведение скоростей к годовому циклу необходимо при проведении мониторинговых измерений по нерегулярным по времени цикловым измерениям для приведения результатов к общей пространственно-временной базе.

Определение цикловых пространственных координат сетей межрегиональных и региональных постоянно действующих станций осуществляется, в зависимости от размеров сетей, методами Precise Point Positioning (PPP) для больших сетей, и классическими методами Double Difference (DD) для локальных сетей. Также методы PPP и DD могут использоваться в комбинации, при этом методами DD производится расчет и уравнивание геодезической сети, а методом PPP — привязка локальных и региональных геодезических построений к международной сети IGS.

За период с 2020 по 2021 год для территории России были получены сырые RINEX данные международных и федеральных сетей, выполнена их обработка с получением пространственных координат цикловых наблюдений. Определены скорости современных геодинамических движений пунктов, наблюдения на которых производились более 2 лет (Рисунок 5.10). Видно, что скорости современных геодинамических движений неоднородные, разности по широте достигают 37 мм/год, что соответствует горизонтальным деформациям $1.4 \cdot 10^{-8}$ /год, разности по долготе достигают 22 мм/год, что соответствует горизонтальным деформациям $3.3 \cdot 10^{-9}$ /год. По разности скоростей современных геодинамических движений возможно осуществление районирования территорий России по уровню напряженно-деформированного состояния (скорости движений, параметры поля деформаций, векторные характеристики поля деформаций) с выделением зон преимущественного сжатия, зон депрессии и зон преимущественно сдвиговых деформаций.

Неоднородность скоростей геодинамических движений на локальном и региональном уровнях проиллюстрирована ниже (Рисунки 5.11–5.12). Видно, что и на этом масштабном уровне скорости современных геодинамических движений крайне неоднородные.

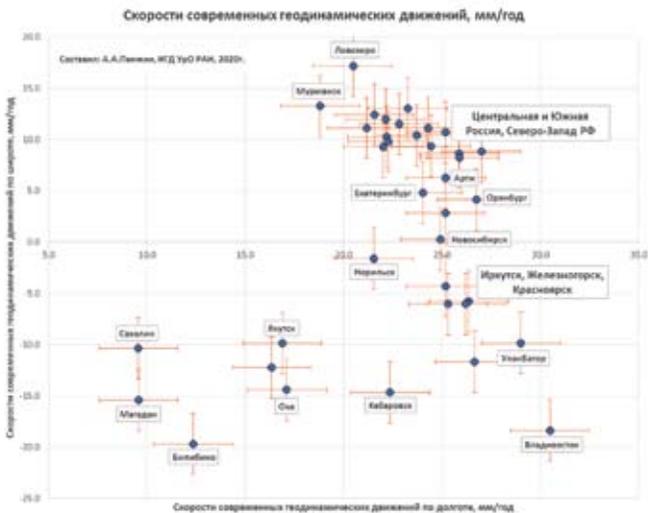


Рисунок 5.10. Скорости современных геодинамических движений территории России

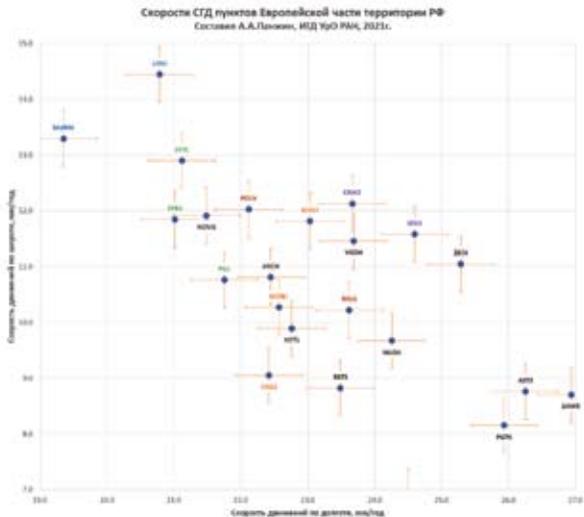


Рисунок 5.11. Скорости современных геодинамических движений пунктов европейской части территории России

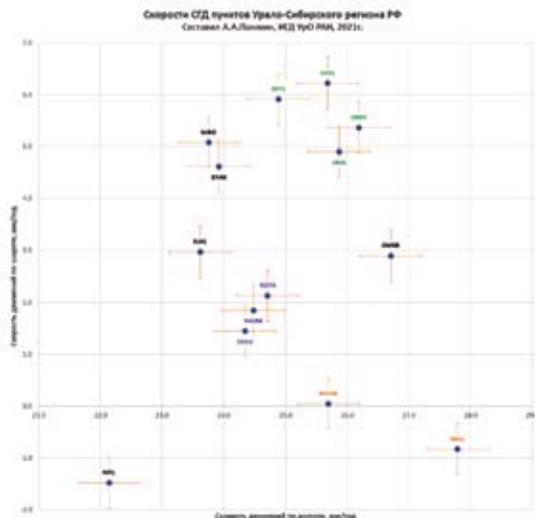


Рисунок 5.12. Скорости современных геодинамических движений пунктов Урало-Сибирского региона России

Так, для пунктов, расположенных на европейской части территории России, разности скоростей современных геодинамических движений достигают:

- для Санкт-Петербурга — 2.1 мм/год по широте и 0.7 мм/год по долготе;
- для Москвы — 2.7 мм/год по широте и 0.2 мм/год по долготе;
- для Кольского полуострова — 1.1 мм/год по широте и 1.4 мм/год по долготе;
- для полуострова Крым — 0.5 мм/год по широте и 0.9 мм/год по долготе.

Для пунктов, расположенных в Урало-Сибирском регионе России, разности скоростей современных геодинамических движений достигают:

- для Екатеринбурга — 1.0 мм/год по широте и 1.0 мм/год по долготе;
- для Новосибирска — 0.8 мм/год по широте и 2.1 мм/год по долготе;
- для Иркутска — 0.4 мм/год по широте и 1.1 мм/год по долготе;
- для Якутии — 0.5 мм/год по широте и 5.6 мм/год по долготе.

Таким величинам разностей скоростей современных геодинамических движений, зафиксированных на региональном и локальном уровнях, соответствуют горизонтальные деформации порядка 10^{-6} – 10^{-7} /год. Такие деформации, хотя и не могут непосредственно привести к нарушению объектов недропользования, являются индикатором наличия в массиве горных пород активных тектонических структур, на пересечении с которыми возможно возникновение аварийных ситуаций на крупных инженерных объектах и сооружениях.

Вся вышеуказанная информация служит основой для создания баз данных современных геодинамических движений. При этом, по иерархическому уровню, база данных может быть федеральной, охватывающей всю территорию Российской Федерации, и региональной, охватывающей локальную территорию, регион, и детализирующей параметры деформационных полей.

В настоящее время на территории России и в приграничных с ней областях Казахстана, Украины и Беларуси работают несколько сотен постоянно действующих GNSS станций, которые производят накопление данных, что позволяет выполнить их высокоточную геодезическую привязку к общемировой сети IGS в режиме цикловых мониторинговых измерений. Характеристика основных сетей, включающих как международные научные проекты, так и корпоративные сети, приведена на рисунке 5.13.

Необходимо отметить, что станции CORS сконцентрированы в основном в западной части России, в районах Урала, Сибири и Дальнего Востока их сеть разрежена, поэтому для их концентрации необходимо использовать данные из сетей, принадлежащих различным организациям, что в ряде случаев приводит к проблемам их совместимости. Также при использовании CORS, в отличие от международных сетей, возникает проблема получения архивных (более 2–3 месяцев) исходных RINEX данных, поскольку для них не предусмотрено длительное хранение на серверах.

Для исследования современной геодинамической активности территории России и ее регионов была построена геодезическая сеть на всю территорию страны, основой которой послужили пункты IGS и ФАГС, и региональные сети, основой которой послужили пункты CORS.

Региональные сети созданы для следующих регионов (Рисунок 5.14):

— район Курской магнитной аномалии (КМА);

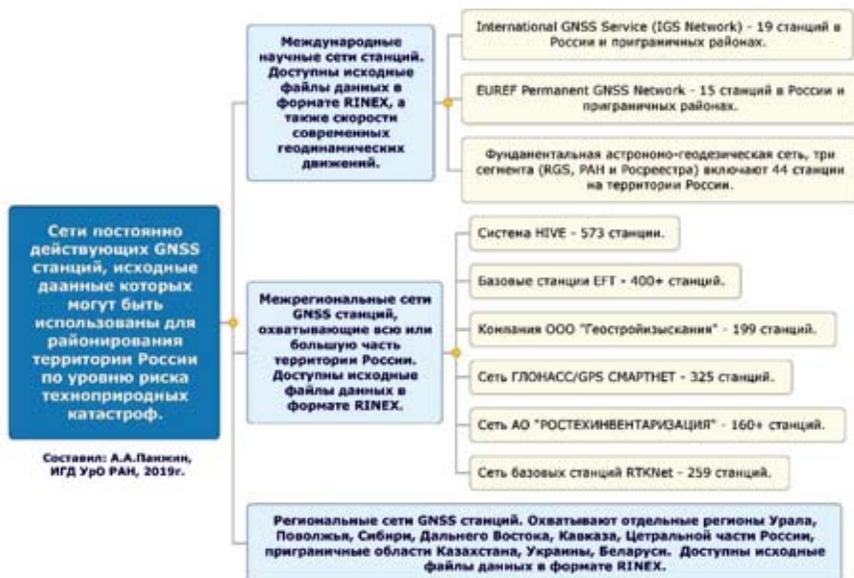


Рисунок 5.13. Общая характеристика сетей постоянно действующих GNSS-станций



Рисунок 5.14. Региональные геодинамические полигоны

- район Воронежского кристаллического массива (ВКМ);
- Уральский регион;
- Кузнецкий угольный бассейн (Кузбасс).
- район Кольского полуострова.

В указанных регионах ведется масштабная добыча полезных ископаемых, также фиксируется природная и техногенная сейсмичность.

Так, для случая геодинамического полигона (Рисунок 5.15), объединяющего район Курской магнитной аномалии (КМА) и район Воронежского кристаллического массива (ВКМ), территория которого считается сейсмически малоактивной, зафиксированы природные сейсмические события, в том числе глубинные, магнитудой до 4.4, также в указанном регионе ведутся масштабные горные работы, связанные в том числе с нарушением водозащитной толщи месторождений полезных ископаемых [125].

Разности скоростей современных геодинамических движений на данной территории достигают 19.3 мм/год, что соответствует величинам горизонтальных деформаций порядка 10^{-6} – 10^{-7} /год, характерных для региональных и локальных геодинамических полигонов, что было отмечено выше.

На геодинамическом полигоне Кузбасса (Рисунок 5.16), геодезические наблюдения на котором начались только в 2020 г., также ве-



Рисунок 5.15. Объединенный геодинамический полигон КМА и ВКМ



Рисунок 5.16. Геодинамический полигон Кузбасса

дется масштабная добыча полезных ископаемых, исследуемая территория отличается повышенной сейсмической активностью, в том числе техногенной.

Характерным примером техногенного землетрясения, магнитуда которого составила 5.4, является сейсмическое событие, произошедшее в Кемеровской области. Толчки произошли в ночь на 13 августа, недалеко от Большой Талды, где расположено несколько угольных разрезов, они были спровоцированы интенсивным ведением горных работ — эпицентр расположен в осадочных породах, образовавшихся в ходе добычи угля. Таким образом, геодинамический полигон Кузбасса является перспективным с точки зрения исследования современных геодинамических движений во взаимной их увязке с областями концентрации горизонтальных деформаций и формирования очагов природной и техногенной сейсмичности.

Определение пространственных координат пунктов геодинамических полигонов от международных геодезических сетей осуществляется с погрешностями, величина которых зависит от размеров сети, продолжительности наблюдений, наличия или отсутствия на пункте наблюдений переотраженного сигнала, текущего состояния ионосферы Земли и ряда других факторов [126, 127].

Типичная величина погрешности определения координат 2σ при выполнении наблюдений суточными сериями и обработке результатов измерений в программном обеспечении Bernese Software в автоматическом режиме составляет 2–3 мм в горизонтальной плоскости и 7–8 мм в вертикальной плоскости. Для локальных геодинамических полигонов, размеры которых составляют десятки или первые сотни километров, величины погрешностей будут значительно ниже [128].

Соответственно, величины скоростей современных геодинамических движений будут иметь погрешность, обусловленную погрешно-

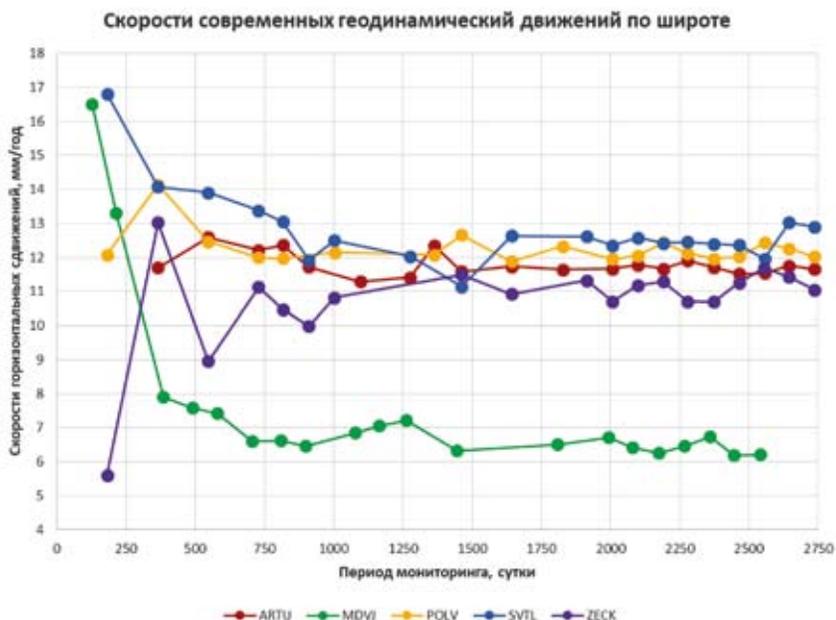


Рисунок 5.17. Стабилизация скоростей современных геодинамических движений во времени по широте

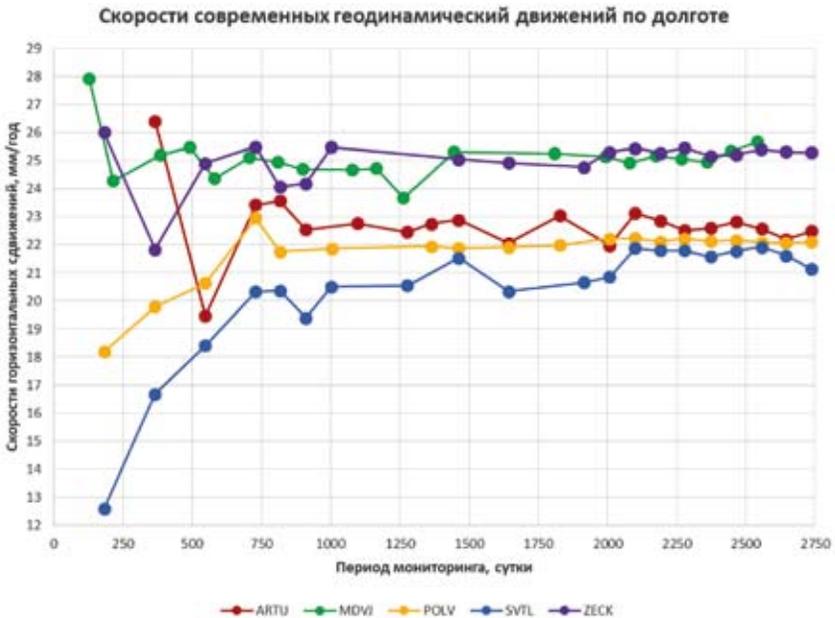


Рисунок 5.18. Стабилизация скоростей современных геодинамических движений во времени по долготе

стью определения цикловых пространственных координат наблюдательных пунктов. Погрешность определения скоростей уменьшается при увеличении времени мониторинга, и в итоге она стабилизируется на некоторых временных базах, на которых погрешности определения координат пунктов не будут иметь значительного влияния.

Так, при скоростях современных геодинамических движений, составляющих 40 мм/год, для 5-летнего интервала мониторинговых наблюдений, трендовые сдвигения составят 200 мм, что при погрешности определения координат пункта, равной 4 мм, дает погрешность определения скоростей сдвигения, не превышающую 2 %.

Для определения величины минимально необходимого временного интервала мониторинговых наблюдений, при котором возможно определение максимально приближенных к истинным величинам, были построены графики стабилизации скоростей современных геодинамических движений во времени для интервала, соответствующего 2750 суткам (Рисунки 5.17–5.18).

Путем анализа графиков было установлено, что стабилизация скоростей современных геодинамических движений по широте и долготе (по погрешностям определения координат в цикловых сериях) в горизонтальной плоскости составляет не менее 750 суток (2 годовых цикла). Таким образом, при формировании баз данных современных геодинамических движений необходимы геодезические определения пространственных координат наблюдательных пунктов в течение как минимум двух годовых циклов для получения статистически значимого результата.

С целью районирования территории Российской Федерации по риску возникновения природно-техногенных катастроф разработана методика создания базы данных по критерию ее геодинамической активности (Рисунок 5.19), основывающаяся на учете скоростей современных движений наблюдательных пунктов постоянно действующим

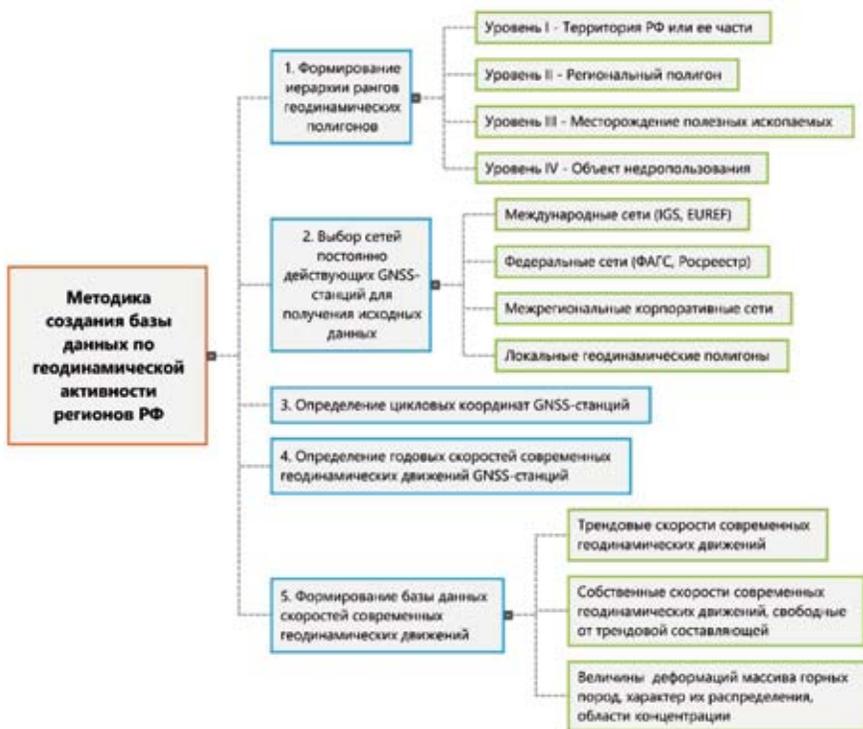


Рисунок 5.19. Методика создания базы данных

ющих геодезических станций. По изменениям их цикловых координат вычисляются трендовые и собственные, свободные от трендовой составляющей, скорости современных геодинамических движений, на основе которых определяются величины и ориентировка главных направлений деформаций массива горных пород, характер распределения деформационного поля, выделяются области концентрации главных и сдвиговых деформаций.

На основе экспериментальных данных определения скоростей современных геодинамических движений ВКМ и КМА в Международной земной системе координат ITRF2014 созданы постоянно пополняемые «База данных современных геодинамических движений Воронежского кристаллического массива» [129] и «База данных современных геодинамических движений территории Курской магнитной аномалии». В базах данных представлена информация о скоростях современных геодинамических движений, по которым выявляются области высокоградиентных движений и концентрации деформаций ВКМ и КМА. Базы данных могут использоваться для получения информации о геодинамической активности массива горных пород, предназначенного для расположения сложных и ответственных объектов промышленной инфраструктуры с целью обеспечения их устойчивости и безопасности. Информация, представленная в базах данных, может быть использована для выявления и идентификации активных тектонических структур региона и геодинамического районирования ВКМ и КМА. Аналогичные базы данных в настоящее время создаются для Уральского региона, территории Кузнецкого угольного бассейна и Кольского полуострова.

5.4. Идентификация и визуализация геодинамических движений и деформационных полей по результатам мониторинговых измерений

Вопрос возможности исследования современных геодинамических движений с использованием данных деформационного мониторинга, проводимых как в режиме дискретных наблюдений на пунктах геодезической сети (ГС), так и с использованием денных постоянно действующих станций (GNSS), неоднократно рассматривался в связи с исследованием современной геодинамики Уральского

региона, вызванной как естественными, так и техногенными факторами [130, 131].

Важным аспектом при исследовании и визуализации современных геодинамических движений является моделирование природных, техногенных и экологических систем, которое позволяет выявить многие необходимые для их анализа свойства и характеристики, в том числе скрытые закономерности их пространственно-временного распределения. При этом многое зависит от исследования, адекватного объекту и его компонентам: идентификации и визуализации как количественной, так и качественной пространственно-временной информации [132].

Также визуализация геодинамических движений по результатам цикловых геодезических измерений позволяет более обоснованно выделять активные геологические структуры, блоки, тектонические разломы, что необходимо для прогнозирования мест возможных сейсмических событий и принятия профилактических мер для обеспечения безопасности населения, промышленных объектов и др.

Исследования современных геодинамических движений осуществлялись на Воронежском кристаллическом массиве (ВКМ) с использованием данных деформационного мониторинга, проводимых постоянно действующими станциями GNSS на территории региона [133] (Рисунок 5.20).

Всего, как отмечено в базе данных, на исследуемой территории, на площади размерами 200x300 км, расположено 19 пунктов GNSS, которые производят накопление данных, что позволяет выполнить их высокоточную геодезическую привязку к общемировой сети IGS в режиме цикловых мониторинговых измерений. Чтобы иметь возможность проследить и оценить вероятную связь современных геодинамических движений с тектоническим строением региона, на рисунке 5.21 совмещено размещение пунктов GNSS с основными разломами региона, отмечаемыми фондовыми геологическими материалами.

Также на исследуемом участке зафиксирован эпицентр сейсмического события, отнесенного к природным землетрясениям. Магнитуда землетрясения, произошедшего 31.03.2000, составила 3.9, глубина очага 10 км (Рисунок 5.21). По последствиям землетрясения такой магнитуды не представляют серьезной опасности, но они, являясь динамической реализацией предшествующих деформационных процессов, в определенной мере характеризуют современную геодинамическую активность района.



Рисунок 5.20. Свидетельство о регистрации базы данных современных геодинамических движений ВКМ

В работе [134] было показано, что в качестве ключевого источника информации о геодинамических движениях по результатам мониторинговых измерений, проводимых на больших пространственно-временных базах, целесообразно использовать не абсолютные значения величин векторов сдвижений пунктов GNSS и реперов наблюдательных станций, а их скорости, приведенные к годовому циклу. Приведение скоростей к годовому циклу необходимо при проведении мониторинговых измерений по нерегулярным по времени цикловым измерениям для приведения результатов к общей пространственно-временной базе.



Рисунок 5.21. Ситуационная карта расположения станций GNSS, по которым определялись современные геодинамические движения

Определение цикловых пространственных координат пунктов постоянно действующих станций осуществлялось методами Precise Point Positioning (PPP) [135] и классическими методами Double Difference (DD). Также методы PPP и DD могут использоваться в комбинации, при этом методами DD производится расчет и уравнивание геодезической сети, а методом PPP — привязка локальных и региональных геодезических построений к международной сети IGS.

Годовые скорости векторов трендовых движений пунктов были определены на основе анализа изменений их пространственных приращений — координат ΔX , ΔY , ΔZ , происшедших в промежутках между повторными циклами измерений (Таблица 5.1), представленных на рисунке 5.22. Направления и величины векторов достаточно однородны, что отражает общее преимущественно восточное трендовое направление литосферной плиты, включающей ВКМ.

Как видно из таблицы 5.1, на исследуемом участке, на фоне трендовой составляющей также отмечается неоднородность скоростей

Таблица 5.1

**Геодинамические движения пунктов GNSS
Воронежского кристаллического массива**

Станция мониторинга	Координаты станции, WGS-84		Период мониторинга	Геодинамические движения, мм/год				
	B (широта)	L (долгота)		ΔB	ΔL	ΔH	2D	3D
ALKS	50°17'06"	42°11'21"	289 сут., 7 серий	8.1	34.0	9.7	34.9	36.2
ANNA	51°29'07"	40°25'21"	289 сут., 7 серий	13.6	31.3	7.6	34.2	35.0
BTRL	50°50'09"	40°34'41"	289 сут., 7 серий	12.6	32.4	5.1	34.8	35.2
ERTL	51°50'24"	40°46'53"	289 сут., 7 серий	8.7	32.2	6.3	33.4	34.0
KLCH	50°25'22"	41°01'00"	289 сут., 7 серий	9.5	33.2	6.7	34.5	35.2
LISK	50°58'21"	39°30'22"	289 сут., 7 серий	10.5	33.0	-1.3	34.7	34.7
MIHA	50°04'49"	43°13'53"	366 сут., 8 серий	9.6	30.9	10.3	32.4	34.0
NHOP	51°05'28"	41°36'24"	365 сут., 8 серий	9.4	27.1	5.0	28.7	29.1
NVOR	51°18'45"	39°12'22"	556 сут., 9 серий	11.3	29.7	6.3	31.8	32.5
PAVL	50°27'39"	40°05'55"	405 сут., 10 серий	6.1	23.1	13.2	23.9	27.3
PESK	51°15'13"	42°27'25"	623 сут., 10 серий	6.1	33.0	-4.7	33.5	33.9
PRBD	50°44'56"	43°03'21"	289 сут., 7 серий	7.7	36.6	2.9	37.4	37.5
TERN	51°41'07"	41°35'34"	715 сут., 11 серий	10.0	29.1	-3.7	30.8	31.0
TRKI	51°59'33"	43°16'19"	289 сут., 7 серий	6.0	39.8	6.7	40.3	40.8
URPN	50°47'42"	42°00'22"	289 сут., 7 серий	9.4	30.0	9.7	31.4	32.9
USMN	52°03'29"	39°44'43"	289 сут., 7 серий	9.2	34.5	7.2	35.8	36.5
UVAR	51°59'10"	42°15'22"	414 сут., 7 серий	8.8	32.7	9.7	33.9	35.2
VRN1	51°40'36"	39°10'13"	419 сут., 7 серий	9.8	33.4	8.1	34.8	35.8
VRN3	51°55'07"	39°17'45"	492 сут., 8 серий	10.2	31.4	-3.2	33.0	33.1

геодинамических движений в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

В качестве ключевого источника информации о геодинамических движениях по результатам мониторинговых измерений, проводимых на больших пространственно-временных базах, целесообразно использовать не абсолютные значения величин векторов сдвижений пунктов GNSS и реперов наблюдательных станций, а их скорости, приведенные к годовому циклу. Это необходимо при проведении мониторинговых измерений по нерегулярным по времени цикловым измерениям для приведения результатов к общей пространственно-временной базе.

Также анализ скоростей геодинамических движений, а не их абсолютных значений целесообразно использовать при исследовании процесса сдвижения при подземной и открытой разработках месторождений полезных ископаемых, поскольку в условиях действующего горнодобывающего предприятия возникает проблема утраты реперов наблюдательной станции. Это приводит к частичной ротации реперов вследствие восстановления уничтоженных и добавления новых в геодезические построения. При этом сопоставление абсолютных величин сдвижений и деформаций, полученных в различные

периоды времени, будет некорректным при использовании традиционных алгоритмов оценки и анализа деформационного состояния массива.

В результате для каждой серии цикловых измерений определяются изменения пространственных приращений координат ΔX , ΔY , ΔZ пунктов, которые, для случая ВКМ, имеют преимущественно восточное направление за счет трендовой составляющей. При этом векторное поле деформаций визуализируется практически однородным, что не позволяет качественно идентифицировать пространственно-временную информацию о геодинамических движениях. Для числовой фильтрации трендовой составляющей применялся метод наименьших квадратов векторов сдвижений по каждой оси координат X , Y , Z : $\sum \delta_x \delta_x \rightarrow \min$; $\sum \delta_y \delta_y \rightarrow \min$; $\sum \delta_z \delta_z \rightarrow \min$.

В результате определено и графически построено освобожденное от трендовой составляющей поле векторов геодинамических движений исследуемой территории ВКМ, в котором визуально определяют-



Рисунок 5.22. Векторы трендовых горизонтальных современных геодинамических движений

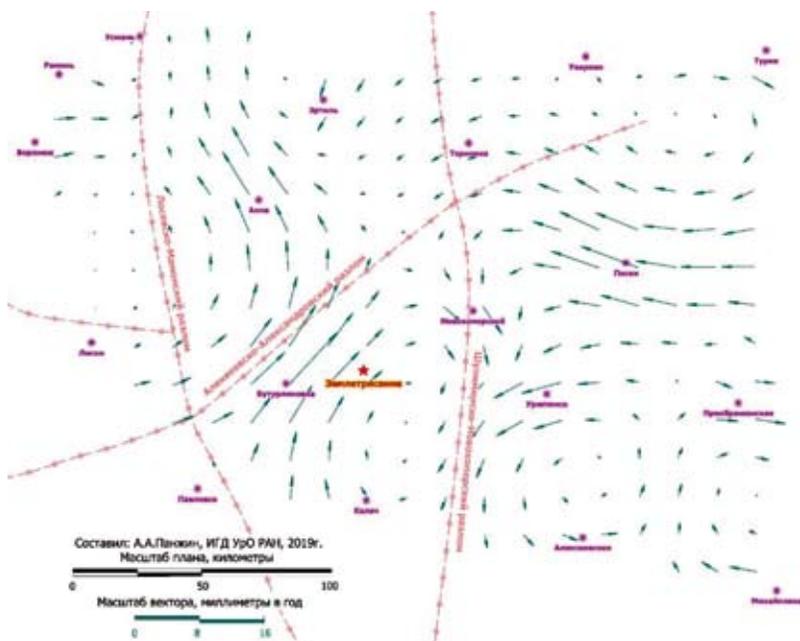


Рисунок 5.23. Вихревые движения на исследуемой территории

ся вихревые сдвигания (Рисунок 5.23). Важность визуализации вихревых (ротационных) геодинамических движений объясняется тем, что границы вихрей формируются по границам крупных подвижных структурных нарушений, что позволяет идентифицировать активные тектонические структуры района [136, 137].

Полученные в результате измерений геодинамические движения с использованием математического аппарата механики сплошной среды преобразуются также в векторное и тензорное представление деформационного поля с выделением главных компонентов тензора деформаций (Рисунок 5.24). Это позволяет выделить и идентифицировать зоны с максимальными значениями главных деформаций как растяжения, так и сжатия, а также зоны с повышенными значениями сдвиговых деформаций, приводящих к разрушениям объектов инфраструктуры.

Таким образом, на данном этапе доказаны методические положения о возможности визуализации геодинамических движений по результатам цикловых геодезических измерений в виде векторного

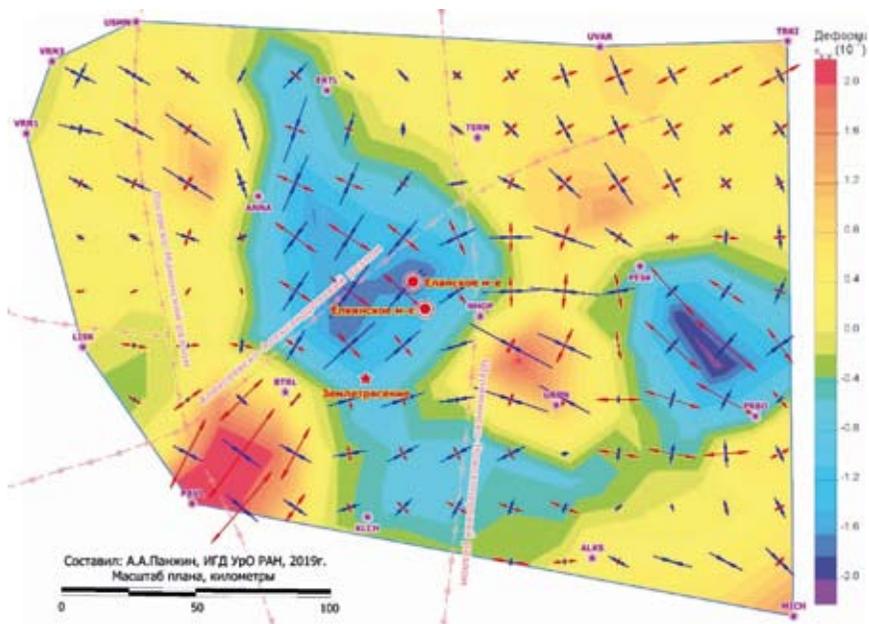


Рисунок 5.24. Совмещенная схема поля тензоров горизонтальных главных деформаций (стрелки) и уровня сдвиговых деформаций (цвет, шкала справа)

поля. Экспериментально выявлен вихревой характер современных геодинимических движений как индикатор активных тектонических нарушений. Это позволяет путем математического анализа поля сдвижений и деформаций обоснованно выделять активные геологические структуры, блоки, тектонические разломы, что необходимо для прогнозирования мест возможных сейсмических событий и принятия профилактических мер для обеспечения безопасности населения, промышленных объектов и др.

В дальнейшем с целью идентификации современных геодинимических движений по результатам цикловых геодезических измерений предложено использовать характеристики векторного поля: дивергенцию и ротор [138, 139]. Дивергенция позволяет дифференцировать области массива по параметру источников и стоков векторного потока: сходящийся векторный поток формирует области преимущественного объемного сжатия, расходящийся — области депрессии. Ротор определяет величину и направление вращательных движений геоблоков.

Дивергенция — одна из часто используемых дифференциальных характеристик векторного поля, представляющая собой одно число (скаляр), относящееся к определенной точке. Векторное поле в целом описывается скалярным полем дивергенции, которая отражает изменение величины векторов в непосредственной близости от рассматриваемой точки во всех направлениях. Дивергенция относится к числу объемных производных векторного поля. В математической записи определение дивергенции следующее:

$$\operatorname{div} F = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{\Phi_F}{V}, \quad (5.1)$$

где Φ_F — поток векторного поля F через сферическую поверхность площадью S , которая ограничивает объем V . В общем случае допускается любая форма области с поверхностью S и объемом V . Но существует требование нахождения всей поверхности в бесконечно малой окрестности исследуемой точки. Таким образом, дивергенция (5.1) должна быть локальной операцией. С физической точки зрения дивергенция векторного поля количественно характеризует данную точку пространства как источник или сток этого поля. Примером интерпретации может служить озеро с двумерным векторным полем горизонтального движения воды. Положительную дивергенцию поля скоростей течения дают родники, бьющие из дна озера, подводные стоки с утекающей водой — отрицательную дивергенцию:

$\operatorname{div} F < 0$ — точка поля является стоком;

$\operatorname{div} F = 0$ — стоков и источников нет или они компенсируют друг друга;

$\operatorname{div} F > 0$ — точка поля является источником.

Для векторного поля на двумерном пространстве вычисление дивергенции отражает местоположение вершин и впадин на карте не градиентов (направлений наискорейшего спуска). На вершинах дивергенция положительна, во впадинах, соответственно, — отрицательна.

Для реализации формулы (5.1) в реальных условиях дискретной координатизации земной поверхности и ее трехмерных сдвижений необходимо использовать понятия потока векторного поля и векторной трубки. Ее можно определить, если через произвольный замкнутый контур L в каждой его точке провести силовую линию поля (Рисунок 5.25).

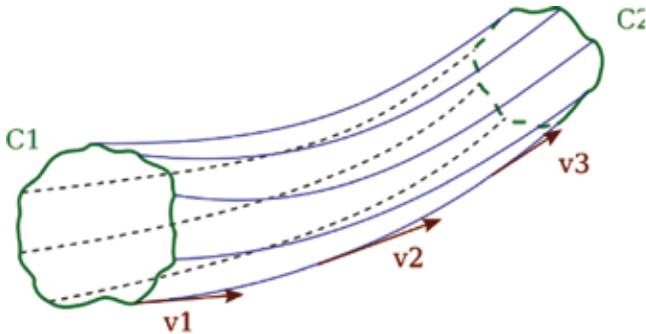


Рисунок 5.25. Векторная трубка, ограниченная силовыми линиями, входным сечением $C1$ и выходным сечением $C2$

Разность площади выходного сечения $C2$ и входного сечения $C1$ векторной трубки при малых ее размерах и при равенстве входного и выходного векторов позволяет количественно оценить значение дивергенции.

Вторая характеристика векторного поля, используемая для оценки вихревых поверхностных движений, — ротор поля. Ротор, наряду с дивергенцией, является дифференциальной характеристикой векторного поля движений.

В качестве образа ротора можно использовать представление о вращении брошенной в поток маленькой пылинки (увлекаемой потоком с собой, без его заметного возмущения) или о вращении помещенного в поток с закрепленной осью маленького (без инерции, вращаемого потоком, заметно не искажая его) колеса с прямыми (не винтовыми) лопастями. Если то или другое при взгляде на него вращается против часовой стрелки, то это означает, что вектор ротора поля скорости потока в данной точке имеет положительную проекцию по направлению к нам. Для физической интерпретации используется теорема Коши — Гельмгольца, согласно которой распределение скоростей сплошной среды вблизи точки « O » задается следующим уравнением:

$$v(r) = v_o + \omega r + \nabla\varphi + o(r), \quad (5.2)$$

где ω — вектор углового вращения элемента среды в точке « O », а φ — квадратичная форма от координат — потенциал деформации элемента среды.

Таким образом, движение сплошной среды вблизи точки «О» складывается из поступательного движения, вращательного движения и потенциального движения — деформации. Применяя к формуле Коши — Гельмгольца операцию ротора, получаем, что в точке «О» справедливо равенство $\text{rot} = 2\omega$, и, следовательно, можно заключить, что, когда речь идет о векторном поле, являющемся полем скоростей некоторой среды, ротор этого векторного поля в заданной точке равен удвоенному вектору углового вращения элемента среды с центром в этой точке (Рисунок 5.26).

В контексте поставленной задачи для каждого единичного треугольного элемента, на сеть которых разбивается исследуемый участок, по координатам вершин и их смещениям вычисляется инвариантная характеристика — угловая скорость ω . Для геометрического центра треугольника значение ротора определяется по упомянутой выше формуле $\text{rot} = 2\omega$. По полученным значениям путем интерполяции в итоге может быть построена цифровая модель поля ротора векторного поля. Методы и алгоритмы определения дивергенции (Рисунок 5.27) и ротора поля (Рисунок 5.28) опробованы на основании реальных данных мониторинговых наблюдений за скоростями современных геодинамических движений, выполненных в 2019–2020 гг. на полигоне Воронежского кристаллического массива [140].

Таким образом, с целью идентификации и визуализации современных геодинамических движений по результатам цикловых геодезических измерений предложено использовать характеристики

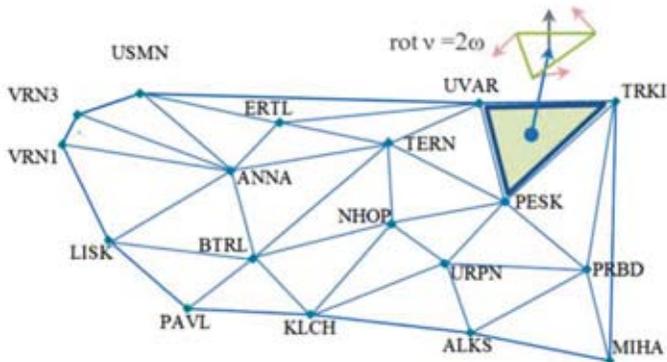


Рисунок 5.26. Схема наблюдательной геодезической сети, используемая для определения ротора поля

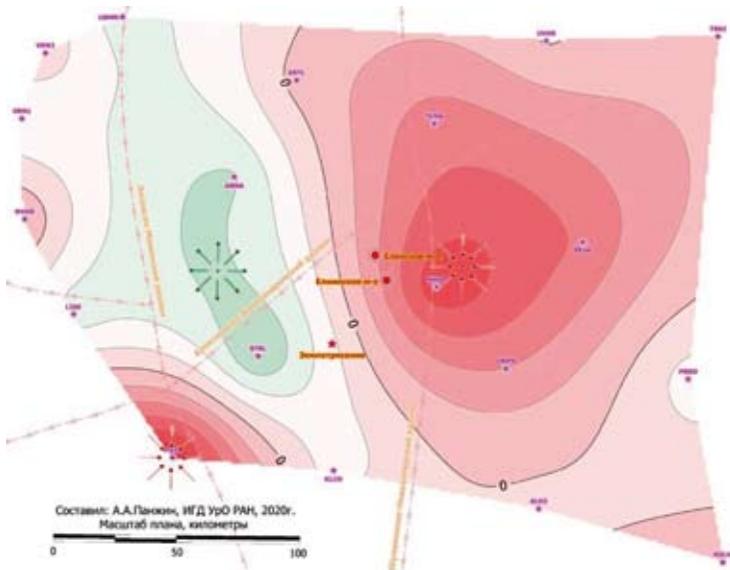


Рисунок 5.27. Дивергенция векторного поля территории ВКМ

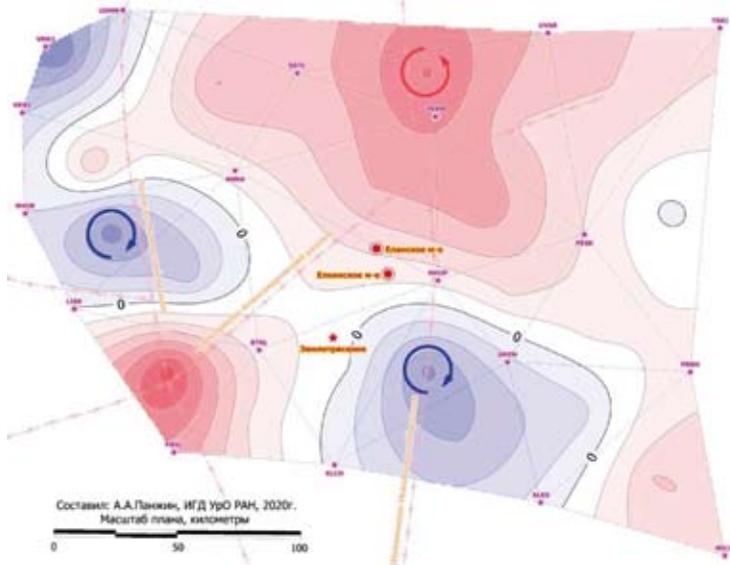


Рисунок 5.28. Ротор векторного поля территории ВКМ

векторного поля: дивергенцию и ротор. Дивергенция позволяет дифференцировать области массива по параметру источников и стоков векторного потока: сходящийся векторный поток формирует области преимущественного объемного сжатия, расходящийся – области депрессии. Ротор определяет величину и направление вращательных движений геоблоков. По этим параметрам на основании геоинформационного моделирования выделяются активные геологические структуры, консолидированные геоблоки, области сжатия и депрессии — для прогнозирования мест возможных сейсмических событий и обоснования профилактических мер по обеспечению безопасности населения, промышленных объектов и др.

Для идентификации и визуализации современных геодинамических движений организуются глобальные, региональные и локальные геодинамические полигоны. При этом инструментальные геодезические измерения, проводимые с целью построения деформационных полей, могут быть двух основных видов:

- координатные измерения, выполняемые на наблюдательных пунктах, в результате которых определяются пространственныеращения координат ΔX , ΔY , ΔZ , происшедшие в промежутках между повторными циклами измерений;

- измерения длин интервалов между наблюдательными пунктами, в результате которых по изменению длин линий, происшедших в промежутках между повторными циклами измерений, определяются линейные деформации.

В стесненных условиях плотной застройки, как городской, так и промышленной, при мониторинге деформационных процессов использование методов спутниковой геодезии, как правило ограничено поскольку, для координатных GNSS измерений необходим открытый небосвод и минимальные помехи от отражения спутникового радиосигнала. В этих условиях для получения требуемого результата целесообразно комбинирование разнородных геодезических инструментальных измерений: координатных GNSS и тахеометрических измерений с линейными. Пример комбинированных измерений на промплощадке шахты приведен на рисунке 5.29.

Таким образом, при выполнении деформационного мониторинга в стесненных условиях плотной застройки, как городской, так и промышленной, необходимо построение поля деформаций, с совместным использованием, в качестве исходных данных, результатов разнородных инструментальных измерений: векторов сдвижений

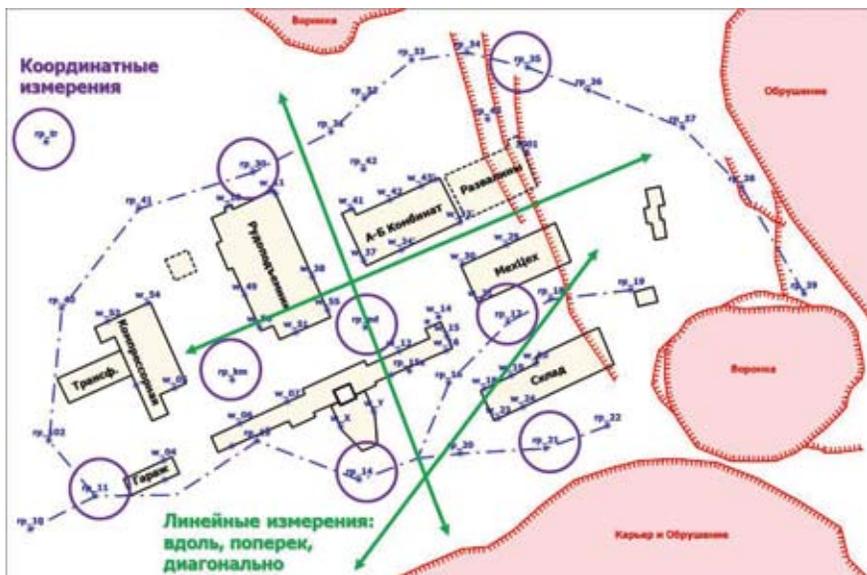


Рисунок 5.29. Разнородные инструментальные измерения для определения параметров деформационного поля промплощадки шахты

(их компонент по осям координат) и изменений (деформаций) интервалов между реперами наблюдательной станции.

Массив исходных данных деформационного мониторинга, полученных с использованием результатов разнородных инструментальных измерений, упрощенно представлен на рисунке 5.30:

– U_A, U_B, U_C – векторы горизонтальных сдвижений реперов А, В, С – их цикловые пространственные координаты могут быть получены как методами спутниковой геодезии GNSS, так и в результате съемки электронным тахеометром;

– $\Delta L_{12}, \Delta L_{34}$ – изменения длин линий интервалов 1–2 и 3–4 – их цикловые приращения и деформации могут быть получены как прямыми, так и косвенными методами при измерении рулеткой, дальномером, электронным тахеометром и др.

Необходимо отметить, что упомянутые методы деформационного мониторинга по отдельности, в стесненных условиях плотной застройки, как городской, так и промышленной, имеют свои ограничения и недостатки:

– координатные GNSS измерения требовательны к приему во

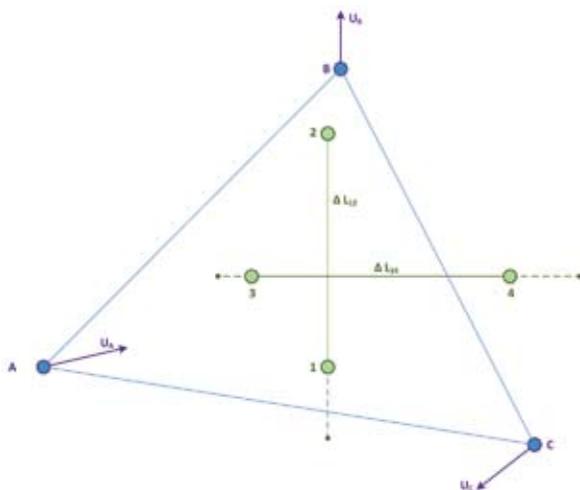


Рисунок 5.30. Схема использования результатов разнородных инструментальных измерений

время сеанса наблюдений качественного спутникового радиосигнала, что не всегда возможно обеспечить в условиях промышленных площадок и городских территорий;

- координатные измерения с использованием электронных тахеометров являются время- и трудоемкими, при этом необходимо обеспечить прямую оптическую видимость между соседними наблюдательными пунктами, что не всегда возможно в стесненных условиях;

- линейные методы, при всей простоте их применения имеют два существенных недостатка: во-первых, деформацию возможно определить только в направлении профильной линии, применение площадных методов сталкивается с рядом затруднений; во-вторых, линейные измерения являются относительными, при них фиксируется только изменение длины интервала, что показано на рисунке 5.31, когда при линейных деформациях интервала могут быть 5 вариантов горизонтальных смещений реперов при деформациях сжатия, по аналогии могут быть 5 вариантов для деформаций растяжения, а также 2 варианта смещений реперов для случая отсутствия деформаций [141].

При обозначенных граничных условиях, при необходимости получения площадной картины распределения поля деформаций, необходимо комплексирование двух методов:

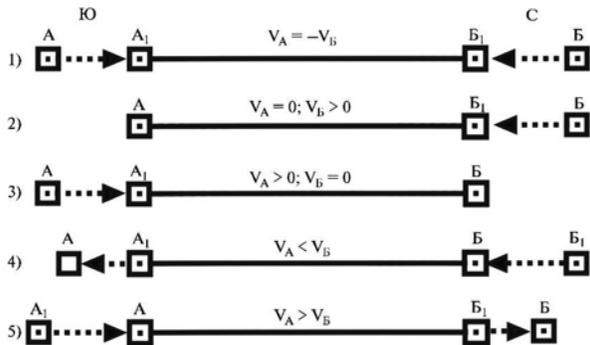


Рисунок 5.31. Пять вариантов относительного характера горизонтальных смещений реперов при абсолютном укорочении (сжатии) участка поверхности (по Кузьмину Ю.О., 2017)

— метода определения главных компонент плоского тензора деформаций по полным векторам смещений реперов наблюдательных пунктов (для случая координатных измерений);

— метода определения главных компонент плоского тензора деформаций по деформациям интервалов деформационной розетки (для случая линейных измерений).

При определении главных компонент плоского тензора деформаций по полным векторам смещений реперов наблюдательной станции используется расчетная схема, приведенная на рисунке 5.32.

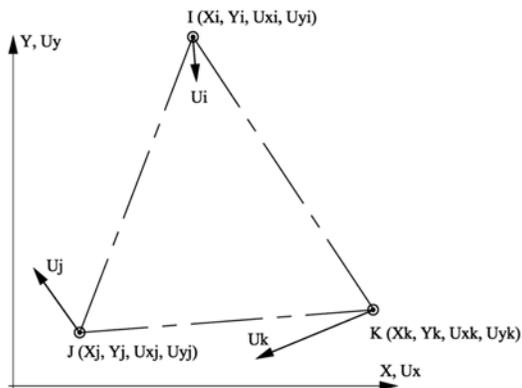


Рисунок 5.32. Расчетная схема к определению компонент тензора деформаций по векторам смещений наблюдательных пунктов

В данном случае известны координаты вершин I, J, K треугольного базового элемента наблюдательной станции в прямоугольной системе координат, а по результатам инструментальных наблюдений за смещениями реперов известны вектора перемещений вершин расчетного треугольника U_i , U_j и U_k и их проекции на оси U_x и U_y .

Приняв, что для всех вершин расчетного треугольника закон деформирования одинаков, можно записать [142]:

$$\left. \begin{aligned} U_{xi} &= e_{10} + e_{11} x_i + e_{12} y_i; \\ U_{yi} &= e_{20} + e_{21} x_i + e_{22} y_i; \\ U_{xj} &= e_{10} + e_{11} x_j + e_{12} y_j; \\ U_{yj} &= e_{20} + e_{21} x_j + e_{22} y_j; \\ U_{xk} &= e_{10} + e_{11} x_k + e_{12} y_k; \\ U_{yk} &= e_{20} + e_{21} x_k + e_{22} y_k. \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Система (3) состоит из шести линейных уравнений с шестью неизвестными коэффициентами модели перемещений, которые из решения системы определяются однозначно:

$$\left. \begin{aligned} e_{11} &= \frac{1}{2 \cdot S} ((U_{xi} - U_{xj}) \cdot (y_i - y_k) - (U_{xi} - U_{xk}) \cdot (y_i - y_j)); \\ e_{12} &= -\frac{1}{2 \cdot S} ((U_{xi} - U_{xj}) \cdot (x_i - x_k) - (U_{xi} - U_{xk}) \cdot (x_i - x_j)); \\ e_{21} &= \frac{1}{2 \cdot S} ((U_{yi} - U_{yj}) \cdot (y_i - y_k) - (U_{yi} - U_{yk}) \cdot (y_i - y_j)); \\ e_{22} &= -\frac{1}{2 \cdot S} ((U_{yi} - U_{yj}) \cdot (x_i - x_k) - (U_{yi} - U_{yk}) \cdot (x_i - x_j)); \\ e_{10} &= U_{xi} - e_{11} \cdot x_i - e_{12} \cdot y_i; \\ e_{20} &= U_{yi} - e_{21} \cdot x_i - e_{22} \cdot y_i. \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

где S — площадь треугольного базового элемента:

$$S = \frac{1}{2} ((x_i - x_j) \cdot (y_i - y_k) - (x_i - x_k) \cdot (y_i - y_j)). \quad (5.5)$$

Коэффициенты e_{10} и e_{20} , отвечающие за параллельный перенос треугольного базового элемента, зависят от выбранной системы координат и в расчете компонент тензора деформаций участия не принимают. Искомые неизвестные ϵ_x , ϵ_y и ϵ_{xy} определяются из решения по формулам:

$$\varepsilon_x = e_{11}; \varepsilon_y = e_{22}; \varepsilon_{xy} = \frac{e_{12} + e_{21}}{2} \quad (5.6)$$

Метод определения главных компонент плоского тензора деформаций по деформациям интервалов является наиболее универсальным, поскольку позволяет использовать для вычислений исходные данные, полученные как методами традиционной геодезии – изменения длин интервалов между реперами наблюдательной станции, так и методами спутниковой геодезии, когда в результате камеральной обработки полевых измерений становятся доступны пространственные координаты реперов наблюдательной станции и их изменения во времени. При определении главных компонент плоского тензора деформаций по полным векторам смещений реперов наблюдательной станции значительно сокращается объем промежуточных вычислений, поскольку нет необходимости определять длину интервалов между реперами и их изменения, вычислять направляющие синусов и косинусов интервалов, горизонтальные деформации.

Величины относительных удлинений ε_x и ε_y и сдвиговых деформаций ε_{xy} для базового элемента наблюдательной станции при определении компонент тензора деформаций по деформациям интервалов определяются путем решения системы из трех уравнений с тремя неизвестными [142]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{12} &= \cos^2(L_{12}) \varepsilon_x + \cos^2(M_{12}) \varepsilon_y + \cos(L_{12}) \cos(M_{12}) \varepsilon_{xy}; \\ \varepsilon_{13} &= \cos^2(L_{13}) \varepsilon_x + \cos^2(M_{13}) \varepsilon_y + \cos(L_{13}) \cos(M_{13}) \varepsilon_{xy}; \\ \varepsilon_{23} &= \cos^2(L_{23}) \varepsilon_x + \cos^2(M_{23}) \varepsilon_y + \cos(L_{23}) \cos(M_{23}) \varepsilon_{xy}, \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

где L_{ij} и M_{ij} – направляющие синусы и косинусы соответствующих сторон деформационной розетки;

ε_{12} , ε_{13} и ε_{23} – деформации интервалов деформационной розетки.

Аналитическое решение системы уравнений (5.7) позволяет определить искомые неизвестные ε_x , ε_y и ε_{xy} :

$$\varepsilon_x = N_x / N, \quad \varepsilon_y = N_y / N, \quad \varepsilon_{xy} = N_{xy} / N, \quad (5.8)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} N &= K_{01} + K_{02} + K_{03} - (K_{04} + K_{05} + K_{06}); \\ N_x &= K_{07} + K_{08} + K_{09} - (K_{10} + K_{11} + K_{12}); \\ N_y &= K_{13} + K_{14} + K_{15} - (K_{16} + K_{17} + K_{18}); \\ N_{xy} &= K_{19} + K_{20} + K_{21} - (K_{22} + K_{23} + K_{24}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
K_{01} &= \cos^2(L_{12}) \cos^2(M_{13}) \cos(L_{23}) \cos(M_{23}); \\
K_{02} &= \cos^2(L_{23}) \cos^2(M_{12}) \cos(L_{13}) \cos(M_{13}); \\
K_{03} &= \cos^2(L_{13}) \cos^2(M_{23}) \cos(L_{12}) \cos(M_{12}); \\
K_{04} &= \cos^2(L_{23}) \cos^2(M_{13}) \cos(L_{23}) \cos(M_{23}); \\
K_{05} &= \cos^2(L_{12}) \cos^2(M_{23}) \cos(L_{13}) \cos(M_{13}); \\
K_{06} &= \cos^2(L_{13}) \cos^2(M_{12}) \cos(L_{23}) \cos(M_{23}); \\
K_{07} &= \varepsilon_{12} \cos^2(M_{13}) \cos(L_{23}) \cos(M_{23}); \\
K_{08} &= \varepsilon_{23} \cos^2(M_{12}) \cos(L_{13}) \cos(M_{13}); \\
K_{09} &= \varepsilon_{13} \cos^2(M_{23}) \cos(L_{12}) \cos(M_{12}); \\
K_{10} &= \varepsilon_{23} \cos^2(M_{13}) \cos(L_{12}) \cos(M_{12}); \\
K_{11} &= \varepsilon_{12} \cos^2(M_{23}) \cos(L_{13}) \cos(M_{13}); \\
K_{12} &= \varepsilon_{13} \cos^2(M_{12}) \cos(L_{23}) \cos(M_{23}); \\
K_{13} &= \varepsilon_{13} \cos^2(L_{12}) \cos(L_{23}) \cos(M_{23}); \\
K_{14} &= \varepsilon_{12} \cos^2(L_{23}) \cos(L_{13}) \cos(M_{13}); \\
K_{15} &= \varepsilon_{23} \cos^2(L_{13}) \cos(L_{12}) \cos(M_{12}); \\
K_{16} &= \varepsilon_{13} \cos^2(L_{23}) \cos(L_{12}) \cos(M_{12}); \\
K_{17} &= \varepsilon_{23} \cos^2(L_{12}) \cos(L_{13}) \cos(M_{13}); \\
K_{18} &= \varepsilon_{12} \cos^2(L_{13}) \cos(L_{23}) \cos(M_{23}); \\
K_{19} &= \varepsilon_{23} \cos^2(L_{12}) \cos^2(M_{13}); \\
K_{20} &= \varepsilon_{13} \cos^2(L_{23}) \cos^2(M_{12}); \\
K_{21} &= \varepsilon_{12} \cos^2(L_{13}) \cos^2(M_{23}); \\
K_{22} &= \varepsilon_{12} \cos^2(L_{23}) \cos^2(M_{13}); \\
K_{23} &= \varepsilon_{13} \cos^2(L_{12}) \cos^2(M_{23}); \\
K_{24} &= \varepsilon_{23} \cos^2(L_{13}) \cos^2(M_{12}).
\end{aligned}$$

Таким образом, система приведенных выше выражений (5.3)–(5.8) позволяет на основе известных деформаций линейных интервалов и/или векторов перемещения реперов определить главные компоненты плоского тензора деформаций ε_{\max} и ε_{\min} , а также угол φ разворота их направления в принятой системе координат, необходимые для построения полярной эпюры деформаций, характеризующей тензор деформаций в горизонтальной плоскости.

Совместное решение задач метода определения главных компонент плоского тензора деформаций по полным векторам смещений реперов наблюдательных пунктов (для случая координатных

измерений) и метода определения главных компонент плоского тензора деформаций по деформациям интервалов деформационной розетки (для случая линейных измерений) позволяет произвести идентификацию и визуализацию полей деформаций, исходные данные для которых были получены с использованием результатов разнородных инструментальных измерений: координатных и линейных.

Таким образом, предложен методический подход и программная реализация для решения задачи идентификации и визуализации современных геодинамических движений, исходными данными для которой являются разнородные массивы результатов полевых геодезических и маркшейдерских мониторинговых измерений (Рисунок 5.33).



Рисунок 5.33. Методика идентификации и визуализации современных геодинамических движений

Визуализация полученных векторных и деформационных полей, их дивергенции и ротора поля позволяет идентифицировать современные геодинамические движения, выделять активные тектонические структуры массива горных пород, выявлять положение источников и стоков поля деформаций, параметры вращения блоковых структур.

ГЛАВА 6.

Выявление механизма воздействия современных геодинамических движений на целостность и устойчивость конструктивных элементов систем разработки

6.1. Разработка технологии снижения риска и уменьшения тяжести последствий техно-природных катастроф в сфере недропользования

Механизмы и виды разрушения горных пород при подземной и открытой разработке месторождений

Горное дело — сфера человеческой деятельности, связанная с извлечением полезных ископаемых из недр в условиях знакопеременного изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород. Изменение НДС может проявляться внезапными разрушениями горных конструкций, а также землетрясениями.

Объектом исследования является изменение напряженного состояния массива горных пород на объектах недропользования в основных горнодобывающих странах мира.

Прогноз места и времени проявления горного давления в настоящее время является одной из самых актуальных задач. Ежегодный рост объемов применения профилактических мер при практически неизменном количестве динамических проявлений горного давления и возрастании относительного количества горных ударов свидетельствует о низкой эффективности традиционных мер предупреждения горных ударов, что обуславливает необходимость поиска и разработки новых способов прогноза и предупреждения удароопасности.

Анализ опыта ведения горных работ показал, что тектонические нарушения, как правило, являются концентраторами напряжений, вносящими значительную неоднородность в поле напряжений участка массива, что зачастую приводит к возникновению аварийных ситуаций при приближении выработок и очистных работ к тектоническим нарушениям.

В подготовке материалов принимали участие д.т.н. Зотеев О.В., к.т.н. Авдеев А.Н., к.т.н. Сентябов С.В., н.с. Селин К.В., м.н.с. Ушаков Е.М. инженер Свещинская Н.А.

Горные породы по своим прочностным характеристикам делятся на несколько типов:

- скальные породы, обладающие жёсткими структурными связями;
- дисперсные породы с физическими, физико-химическими и механическими структурными связями, которые подразделяются на связные и несвязные (сыпучие);
- мерзлые породы, обладающие, наряду со структурными связями талых пород, криогенными связями (за счет льда).

По типу структурных связей мерзлые породы подразделяются на следующие подклассы

- скальных мерзлых пород;
- дисперсных мерзлых пород;
- ледяных пород (породы только с криогенными связями).

В настоящей работе рассматриваются лишь массивы скальных горных пород, разрушение которых представляет собой сложный процесс, характер развития которого зависит от величины и скорости приложения нагрузки, напряженного состояния объекта, его прочности и структурных свойств.

В качестве основных механизмов разрушения выделяют

- разрушение в результате превышения действующими сжимающими силами прочностных характеристик массива пород, сопровождающееся образованием свежих трещин скола;
- разрушение в результате действия растягивающих напряжений с образованием трещин отрыва;
- разрушения по природным плоскостям ослабления.

В отечественной практике оценка прочности массива в области сжимающих напряжений ведется на основе теории Кулона — Мора и описывается уравнением (6.1):

$$\sigma_1 \leq \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \sigma_{\text{ск}} + \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (6.1)$$

где σ_1 и σ_3 — максимальное и минимальное сжимающие напряжения (сжимающие напряжения считаются положительными);

C и φ — соответственно сцепление в массиве и угол внутреннего трения массива;

$\sigma_{\text{ск}}$ — прочность массива на одноосное сжатие.

Возможность разрушения массива по естественной трещине также определяется его напряженным состоянием (6.2) [143]:

$$|\sin(\varphi' + 2\alpha)| \leq \frac{2C' + tg \varphi' (\sigma_1 + \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3) \sqrt{1 + tg^2 \varphi'}} = B \quad (6.2)$$

где α — угол между максимальным сжимающим напряжением σ_1 и плоскостью трещины;

C' и φ' — сцепление и угол трения по трещине.

Разрушения по трещине не может произойти, если правая часть неравенства (6.2) больше единицы. Если же правая часть (6.2) меньше единицы, то начинает проявляться векторность прочностных свойств массива, т.е. сдвиг по трещине возможен только при выполнении дополнительного условия (6.3):

$$\arcsin B - \varphi' \leq 2\alpha \leq 180^\circ - \arcsin B - \varphi'. \quad (6.3)$$

Критерий разрушения массива в области растягивающих напряжений определяется, как правило, теорией Галилея:

$$|\sigma_3| \geq [\sigma_p], \quad (6.4)$$

где σ_p — прочность массива на одноосное растяжение.

Теория предельных деформаций (гипотеза Мариотта) используется достаточно редко, в основном на угольных и соляных месторождениях (6.5):

$$|\varepsilon_3| \geq [\varepsilon_{np}], \quad (6.5)$$

где ε_3 — максимальная деформация растяжения,

ε_{np} — предельно допустимая деформация, характерная для рассматриваемого материала.

Следует отметить, что из-за наличия в массиве большого количества разноориентированных трещин различных размеров, его прочность на растяжение пренебрежимо мала и редко превышает 1–2 МПа.

Реализация того или иного механизма разрушения массива определяется рядом факторов, которые делятся на две группы: природные (неуправляемые) и техногенные (управляемые).

К природным факторам относятся:

- пространственная ориентировка крупных разрывных нарушений;

- густота, протяженность и состояние основных систем трещин;

- физические характеристики горных пород;

- прочностные характеристики горных пород;

- реологические характеристики горных пород (для соляных и соледержащих толщ);

- прочностные характеристики контактов пород и других поверхностей ослаблений;

- деформационные характеристики массива горных пород, в т.ч. характеристики деформирования за пределами прочности и упругости;
- температурный режим, проявляющийся в оттаивании – замерзании горных пород;
- уровень подземных вод, водоносных горизонтов и водных объектов на земной поверхности;
- обводненность массива;
- наличие водорастворимых пород, карстов и иных природных полостей;
- газоносность массива;
- параметры природного поля напряжений;
- сейсмическая активность региона;
- параметры современных геодинамических движений;
- склонность пород к выветриванию;
- иные факторы, связанные в т. ч. с влиянием астрономических показателей.

Дополнительно к природным факторам при проходке выработок в массивах дисперсных горных пород (в основном — вскрывающие выработки, проходимые с дневной поверхности) учитываются следующие характеристики:

- набухание, снижение прочности и развитие локальных деформаций в подземных выработках или на откосах уступов карьеров и ярусов отвалов;
- возможность развития процессов суффозии, растворения, выветривания;
- водонасыщенность пород, наличие водосборных площадей с затруднённой разгрузкой;
- количество атмосферных осадков, характер дождей, мощность снегового покрова и продолжительность его таяния;
- температурный режим района, глубина сезонного промерзания и оттаивания пород;
- гранулометрический и минеральный состав пород;
- число пластичности и показатель текучести (для глинистых пород);
- естественная влажность;
- относительная деформация просадочности (для глинистых пород);
- коэффициенты пористости и водонасыщения (для крупнообломочных грунтов и песков);

- относительное содержание органического вещества;
- компрессионные свойства пород;
- температурно-прочностные свойства горных пород и контактов, криогенная структура, льдистость.

К техногенным факторам относятся:

- система разработки;
- форма и размеры выработок;
- глубина заложения подземных выработок;
- расстояние между выработками;
- назначение и срок службы выработок;
- ориентировка систем трещин относительно направления оси выработок;
- очередность и порядок отработки запасов;
- влияние очистных работ на устойчивость выработок;
- способ проходки и поддержания подземных выработок;
- характеристики крепи;
- возможность проявления газо-, геодинамических явлений в ходе отработки месторождения.

Условия разрушения массива при открытой геотехнологии

Разрушения массива пород при открытой геотехнологии реализуется в основном на двух масштабных уровнях: уступ (обрушения происходят часто и повсеместно) и борт или участок борта (происходят гораздо реже).

Поскольку карьер имеет контур, не замкнутый по верхней границе, при открытых горных выработках создаются наиболее благоприятные условия для реализации нарушения условия специального предельного равновесия. Поэтому наиболее распространенной моделью скального массива при открытых работах является модель массива, расчлененного поверхностями ослабления различного порядка на изотропные блоки.

Оценка устойчивости уступов и бортов в соответствии с положениями нормативной литературы производится, как правило, по схеме весомого клина, т.е. без учета величины первоначальных горизонтальных напряжений. Тем не менее в практике встречаются случаи, когда учет этих напряжений обязателен.

Одним из таких вариантов является возможность бортового отпора и раскрытия существующих трещин (Рисунок 6.1), что достаточно часто наблюдается в речных долинах, но иногда может наблюдаться

и на вытянутых карьерах при наличии крутопадающей протяженной трещиноватости [144].

Также весьма своеобразным проявлением природных напряжений является образование так называемых оползней «отседания», широко распространенных по Ангаро-Илимскому железорудному бассейну, которые формируются по берегам всех мелких и крупных рек и ручьев, русло которых врезано в породы верхоленской свиты. Основной причиной развития этих деформаций является процесс разгрузки напряжений в массиве, состоящем из пород с резко отличающимися деформационными свойствами: аномально низкий модуль деформации пород верхоленской свиты (150 МПа) по сравнению с известняками и песчаниками усть-кутской свиты (около 6 000 МПа). Вследствие такого различия деформационных характеристик упругие деформации разгрузки, возникающие при вскрытии верхоленских пород, приводили к образованию трещин растяжения в вышележащих, более жестких породах усть-кутской свиты.

Процесс развития деформаций идентичен для всех оползней: образование трещин (рвов отседания) с последующим смещением отколовшихся блоков в сторону водотока по практически горизонтальному контакту за счет разгрузки горизонтальных напряжений. Характерными чертами подобных оползней являются большая ширина зоны заколов и крайне низкая скорость смещения отколовшихся блоков в сторону реки 5–10 мм/год при горизонтальных контактах до 0,10 м/год при наклоне слоистости в сторону реки 50 и более.

Техноприродная катастрофа, вызванная именно таким геологическим строением массива и высоким уровнем горизонтальных напряжений, реализовалась на Западном отроге, когда дно карьера



Рисунок 6.1. Участок деформаций на борту карьера

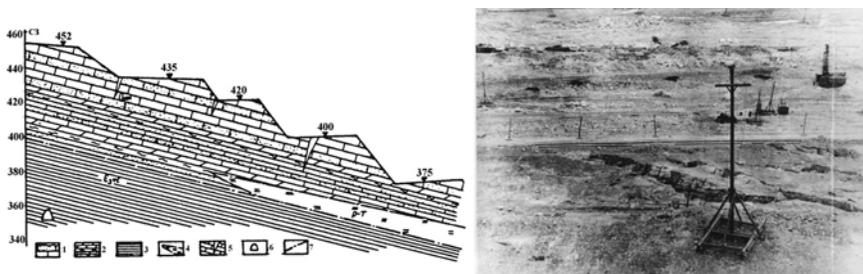


Рисунок 6.2. Схема образования оползня по борту карьера на участке Западного отрога

Примечание. 1 – песчаники и известняки усть-кутской свиты; 2 – прослои выветрелых алевро-песчаников; 3 – аргиллиты и алевролиты верхноленской свиты; 4 – межпластовая зона скарнов; 5 – трещины отрыва; 6 – гидротехнический тоннель; 7 – тектонические нарушения

вскрыло породы верхноленской свиты (Рисунок 6.2). С момента появления первых трещин на Западном отроге прошло уже 46 лет, развитие деформаций на данном участке продолжается и в настоящее время, но область развития трещин отрыва ограничивается, как и в первые годы, комплексом пород усть-кутской свиты.

Дополнительными факторами, способствующими развитию деформаций на данном участке карьера, являются:

- падение слоистости обеих свит в сторону выемки под углом $\sigma=200$ (по данным детальной разведки падение слоистости было горизонтальным);

- низкие прочностные характеристики контакта скарн – известняк (сцепление по контакту составило $C'=0,009$ МПа, угол трения по контакту $\varphi'=16,60$);

- технологические взрывы вблизи предельного контура, проводившиеся без предварительного образования экранирующих щелей и приводившие к нарушению сплошности контактов разномодульных пород;

- трещинное давление воды, скапливающейся на водоупоре при стоке атмосферных осадков по склону.

Положительное воздействие действующих напряжений проявляется в том, что за счет тангенциальных напряжений на контуре карьера увеличиваются силы трения по боковым поверхностям потенциальной призмы обрушения, что приводит к увеличению запаса устойчивости бортов (но не уступов) и может быть использовано при обосновании углов погашения уступов.

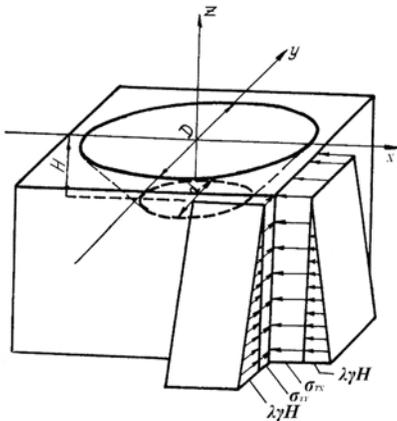


Рисунок 6.3. Схема к расчету напряжений в бортах карьера округлой формы

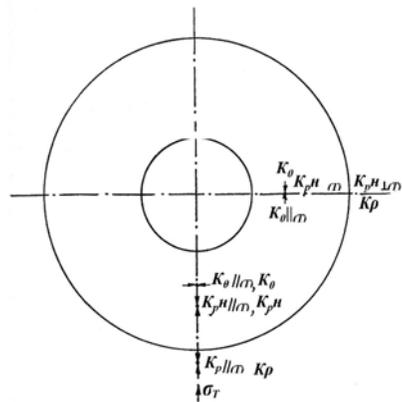


Рисунок 6.4. Схема концентрации напряжений на плане карьера

Гравитационные напряжения создают на контуре карьера (Рисунки 6.3, 6.4) незначительные по величине тангенциальные напряжения с коэффициентами концентрации K_{θ} практически независимо от угла наклона борта карьера α_B . Горизонтальные (тектонические) напряжения в зоне максимума имеют значительные по величине коэффициенты концентрации $K_{\theta||cn}$, которые растут с увеличением угла погашения борта и с приближением ко дну карьера [145].

В зоне минимума ($K_{\theta} \perp (T)$) сжимающие σ_{Tx} вызывают растяжения значительной величины.

На рисунках 6.3. и 6.4 использованы следующие обозначения коэффициентов концентрации:

— от вертикальных напряжений γ_H , определяемых весом налегающей толщи:

K_{θ} — тангенциальных напряжений;

K_{p1} , K_{rn} — радиальных и радиальных наклонных напряжений в борту.

От горизонтальных тектонических напряжений σ_T :

$K_{\theta||cn}$ — тангенциальных в направлении, параллельном действию σ_T ;

$K_{\theta \perp cn}$ — тангенциальных в направлении, перпендикулярном действию σ_T ;

$K_{pH} \parallel (T)$ — радиальных наклонных в направлении, параллельном действию σ_r ;

$K_{pH} \perp (T)$ — радиальных наклонных в направлении, перпендикулярном действию σ_r ;

$K_p \parallel (T)$ — радиальных напряжений в направлении, параллельном действию σ_r , на поверхности;

$K_p \perp (T)$ — радиальных напряжений в направлении, перпендикулярном действию σ_r , на поверхности.

Если на месторождении действуют одновременно вертикальные напряжения γH и горизонтальные тектонические напряжения σ_{TX} , σ_{TY} , то для определения напряжений в интересующей точке необходимо воспользоваться методом суперпозиции, соответственно, по линиям ОУ и ОХ (6.6–6.7):

$$\sigma_{\theta X} = \sigma_{TX} K_{\theta} \parallel (TX) + \sigma_{TY} K_{\theta} \perp (TY) + \gamma H K_{\theta} \quad (6.6)$$

$$\sigma_{\theta Y} = \sigma_{TX} K_{\theta} \perp (TX) + \sigma_{TY} K_{\theta} \parallel (TY) + \gamma H K_{\theta} \quad (6.7)$$

Коэффициенты концентрации от $\sigma_T K_p H \parallel (T)$ тем больше, чем больше угол борта карьера. Суммарные напряжения можно найти по формулам, соответственно по линиям ОХ и ОУ (6.8–6.9):

$$\sigma_{HX} = \sigma_{TX} K_{pH} \parallel (TX) + \sigma_{TY} K_{pH} \perp (TY) + \gamma H K_{pH} \quad (6.8)$$

$$\sigma_{HY} = \sigma_{TX} K_{pH} \perp (TX) + \sigma_{TY} K_{pH} \parallel (TY) + \gamma H K_{pH} \quad (6.9)$$

На поверхности в прибортовой зоне карьера значительных величин достигают $K_{\theta} \parallel (T)$, и тем больше, чем ближе к борту и больше α_b , а также K_p , но здесь большие значения соответствуют меньшим α_b .

Проведенный анализ коэффициентов концентрации показывает, что при действии только вертикальных напряжений γH как радиальных, так и тангенциальных сжимающие напряжения достигают своего максимума в придонной части борта круглого карьера и в основном тем больше, чем круче борт и глубже карьер. Величина радиального сжатия у поверхности при $H_k > 300$ м может быть более 15 МПа, а тангенциального более 3 МПа, где уровень первоначальных напряжений был порядка 2 МПа.

При наличии тектонической составляющей первоначальных напряжений происходит увеличение тангенциальных и радиальных напряжений.

При действии первоначальных гравитационно-тектонических напряжений в борту карьера величины σ_{θ} и σ_n у его дна практически не зависят от угла погашения борта. У поверхности величина σ_{θ}

в 2 раза меньше, чем у дна, при любых значениях σ_1 . Напряжение σ_n у поверхности уменьшается в 1,5–2,5 раза по мере увеличения угла погашения борта.

В результате анализа проведенных исследований лабораторией геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН на основе конечного элементного анализа можно заключить, что наличие тектонической составляющей первоначальных напряжений резко увеличивает величину тангенциальных и радиальных напряжений. Так, при моделировании карьера глубиной 500 м и добавления тектонической составляющей напряжений происходит смещение точки «равновесия» с глубины 100 м до 300 м, где происходит изменение максимальных сжимающих напряжений и их переверот таким образом, что напряжения в борту с углом наклона 45° имеют меньшую величину, чем с углом наклона 65° .

Радиальные напряжения, вызванные действием тектонических напряжений, по мере удаления от карьера стремятся к единице, в то время как напряжения, рассчитанные при нелинейном распределении напряжений с глубиной, достигнув максимума на расстоянии двух радиусов от центра карьера, стремятся обратно к нулю.

Радиальные напряжения, вызванные действием тектонической составляющей, практически в два раза превышают величины радиальных напряжений при нелинейном изменении напряжений с глубиной.

При нелинейном распределении напряжений с глубиной тангенциальные напряжения имеют максимальные значения на бровке борта карьера.

Тангенциальные напряжения, рассчитанные при нелинейном изменении напряжений с глубиной, на поверхности у откоса уступа карьера превышают значения напряжений, рассчитанных при действии только тектонической составляющей. Однако величина действия тектонических напряжений не меняется по мере удаления от карьера в отличие от величин тангенциальных напряжений, рассчитанных при нелинейном изменении напряжений с глубиной, которые стремятся к нулю [146].

Условия разрушения массива при подземной геотехнологии

Все конструктивные элементы подземных систем разработки имеют замкнутый контур, что предопределяет затрудненные условия для нарушения специального предельного равновесия. Поэтому

основной моделью массива скальных пород является модель сплошной среды.

Разрушение массива горных пород в окрестности подземных выработок также происходит на двух масштабных уровнях: на базе подземных горных выработок и на базе очистных выработок (камер и целиков, фронта подвигания очистных работ).

В подземных выработках обрушения развиваются по трем основным сценариям (Рисунок 6.5):

— нарушения устойчивости, практически не зависящие от величины действующих природных напряжений (вывалы породных блоков и отслоения пород по поверхностям ослабления, образование куполов обрушения при хаотической трещиноватости);

— хрупкое или близкое к нему разрушение пород на контуре выработок в результате концентрации напряжений, в т. ч. стреляния пород;

— большие деформации выработок по всему контуру выработок под воздействием высокого уровня напряжений, характерные для пород, склонных к пластическим деформациям (соляные и соледержащие толщи, частично угольные месторождения).

Вывалы породных блоков по природным поверхностям ослабления, а также образование куполов обрушения при интенсивной хаотической трещиноватости и хрупкое или близкое к нему разрушение пород на контуре выработок наиболее характерны для скальных массивов на рудных месторождениях.

Отслоения пород по поверхностям ослабления за счет изгиба слоев широко встречаются как на рудных, так и на угольных и соляных месторождениях.

Разрушение выработок вследствие больших деформаций по части или всему контуру выработок наиболее характерно для угольных и соляных месторождений.

В приконтурной части капитальных горных выработок происходит концентрация природных напряжений в соответствии с зависимостями (6.10–6.12):

— в стволах

$$\sigma_{\theta\max} = 3\sigma_3^{\Pi} - \sigma_1^{\Pi}; \quad (6.10)$$

— в горизонтальных выработках, пройденных по оси X

$$\sigma_{\theta\max} = 3\sigma_y^{\Pi} - \sigma_z^{\Pi}; \quad (6.11)$$

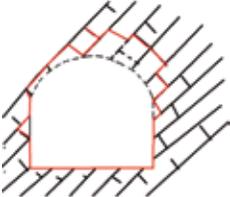
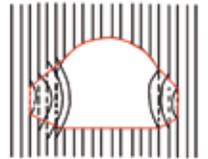
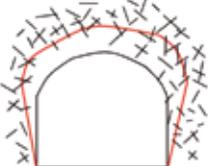
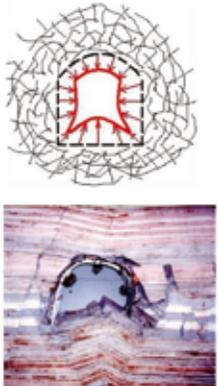
1		<p>вывалы породных блоков по природным поверхностям ослабления</p>
2		<p>отслоения пород по поверхностям ослабления за счет изгиба слоев</p>
3		<p>образование куполов обрушения при хаотической трещиноватости</p>
4		<p>хрупкое или близкое к нему разрушение пород на контуре выработок в результате концентрации напряжений, в т. ч. стреляния пород</p>
5		<p>большие деформации выработок по части или всему контуру</p>

Рисунок 6.5. Наиболее вероятные механизмы разрушения массива в окрестности выработок

– пройденных по оси У

$$\sigma_{\Theta(v)} = 3 \sigma_x^{\Pi} - \sigma_z^{\Pi}. \quad (6.12)$$

Анализ большого числа результатов измерения напряжений на месторождениях мира показывает, что отношение $\sigma_3^{\Pi}: \sigma_1^{\Pi}; \sigma_y^{\Pi}: \sigma_z^{\Pi}; \sigma_x^{\Pi}: \sigma_z^{\Pi}$ изменяется от 1 до 1.5÷2.0 и более. Следовательно, среднее напряжение σ_{cp} ($\sigma_{cp} = \sigma_{min} + \sigma_{max}/2$) может изменяться от 1.0 до 1.5, т.е. в среднем можно принять $\sigma_{max}^{\Pi} = 1,25 \sigma_{cp}$, а $\sigma_{min}^{\Pi} = 0,8 \sigma_{cp}$.

С учетом этого формируется (6.13):

$$\frac{\sigma_{\Theta_{max}}}{\sigma_{\Theta_{max}}^{\Pi}} = \frac{1,25\sigma_{cp} \cdot 3 - 0,8\sigma_{cp}}{1,25\sigma_{cp}} = 2,4 \quad (6.13)$$

откуда получаем (6.14):

$$\sigma_{\Theta_{max}} = \sigma_{max} \cdot 2,4 \quad (6.14)$$

Этот же коэффициент концентрации следует использовать при прогнозировании тангенциальных напряжений в бортах карьеров.

В конструктивных элементах систем разработки концентрация природных напряжений в том участке массива горных пород, где располагаются сближенные подготовительно-нарезные выработки, может достигать 2–4, т.е. в среднем 3,0. С учетом этого обстоятельства в приконтурной части подготовительно-нарезных выработок напряжения могут достигать (6.15):

$$\sigma_{\Theta_{max}} = \sigma_{max} \cdot (2,4 \div 3) \quad (6.15)$$

При разрушении массива на базе обрабатываемых камер основными причинами разрушения является формирование в приконтурном массиве камер областей с повышенными или пониженными (растягивающими) напряжениями. В соответствии с классическими представлениями в стенках высоких камер могут сформироваться растягивающие вертикальные напряжения, параллельные стенкам, в результате чего камера приобретает бочкообразную форму. В кровле и днище формируется область высоких сжимающих напряжений, в результате может начаться куполение кровли и разрушение выработок днища. При низких широких камерах в стенках формируются высокие сжимающие напряжения, а в кровле – могут сформироваться области растягивающих напряжений (Рисунок 6.6).

Формы разрушения целиков различного типа также определяются величиной и ориентировкой действующих в них напряжений (Рисунок 6.7). Основными причинами разрушения целиков является

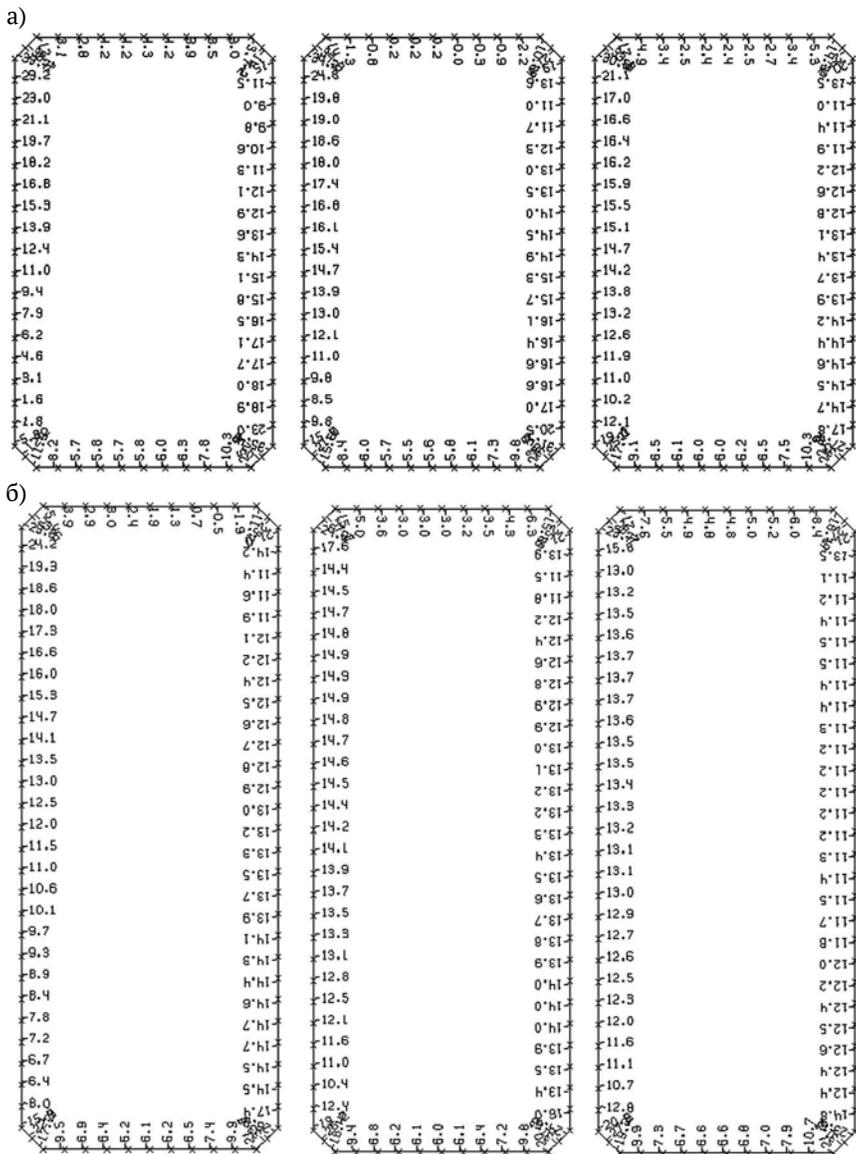


Рисунок 6.6. Изменения напряжений на контуре камер с пролетом 12 м при МКЦ 6 м после отработки 4-го (а) и 6-го (б) слоев

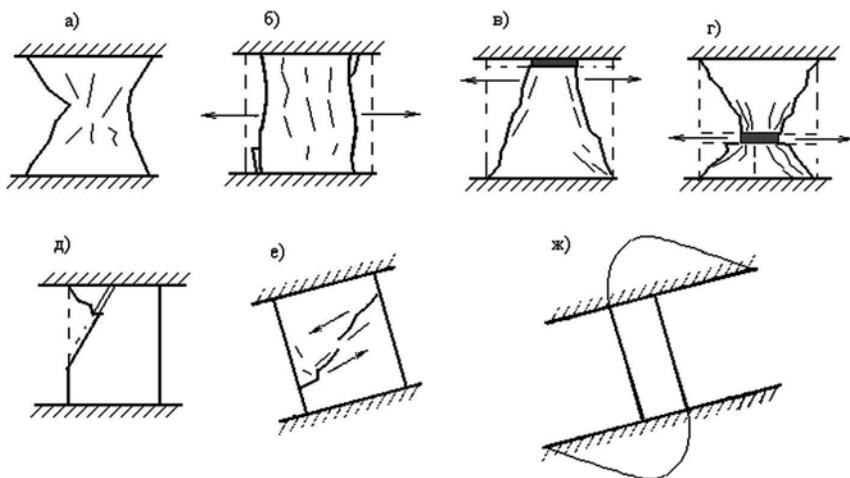


Рисунок 6.7. Формы разрушения целиков

Примечание. а) – при полном сцеплении с вмещающими породами; б) – без сцепления и малом трении с вмещающими породами; в) и г) – при наличии пластичной прослойки, соответственно, на контакте и в рудном теле; д) – по тектоническому нарушению; е) – в виде среза; ж) – при слабых вмещающих породах

превышение сжимающими напряжениями предела прочности массива на сжатие, хотя в отдельных случаях возможно разрушение по крупным трещинам, пересекающим целик, или выдавливание слабого слоя основания.

При этом разрушение целиков за счет сжатия может происходить не только под действием вертикальных напряжений, но и под действием горизонтальных напряжений, зачастую превышающих на рудных месторождениях вертикальные нагрузки.

Выводы по разделу 6.1

1. При открытой геотехнологии основным механизмом разрушения являются сдвиг по трещине и разрушение трещиноватого массива под воздействием силы тяжести. Величина горизонтальных напряжений играет подчиненную роль, и их проявление возможно лишь в специфических случаях.

2. При подземной разработке роль горизонтальных напряжений существенно выше, а разрушение стенок камер и целиков происходит

наиболее часто за счет превышения напряжениями сжатия предела прочности среды, при этом разрушение начинается с приконтурной части массива. В редких случаях на удароопасных месторождениях происходит накопление упругой энергии в большой области, зачастую «отжатой» от контура выработок, что реализуется потом разрушениями с динамическим эффектом.

Разрушения за счет формирования областей растягивающих напряжений происходят гораздо реже, хотя возможны при неправильном учете величины и ориентировки природных напряжений.

3. Таким образом, изучение и учет реальной структуры поля природных напряжений и собственно величины первоначальных напряжений при проектировании отработки месторождений подземным способом является элементом выбора и обоснования параметров проектируемой технологии.

6.2. Технология снижения риска и уменьшения тяжести последствий техно-природных катастроф

Структура природного поля напряжений

Результат многолетних измерений (Таблица 6.1) позволяют утверждать, что природное напряженное состояние Земной коры формируется в результате наложения полей напряжений, обусловленных гравитационными и тектоническими силами Земли, а также переменными компонентами различного происхождения и может быть представлено в следующем виде (6.16) [147, 148]:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \gamma H + \sigma_{zT} + \sigma_{zП} \\ \sigma_x &= \lambda \gamma H + \sigma_{xT} + \sigma_{xП} \\ \sigma_y &= \lambda \gamma H + \sigma_{yT} + \sigma_{yП}\end{aligned}\tag{6.16}$$

где σ_z — действующее вертикальное напряжение (наиболее часто совпадает с одним из главных нормальных напряжений);

σ_x и σ_y — горизонтальные главные нормальные напряжения;

γH — вертикальное напряжение, создаваемое весом налегающих пород;

λ — коэффициент бокового распора, определяемый деформационными характеристиками массива пород;

$\sigma_{ЗТ}$, $\sigma_{ХТ}$ и $\sigma_{УТ}$ — компоненты тектонических напряжений, остающиеся неизменными многие десятилетия;

$\sigma_{ЗП}$, $\sigma_{ХП}$ и $\sigma_{УП}$ — изменяющиеся компоненты напряжений.

Переменная составляющая поля напряжений может определяться многими причинами: притяжением Луны и Солнца (приливы и отливы), тектоникой плит и, в частности, сейсмической активностью регионов, мелкомасштабными подвижками по тектоническим разломам и т.д. Естественно, что длительность, величина и повторяемость этих компонент весьма различна. Главное, что их объединяет, — это то, что они, накладываясь на статическое поле напряжений, могут создавать предпосылки для аварий, а в сочетании с техногенными факторами — и для катастроф.

Прогноз изменения природного поля напряжений во времени

Предыдущими исследованиями установлено, что в приповерхностной части земной коры происходят знакопеременные подвижки, локализующиеся, как правило, в зонах крупных тектонических нарушений. Продолжительность этих подвижек невелика и не превышает 2–3 месяцев. Более продолжительные изменения, длящиеся десятилетиями, определяются космической активностью, так называемой «астрофизической», составляющей $\sigma_{АФ}$ [149].

Переменная «астрофизическая» составляющая является величиной переменной, и ее необходимо непрерывно отслеживать. Измерение можно проводить как на поверхности, так и в подземных условиях, измеряя деформацию базисов различной длины.

В настоящее время к таким методам относятся измерения при использовании

- спутниковых навигационных систем GPSи ГЛОНАСС;
- лазерных дальномеров (ЛД);

Примечания к таблице 6.1:

Щ — данные полученные при щелевой разгрузке массива горных пород;

ЧБ — данные, полученные при частичной разгрузке на большой базе;

ОГЗ — данные, полученные при обратной геомеханической задаче;

П — данные, полученные при полной разгрузке;

Ч — данные, полученные при частичной разгрузке массива горных пород;

ЭА — данные, полученные экспериментально-аналитическим методом;

* — результаты обработаны ИГД УрО РАН;

** — определены направления и величины главных напряжений, действующих в горизонтальной плоскости.

Таблица 6.1
Результаты определения первоначальных напряжений на месторождениях полезных ископаемых России и Казахстана

№	Город, Месторождение	Дата изменения года	Н, м	Метод измерения	Азимут, град		Первоначальные напряжения МПа			
					Простирание рудного тела	Действия $\sigma_{пк}$	горизонтальные		вертикальные	
							$\sigma_{пк}$	$\sigma_{пг}$	$\sigma_{пз}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	Североуральск									
	Североуральское I	1997	490	Щ	180	90**	-54,5	-33,0	-31,8	
2	Североуральское III	1981	800	Щ	180	90	-58,0	-38,0	-29,0	
		1968	П	ЭА		6**	-9,6	-1,5	-	
		1968	300*	Ч				-10,3	-7,9±2,7	-7,0
		1968	380	Ч	180	123±9**		-13,0	-8,0±4,4	-11,3
3	Красноуральск Северо-Песчанское, I	1982	430	П		90	-16,3	-12,5	-15,5	
		1984	500	Щ		90	-21,1±2,1	-17,6±8,3	-	
		1988	540	Щ		90	-19,0±1,5	-14,5±0,8	-15±0,6	
3	Красноуральск Новопесчанское, I	1975	370	П	36	146**	-14,0±2,5	-6,4±2,7	-	
4	Красноуральск, I		800	Щ		137**	-52,0	-30,0	-24,0	
5	Безрезники, V									
	БКРУ-2		400	П	0	135	-24,1	-12,9	-17,9	
	БКРУ-3		400	П	0	107	-20,6	-13,2	-17,2	

Таблица 6.1, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	Соликамск, V СКРУ-1		300	П	0	75	-14,5	-9,2	-11,2
7	Сараны Сарановское, I	1998	300	Щ	158	68**	-16,6±1,5	-9,6±1,2	-7,8
8	Кушва Валуевское, I	1982	125*	Ч	40	130	-5,6±2,4	-2,9±4,4	-4,7±2,2
		1983	380	Щ		145	-26,1±4,0	21,1±8,6	-22,2±3,2
9	Кушва Горноблагодатское I	1968	П	ЭА		34**	-17,9	-5,3	-
		1969	170*	Ч		188	-17,7±3,4	14,0±3,4	-
		1980	260	Щ	188	188	-25,1	-18,7	-11,6
		1980	600	Щ		155	-40,5	-21,3	-21,1
10	Нижний Тагил Лебяжинское	1988	760	Щ		146*	-51	-17	-22,0
		1970	300	Ч	164	164	-15,5	-7,9	6,9
		1983	510	Щ	164	166**	-22,3±0,9	-19,3±0,9	21,1±8,6
11	Нижний Тагил Высокогорское		П	ЭА		156**	-12,3	-6,7	-
		1983	510	Щ	144	155	-41,0±13,0	-37,0±7,0	-32,0±5,5
		1983	590	Щ		155	-43,6±13,3	39,4±7,3	34,2±5,3
12	Нижний Тагил Естюнинское	1977	180	Ч		130	-25,4±4,6	-24,2±0,6	-20,9
		1980	240	Щ	120	120**	-37,0±7,0	-28,5±7,0	-34,3±4,1
		1990	360	Щ		124	-77,0±8,9	-55,0±3,4	57,0±2,1
		1994	420	Щ		124	-106	-84	-65
		2005	460	Щ		140	-115	-90	-73

Таблица 6.1, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	Кизил, Кизильское		П				-0,035Н	-0,022Н	-0,26Н
14	Березовский Берёзовское, VII	1976	212	Ч	180	90	-13,6	-10,4	-8,5
		1980	262	Ч		90	-17,0	-11,0	-10,5
		1980	312	Ч,Щ		90	-17,9	-10,5	-13,0
		1980	462	Ч,Щ		90	-22,0	-17,0	-19,0
		1980	512	Ч,Щ		90	-25,3	-18,9	-15,7
	Берёзовское I	1997	712	Щ		112**	-22,0	-18,0	-20,0
15	Вишневогорск, Вишневогорское III		320	Щ	40	40	-20	-13	-9
16	Сатка, Саткинское I		130	Щ	65-80	70	-22,3±2,39	-19,8±3,8	-14,2±1,54
			150	Щ,Ч			-(10±0,29Н)	-(10±0,29Н)	-(10±0,29Н)
			240	Щ,Ч			-(10±0,29Н)	-(10±0,29Н)	-(10±0,29Н)
		2007	240	Щ			-28,5	-18,3	-
		2019	240	Щ			-40,7	-30,2	-14,9
17	Бакал, Ново- Бакальское	1982	150	Щ	45	45	-14,0	-11,0	-4,0
18	Бакал, Северо- Шиханское	1982	180	Щ	45	45	-15,0	-12,0	-4,4
		1988	180	Щ	45	45	-18,0	-12,0	-
		2018	290	Щ	45	45	-9,8±1,1	-9,3±0,3	-15,4±1,3

Таблица 6.1, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
19	Учалы, Узельгинское III	1994	550	Щ	0	96**	-38,5	-37,4	-26,5
			550	Щ			-30,3	-26,8	-23,6
			550	Щ			-36,4	-24,4	-20,6
			640	Щ			-30,5±1,5	-25,9±1,1	-18,5±1,5
20	Пласт, Качкарское Шх. №16, I, П Шх. Центр, I, П Шх.Фрунзе, V	1968	П	ЭА	260	54**	-34,0	-8,0	-
			192	Ч	260	5	-13,7	-6,0	-3,7
			295	Ч	275	0	-31,3	-25,2	-9,5
			500	Ч	250	170	-47,0	-22,0	-15,0
			200 ÷600	Ч	250	160	-0,058H	-0,033H	-0,03H
			512	Щ	275	0	-47,0	-22,0	-10,0
21	Миндяк, Миндякское, I и II	1968	700	Щ	275	0	-64,0	-41,0	-33,0
			250*	Ч	220	125	-6,4	6,2	6,0
22	Рудный, Соколовское I	1986	250	Ч	180	90	-10	-4,0	-7,0
			440	Щ			-19,9±2,0	-19,6±1,0	-14,0
			510	Щ			-24,0±4,6	-20,2±3,1	14,0
			580	Щ			-20,9±3,5	-24,6±3,9	15,5

Таблица 6.1, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
23	Гай, Гайское, VI		170	П	180	-	-7,0±10,0	-7,0±10,0	-6,0
			270	П		-	-12,0	-12,0	-11,5
			320	П		-	-16,5	-16,5	-14,0
			460	П		-	-18,5±22,0	-18,5±22,0	-18
			830	Щ		101±6**	-39,9±4,5	18,7±1,2	21,8
24	Гайское, I	2004	910	Щ	101±6**	-	-41,6	-19,8	-25,0
			1070	Щ	-	-48,7	-32,0	-33,3	
			1390	Щ	-	-67,3	-55,2	-37,0	
			530	ЧБ, Щ	140	-18,6	-18,0	-13,3	
25	Хромтау, Алмаз-Жемчужина, I	1979	500	ЧБ	0	50**	-20,9	-13,2	-13,2
			540	Щ			-45,2±8,0	-41,8±10	-20,0±45
26	Таштагол	1983	750	Щ		52	-52,5±7,5	-45,2±3,6	-24,0±3,3
			890	П		150**	-73±10	-44±8	-35±5
27	п. Яковлево, Яковлевский подзёмный рудник	2007	600	Щ	320	15 СВ-205 ЮЗ	-21,7	-10,5	-10,4
28	Ирокинда, Патамское нагорье, мерзлый массив	2004	200	Щ	СЗ, СВ, субширотное		-9,3±1,4	-8,6±1,8	-7,4±0,9

Таблица 6.1, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
29	Ирокинда, переходные участки мерзлых пород в талые	2007	250	Щ	СЗ, СВ, субширотное		-5,9±0,4	-10,8±1,2	-6,6±0,5
30	Ирокинда, талые породы	2017	250	Щ	СЗ, СВ, субширотное		-9,4±3,0	-13,5±3,0	-6,7±2,3
31	Ирокинда, талые породы	2017	410	Щ	СЗ, СВ, субширотное		-17,5±5,1	-27,3±8,8	-11,6±3,7
32	Кедровское месторождение, Патомское нагорье, мерзлый массив	2015	300	Щ	субмеридиональные		-11,6±3,8	-4,9±1,0	-8,3±2,1
33	Кедровское месторождение, Патомское нагорье, талые породы	2015	400	Щ	Субмеридиональное		-15,3±0,9	-19,9±4,3	-10,3±1,1
34	Майское месторождение, Чукотская складчатая область, мерзлый массив	2008	120	Щ	355–357°		-3,7±0,4	-4,3±0,5	-4,3±0,3
	Майское месторождение, Чукотская складчатая область, талые, ниже подошвы горы	2020	500				-24,2±2,0	17,5±1,6	12,7±1,0

Таблица 6.1, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
35	Карльвеем, Чу-котская складчатая область, Ангийское нагорье, талые породы	2012	510	Щ	СЗ, СВ		-27,7±4,4	-22,5±4,3	-15,2±1,6
36	Коневинское месторождение, Саяны, мерзлые породы, выше подошвы горы	2014	200	Щ	СЗ		-6.6±1,9	-4.3±0,5	-5.4±0,6
37	Коневинское месторождение, граница подошвы горы, переходные участки мерзлых пород в талые	2011	335	Щ	СЗ		-12.0±0.7	-8.9±1.1	-9.0±2.1
38	Коневинское месторождение, граница подошвы горы, переходные участки мерзлых пород в талые	2014	300	Щ	СЗ		-11.9±2.0	-12.8±1.8	-8.1±0.7
39	Зун-Холба, Саяны, выше подошвы горы, мерзлые породы	2003	50	Щ	СЗ 310-330°		-3,5±1,5	-3,3±1,1	-1,6±1,3

Таблица 6.1, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	Зун-Холба, выше подошвы горы, тальные породы	2003	380	Щ	СЗ 310-330°		-14,6±5,0	16,6±1,8	-11±2,1
41	Зун-Холба, выше подошвы горы	2003	530	Щ	СЗ 310-330°		-30,7±6,5	-18,9±4,0	-14,2±3,7
42	Зун-Холба, ниже подошвы горы	2017	940	Щ	СЗ 310-330°		-26,0±3,0	-42,7±3,5	-25,3±2,1
43	Зун-Холба, ниже подошвы горы	2007	1000	Щ	СЗ 310-330°		-45,3±26,5	-59,8±49,3	-35,6±13,5
44	Зун-Холба, по данным динамических проявлений горного давления (40 случаев)	1996	300	ОГЗ	СЗ 310-330°			-25,5	-8,3
45	Зун-Холба, выше подошвы горы, тальные породы	1998	350	ОГЗ	СЗ 310-330°		-26		-9,6
46	Зун-Холба, выше подошвы горы, тальные породы	1997-1998	400	ОГЗ	СЗ 310-330°			-26,5	-11,0
47	Зун-Холба, выше подошвы горы, тальные породы	1996-1998	430	ОГЗ	СЗ 310-330°			-26,8	-11,8
48	Зун-Холба, выше подошвы горы, тальные породы	1998	500	ОГЗ	СЗ 310-330°			-27,4	-13,8

Таблица 6.1, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
49	Зун-Холба, выше подошвы горы, тальные породы	1989	480	ОГЗ	СЗ 310-330°			-27,3	-13,2
50	Зун-Холба, выше подошвы горы, тальные породы	2000-2001	540	ОГЗ	СЗ 310-330°			-27,9	-14,9
51	Зун-Холба, ниже подошвы горы	2007	600	ОГЗ	СЗ 310-330°		-26,7		-16,5
52	Зун-Холба, ниже подошвы горы	2007	650	ОГЗ	СЗ 310-330°			-30,5	-17,9
53	Зун-Холба, ниже подошвы горы	2007	700	ОГЗ	СЗ 310-330°		-27,5	-29,4	-19,3
54	Зун-Холба, ниже подошвы горы	2007	800	ОГЗ	СЗ 310-330°			-38,1	-22,0
55	Зун-Холба, ниже подошвы горы	2007	850	ОГЗ	СЗ 310-330°		-58,6	-43,9	-23,4
56	Зун-Холба, ниже подошвы горы	2007-2010	900	ОГЗ	СЗ 310-330°		-63,1	-59,5	-24,8
57	Зун-Холба, ниже подошвы горы	2008-2010	950	ОГЗ	СЗ 310-330°		-23,3	-23,3	-26,1
58	Дарасун, Восточное Забайкалье	1986-1989	400	Щ	СВ, реже СЗ		-4,1+1,6	-21,3+4,9	-12,3+2,1
59	Дарасун	1986-1989	500	Щ	СВ, реже СЗ		-4,1+1,4	-20,8+4,4	-11,6+1,5

Таблица 6.1, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
60	Дарасун	1986–1989	600	Щ	СВ, реже СЗ		-5,2±2,8	-20,3±9,1	-10,9±2,2
61	Дарасун	1986–1989	700	Щ	СВ, реже СЗ		-19±2,1	-24,1±2,9	-14,3±1
62	Дарасун	2019	550	Щ	СВ, реже СЗ		-23,0±2,6	-14,8±4,5	-15,0±3,0
63	Дарасун, затопленные в период 2005–2018 гг горизонты	2019	617	Щ	СВ, реже СЗ		-10,4±0,3	-9,3±1,6	-16,7±1,4
64	Дарасун по данным проявлений горного давления в 1979–1991 гг. (40 случаев)	1979–1980	446–496	ОГЗ	СВ, реже СЗ			-43,4	-12,8
65	Дарасун	1979–1980	535–585	ОГЗ	СВ, реже СЗ		-54,3	-40,1	-14,5
66	Дарасун	1981–1982	385	ОГЗ	СВ, реже СЗ		-44,3		-10,4
67	Дарасун	1981–1982	546–596	ОГЗ	СВ, реже СЗ		-42,2	-38,5	-15,4
68	Дарасун	1985	385	ОГЗ	СВ, реже СЗ			-39,2	-10,4
69	Дарасун	1985	435	ОГЗ	СВ, реже СЗ			-43,8	-11,7

Таблица 6.1, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
70	Дарасун	1985	585	ОГЗ	СВ, реже СЗ		-42,3		-15,8
71	Дарасун	1985	685	ОГЗ	СВ, реже СЗ		-41,4		-18,5
72	Дарасун	1987– 1989	496	ОГЗ	СВ, реже СЗ			-38,7	-13,4
73	Дарасун	1987– 1989	646– 686	ОГЗ	СВ, реже СЗ		-41,4	-39,9	-18,2
74	Дарасун, по данным динамиче- ских проявлений горного давления (13 случаев), шахта Юго-Западная	2005– 2006	617	ОГЗ	СВ, реже СЗ			-31,0	-16,7
75	Дарасун, шахта Юго-Западная	2005– 2006	667	ОГЗ	СВ, реже СЗ			-61,8	-18,0
76	Дарасун, шахта Юго-Западная	2005– 2006	717	ОГЗ	СВ, реже СЗ		-56,8	-48,0	-19,4
77	Ново-Широкинское месторождение, Забайкальский край, мерзлый массив	2008	220	Щ	2550– 3350		-4,4±0,4	-5,4±0,6	-6,7±0,3
78	Многовершинное	2012– 2017	350	Щ			-11,2±2,7	-11,1±1,9	-9,7±2,3

- кварцевых трубчатых деформометров (КТД);
- маркшейдерских мерных проволок, рулеток (МР).

Астрофизическая составляющая на рудниках Урала определялась в результате экспериментального измерения на глубинах более 400 м, т.е. ниже зоны дезинтеграции массива горных пород, вызванного знакопеременными подвижками по нарушениям (Рисунки 6.8, 6.9, Таблицы 6.2, 6.3).

Анализ представленных материалов позволяет сделать следующие выводы:

1. Изменения деформаций хорошо коррелируются как с солнечной активностью (идут в одной фазе), так и с вариациями космических лучей (идут в противофазе).

2. Независимо на то что места измерений расположены далеко друг от друга (между шахтой Северопесчанская и Гайским подземным рудником порядка 1 300 км) и относятся к разным генетическим типам, величины дополнительных деформаций близки друг к другу, что дает основание предположить, что они будут одинаковы для всех месторождений, расположенных в скальных породах.

3. Из положения, что астрофизическая компонента деформаций одинакова для всех скальных массивов, можно предположить, что она должна проявляться в изменении фигуры Земли (рисунок 6.10),

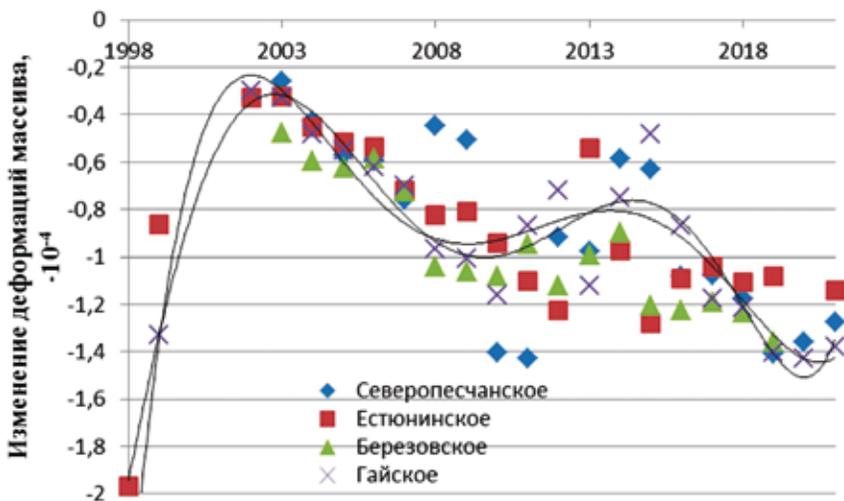


Рисунок 6.8. Изменение среднегодовых деформаций на рудниках во времени

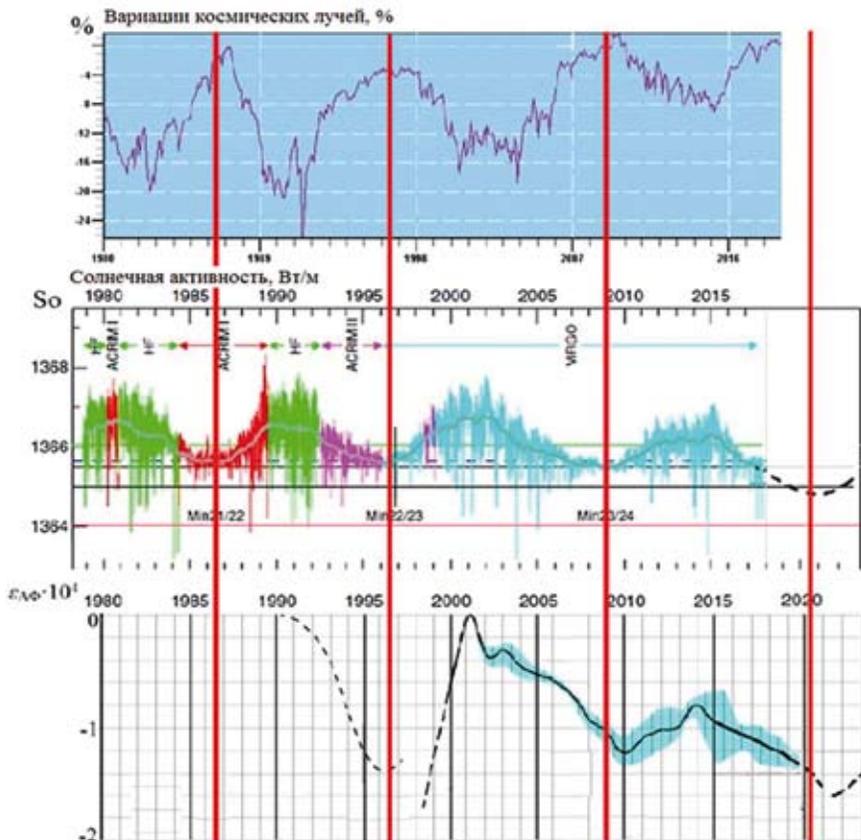


Рисунок 6.9. Изменение средних по четырем рудникам значений деформаций массива горных пород ($\sigma_{\text{дф}}$) на Урале на фоне изменения излучающей способности Солнца S_0 и интенсивности космического излучения

что может быть дополнительно отслежено методами гравиметрии (максимальное изменение оценивается как 0,5 км).

Прогноз изменения величины «астрофизической» составляющей во времени на настоящий момент можно вести только на основе экстраполяции зависимостей, приведенных на рисунках 6.8 и 6.9, причем прогноз на период более 2–3 лет может выполняться только с большими погрешностями.

Величины деформаций, если исключить измерения 1998 года, не превышают $-1,43 \cdot 10^{-4}$. При этом величина сжимающих напряжений

Таблица 6.2

Относительная деформация массива горных пород

№№ пп	Объект исследования, местоположение	Инстру- мент иссле- дования	Базис, Б	Интервал времени	$\epsilon \cdot 10^6$
1	Байкало-монгольский регион [150] разме- ром по широте 140 по долготе 260	GPS	1550x 2890 км	1994–2001 гг. 2002–2007 гг.	-0,15 +0,13
2	г. Екатеринбург [151]	GPS	2,4 ÷ 5,4 км	2003–2010 гг.	-0,54
3	г. Екатеринбург [152]	GPS	706 м	2002-2010 гг.	<-0,1
4	г. Екатеринбург [153]	ЛД	706 м	2002-2010 гг.	-9,0
5	Обсерватория Ала- Арча, Северный Тянь- Шань, штольня [154]	ЛД	25м	1996–2001 гг. 2001–2010 гг.	+3,0 +7,0
6	Боксанское ущелье, штольня [155]	ЛД	75 м	год	±6,0
7	Месторождение «Ан- тей», рудник, Н=300м [156]	ЛД	50 м	сутки	±1,6
8	Обсерватория Ала- Арча [157]	КТД	8,5	1989-1996 гг.	-3,0
9	г. Нижний Тагил, руд- ник, Н=400м [158] изменение диаметра выработки	КТД	3,5м	сутки 14 дней	±3,0 ±(8,0– 16,0)

Таблица 6.3

Результаты измерения относительной деформации массива горных пород на рудниках Урала

Азимут Год	*	I	II	III	IV	V	VI	$\epsilon_{\text{срАФ}} \cdot 10^4$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1998	Г	-2,13	-1,87	-	-	-1,88	-1,99	-1,97±0,12
1999	Г Г	-0,72 -	-0,5 -0,64	- -	-1,94 -2,02	-0,55 -	-0,6 -	-1,08±0,31

Таблица 6.3, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2002	Т	-0,18	-0,19	-	-	-0,24	-0,7	-0,36±0,04
	Г	-	-0,49	-	-0,11	-	-0,3	
2003	К	-0,17	-	-0,15	-0,16	-0,16	-0,65	-0,31±0,13
	Т	-0,15	-0,06	-	-	-0,3	-0,79	
	Б	-	-0,56	-0,44	-0,51	-	-0,39	
	Г	-	-0,47	-	-0,19	-	-0,33	
2004	К	-	-	-0,37	-0,31	-0,20	-0,84	-0,45±0,12
	Т	-0,43	-0,36	-	-	-0,23	-0,79	
	Б	-	-0,52	-0,53	-0,66	-	-0,67	
	Г	-	-0,64	-	-0,32	-	-0,48	
2005	К	-	-	-0,49	-0,53	-0,35	-0,92	-0,53±0,06
	Т	-0,47	-0,36	-	-	-0,45	-0,79	
	Б	-	-0,53	-0,6	-0,62	-	-0,75	
	Г	-	-0,66	-	-0,47	-	-0,52	
2006	К	-0,77	-	-0,28	-0,62	-0,56	-0,75	-0,58±0,03
	Т	-0,65	-0,35	-	-	-0,35	-0,79	
	Б	-	-0,4	-0,59	-0,65	-	-0,71	
	Г	-	-0,75	-	-0,50	-	-0,62	
2007	К	-0,88	-	-0,61	-0,75	-0,5	-1,06	-0,71±0,02
	Т	-0,85	-0,36	-	-	-0,61	-1,06	
	Б	-	-0,61	-0,75	-0,72	-	-0,82	
	Г	-	-0,77	-	-0,63	-	-0,7	
2008	К	1,00	-	-0,94	-0,87	-0,50	-0,94	-0,92±0,09
	Т	-0,74	-0,92	-	-	-0,84	-0,79	
	Б	-	-0,96	-1,0	-1,14	-	-1,07	
	Г	-	-1,04	-	-0,9	-	-0,97	
2009	К	1,56	-	-1,12	-0,96	-0,9	-1,11	-1,03±0,1
	Т	-0,98	-0,67	-	-	-0,8	-0,79	
	Б	-	-1,02	-1,06	-1,10	-	-1,07	
	Г	-	-1,09	-	-0,92	-	-1,05	
2010	К	-1,85	-	-1,24	-1,24	-1,38	-1,3	-1,22±0,14
	Т	-1,03	-0,43	-	-	-1,03	-1,29	
	Б	-	-1,05	-	-	-1,11	-1,09	
	Г	-	-	-	-1,17	-	-1,15	
2011	К	-1,8	-	-1,39	-1,18	-1,35	-	-1,1±0,22
	Т	-1,1	-	-	-	-	-	
	Б	-	-0,94	-0,99	-	-0,97	-0,89	
	Г	-	-0,75	-	-0,97	-	-0,88	

Таблица 6.3, продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2012	К	-1,2	-	-0,77	-1,01	-0,7	-	-1,02±0,18
	Т	-	-	-	-	-1,0	-1,45	
	Б	-	-1,12	-1,04	-	-1,13	-1,2	
	Г	-	-0,62	-	-0,82	-	-0,72	
2013	К	-1,26	-	-1,27	-0,53	-0,85	-	-1,00±0,04
	Т	-0,17	-	-	-	-0,26	-1,19	
	Б	-	-0,92	-1,0	-	-1,04	-1,02	
	Г	-	-0,79	-	-1,1	-	-1,47	
2014	К	-1,14	-	-0,42	-0,37	-0,41	-	-0,8±0,17
	Т	-0,82	-	-	-	-0,95	-1,15	
	Б	-	-0,95	-1,14	-	-1,04	-0,47	
	Г	-	-0,65	-	-0,9	-	-0,7	
2015	К	-1,0	-	-0,81	-0,41	-0,3	-	-0,94±0,34
	Т	-1,18	-	-	-	-1,22	-1,44	
	Б	-	-1,15	-1,31	-	-1,17	-1,2	
	Г	-	-0,38	-	-0,46	-	-0,6	
2016	К	-1,6	-	-0,92	-0,96	-0,84	-	-1,1±0,12
	Т	-1,25	-0,8	-	-	-1,14	-1,17	
	Б	-	-1,22	-1,23	-1,23	-1,23	-1,21	
	Г	-	-0,95	-	-1,10	-	-0,55	
2017	К	-1,47	-	-0,82	-0,94	-	-	-1,11±0,16
	Т	-1,32	-0,67	-	-	-1,14	-	
	Б	-	-1,10	-1,30	-1,20	-	-1,16	
	Г	-	-1,13	-	-1,16	-	-1,24	
2018	К	-1,5	-	-0,89	-1,07	-1,25	-	-1,18±0,20
	Т	-1,24	-0,88	-	-	-1,20	-	
	Б	-	-	-1,24	-1,30	-	-1,17	
	Г	-	-1,17	-	-1,18	-	-1,30	
2019	К	-1,69	-	-1,27	-1,22	-1,45	-	-1,34±0,18
	Т	-	-0,86	-	-	-1,30	-	
	Б	-	-	-1,45	-1,30	-	-1,33	
	Г	-	-1,38	-	-1,41	-	-1,42	
2020	К	-1,51	-	-1,23	-1,08	-1,61	-	-1,31±0,18
	Г	-	-1,46	-	-1,41	-	-1,42	
2021	К	-1,57	-	-1,20	-1,02	-1,31	-	-1,31±0,18
	Т	-	-0,91	-	-	-1,15	-1,36	
	Г	-	-1,39	-	-1,32	-	-1,43	

Примечание. Измерения проводились на рудниках, расположенных вблизи городов: Б – Березовский, Г – Гай, К – Краснотурьинск, Т – Нижний Тагил; Направления базисов: I – 00–90, II – 200–300, III – 450–750, IV – 800–900, V – 1250–1350, VI – 1560–1600

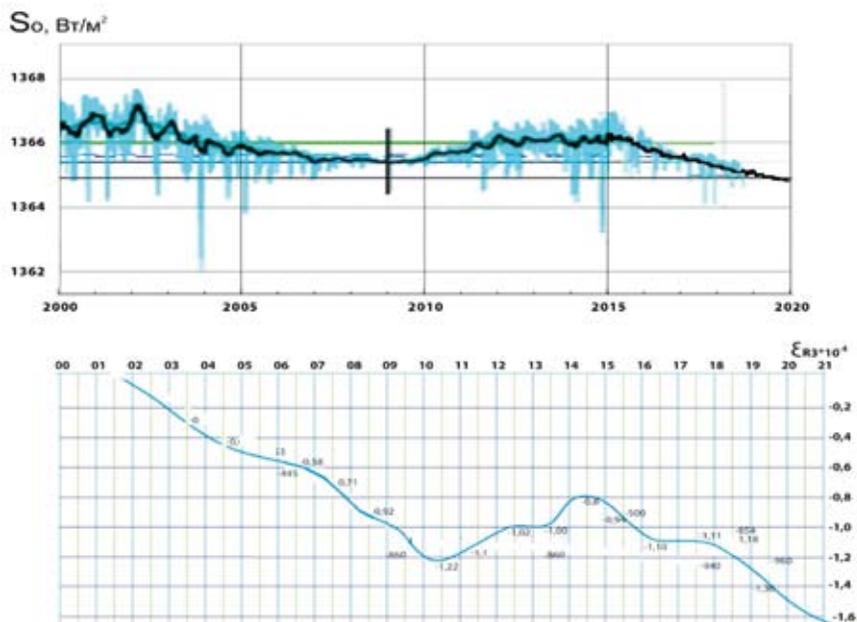


Рисунок 6.10. Деформации фигуры Земли во времени

может возрастать на 6–15 МПа в зависимости от модуля деформации массива (максимальные напряжения характерны для Естюнинского месторождения, имеющего аномально высокие деформационные и прочностные характеристики массива скальных пород).

Хотя полученные результаты наблюдений позволяют выделить периодичность 11–12 лет, утверждать, что вопрос об амплитуде и периоде изменения астрофизической составляющей природного поля напряжений нельзя считать решенным до конца, поскольку в природе солнечной активности выделяются гармоники с большим периодом (Рисунок 6.9).

На сегодняшний день можно с большой долей уверенности предположить, что до конца 2022 г. будет продолжаться незначительный рост напряжений (не более 2–3 МПа), а с 2032 г. начнется их незначительное снижение.

Районирование территории по признаку опасности современных геодинамических движений и риску разрушения объектов на участках недропользования

Требования к геодинамическому районированию территорий, сформулированные в нормативных документах [159, 160], относятся только к подземной разработке удароопасных месторождений. Для объектов инфраструктуры, расположенных на земной поверхности, а также для карьеров и отвалов таких требований не выдвигается, хотя они могут быть в большинстве случаев перенесены с подходов, развитых в подземной геотехнологии:

1. По картам общего сейсмического районирования (ОСР) оценивается сейсмическая активность участка недр, на котором располагается месторождение. При необходимости производится микросейсморайонирование района. Данные методики хорошо отработаны и традиционно используются повсеместно на всех месторождениях.

2. Уточнение блоковой структуры, в результате которой определяется блочная структура массива горных пород участка недр, вложенность блоков и оценивается динамика взаимодействия блоков с выделением потенциально геодинамически опасных зон (активные разломы, положение их пересечения и т.д.).

Для решения этой задачи применяются различные комплексы геофизических и геодезических методов. Тем не менее на настоящий момент информативность имеющихся методик достаточно сомнительна, особенно в плане выделения активных разломов. Также недостаточна оперативность выделения разломов: как правило, на момент проектирования первой очереди горнодобывающего предприятия перечень и положение активных разломов не установлены с необходимой точностью.

Необходимость решения этой задачи определяется необходимостью выбора мест для строительства стволов и объектов поверхностной инфраструктуры, а также определением мест заложения компенсаторов на трубопроводах.

3. Оценка напряженного состояния массива пород выполняется, прежде всего для подземных предприятий. Учет природного напряженного состояния для оценки устойчивости бортов выполняется лишь в специфических случаях на основании анализа опыта отработки месторождений-аналогов.

При этом районирование ведется по двум параметрам:

— по глубине отработки, что не только определяет величину действующих первоначальных напряжений, но и позволяет учесть изменение соотношения горизонтальных и вертикальных напряжений с глубиной и определение верхней границы удароопасности;

— по времени заложения выработок и сроку их службы, что позволяет учесть величину «астрофизической» составляющей.

В последнем случае можно использовать установленную на сегодняшний день величину дополнительной «астрофизической» деформации ($\epsilon_{\text{АФ}} \leq 2 \cdot 10^{-4}$) и с ее помощью оценить максимально возможное увеличение действующих напряжений, задаваясь модулем деформации массива.

Для оценки величины тектонических напряжений можно воспользоваться результатами измерений напряженного состояния, приведенного в таблице 6.1.

Таким образом, для выбора мест и обоснования безопасных условий строительства объектов на земной поверхности достаточно оценки сейсмоактивности рассматриваемого участка и картирования сетки тектонических нарушений с оценкой их активности. При проектировании и эксплуатации подземных рудников в обязательном порядке должно учитываться напряженное состояние массива и его изменение во времени.

Мероприятия по снижению опасности возникновения аварий и катастроф на объектах недропользования

Строительство объектов недропользования и их эксплуатация осуществлялись и будут осуществляться вне зависимости от благоприятности условий строительства. Поэтому главным мероприятием будет выбор мест для строительства зданий и сооружений, имеющих фундаменты и жесткую конструкцию, на удалении от активных разломов или узлов их пересечения. То же самое можно отнести и к выбору мест заложения шахтных стволов и технологических подземных камер (водоотлив, гаражи и проч.).

В зоне ведения очистных работ при подземном способе добычи влияние современных геодинамических движений СГД проявляется в виде горно-тектонических ударов (ГТУ), реализующихся в случае недостаточной мощности предохранительных целиков.

Таким образом, мероприятия для сооружений на земной поверхности и объектов подземной разработки должны быть различными:

1. В случае объектов на земной поверхности, а также при закладке шахтных стволов и выбора мест расположения технологических капитальных камер основным мероприятием является выбор места заложения сооружений на удалении от тектонических разломов примерно в центре крупных структурных блоков. В случае необходимости закладки сооружений вблизи от разломов строительство должно осуществляться с учетом возможных подвижек, т.е. как в сейсмоопасных районах.

Дополнительным условием является выбор места заложения сооружений на удалении от контактов пород, имеющих резко различные (в 2–3 раза и более) модули деформации;

2. При проектировании очистных подземных работ необходимо учитывать изменяющуюся во времени величину первоначальных напряжений. На сегодняшний день показано, что увеличение напряжений относительно результатов измерения может составлять от 0 до 15 МПа в зависимости от солнечной активности, соответствующей периоду проведения измерений и модуля деформации массива. Это возможное изменение должно закладываться в параметры крепи и целиков всех видов и назначений.

Дополнительно должна учитываться возможность возникновения горно-тектонических ударов. Полностью исключить сейсмический эффект при подвижках массива по тектоническим нарушениям вряд ли возможно. Снижения энергии горно-тектонических ударов можно достигнуть путем устранения условий накопления максимальной потенциальной энергии на участках плотных контактов тектонического нарушения (ТН), что может быть достигнуто, например, следующими известными способами:

- разрезку нового этажа начинать с блоков, к которым примыкают участки плотных контактов ТН, что позволит избежать накопления энергии по ним;

- снизить прочностные свойства швов ТН посредством закачивания через скважины воды по площади плотного контакта впереди фронта очистных работ;

- производить сотрясательное взрывание на этих же участках, способствующее подвижкам массива по ТН;

- оставлять вдоль ТН предохранительные целики.

Также не следует пренебрегать мерами, установленными в п. 899 [161] для удароопасных месторождений, а именно:

- вскрытие месторождений, подготовка и отработка рудных тел (залежей) производится при минимальной изрезанности рудного

массива, обеспечивая планомерное извлечение запасов без образования участков, целиков с концентрацией напряжений, способных вызвать горный удар;

— выбор мест расположения стволов шахт, горизонтов и выработок околоствольного комплекса осуществляется в неудароопасных или наименее опасных породах;

— горные выработки преимущественно должны проходиться в направлении наибольшего из напряжений, действующих в массиве горных пород;

— горные работы без оставления жестких целиков преимущественно должны проводиться расходящимися фронтами очистной выемки или с отработкой одним фронтом;

— осуществление мер разгрузки массива от повышенных концентраций напряжения с использованием опережающей надработки или подработки массива, методов локальной разгрузки (разбуривание шпурами или скважинами, камуфлетное взрывание), придание искусственной податливости конструкции, формируемой закладкой с заданными свойствами.

Выводы по разделу 6.2

1. Доказана хорошая корреляция переменной компоненты деформаций с 11-летним циклом солнечной активности. Связь этой компоненты с более низкочастотными колебаниями активности не доказана в связи с малым периодом наблюдений (чуть более 20 лет). Все деформации являются деформациями сжатия.

2. Переменные деформации практически для всех рудников, где производились измерения, одинаковы и не превышают для 11-летнего цикла величины $1,43 \cdot 10^{-4}$. При этом величина сжимающих напряжений может возрастать на 6–15 МПа в зависимости от модуля деформации массива.

3. Методика районирования участков недропользования должна включать в себя не только известные положения о районировании сейсмоактивности территории и активности тектонических нарушений, но и районирование по глубине отработки.

4. Для минимизации аварийных ситуаций места заложения строения с жестким каркасом и места заложения шахтных стволов и горнокапитальных камер должны выбираться на максимально возможном удалении от активных тектонических нарушений.

6.3. Выводы по главе 6

1. Приведена систематизация видов и форм разрушения массива горных пород и элементов систем разработки.

2. Приведены обобщенные результаты длительного геодеформационного мониторинга природных напряжений на рудниках Урала, проводимого лабораторией геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН в течение последних 20 лет, дали основание предложить новую, более современную структуру поля естественных напряжений с привязкой их изменения во времени.

3. Выявлено, что относительная деформация Земли и земной коры в отдельных циклах не превышает величины до $\varepsilon_{\text{АФ}} = 1,43 \cdot 10^{-4}$, что приводит к изменению напряженного состояния массива горных пород $\sigma_{\text{АФ}}$ на $5 \div 15$ МПа. Деформация предположительно одинакова для всех континентов и везде вызывает аварийные ситуации.

4. Предложено распространить известные положения по геодинамическому районированию для удароопасных месторождений на все месторождения, при этом дополнить положения районированием по глубине отработки.

5. Для снижения риска аварий и катастроф предложено выбирать места строительства сооружений с жестким каркасом, а также места заложений шахтных стволов и капитальных подземных выработок с учетом расположения и активности тектонических нарушений.

ГЛАВА 7.

Исследование и учет влияния геодинамической активности и иерархической блочности массива на безопасность строительства и эксплуатации подземных сооружений

7.1. Совершенствование модельных представлений о напряженном иерархически блочном массиве скальных горных пород, вмещающем подземное сооружение

Многолетняя практика ведения горных работ на шахтах Урала и Казахстана показала, что на глубинах, превышающих 500–600 м, напряженные массивы серпентинизированных скальных горных пород деформируются не совсем так, как того требуют геомеханические модели сплошной упругой изотропной среды. Особенно наглядно это проявляется при проходке выработок: в процессах продолжающейся (хотя и постепенно затухающей) деформации приконтурного породного массива при удалении забоя на расстояния, превышающие значения 2,5–3 радиусов проходимой выработки, то есть того расстояния, при котором, согласно моделям упругой среды, деформации быть уже не должно.

Данное явление неоднократно фиксировалось при проведении инструментальных наблюдений в процессе проходки различного типа выработок по смещениям реперов:

- в приконтурных скважинах грузовой ветви гор. –215 м (глубина 660 м) вертикального ствола при удалении забоя на расстояние от 1,5 до 80 м [162];

- на контуре бетонной крепи вертикального ствола Вспомогательный на глубине свыше 500 м при удалении забоя на расстояние от 1,5 до 8 м [163];

- на контуре штрека всяческого бока гор. –135 м (глубина 580 м) при удалении забоя на расстояние от 4 до 5 м [164];

- на контуре породной стенки ствола Клетевой на глубинах 818–838 м при удалении забоя на расстояние от 2 до 20 м [165];

— на контуре спинок чугунных тубингов ствола Клетевой на глубинах 886–954 м при удалении забоя на расстояние от 1,5 до 69 м [166].

С другой стороны, были накоплены многочисленные объективные свидетельства также и о неприменимости для данных условий реологических моделей НДС, предусматривающих учет вязкости и ползучести деформируемой среды. Наиболее убедительно на это указывали следующие факты:

1) согласно расчетам [167] по любой из реологических моделей (вязкоупругой, вязкопластичной, линейно наследственной и пр.) смещения в приконтурных массивах горных выработок давно должны были достичь дециметровых показателей (так, как это замеряется в выработках соляных и угольных шахт), с соответствующим постепенным нарастанием нагрузок на крепь капитальных выработок. Однако этого на исследуемых объектах до сих пор не наблюдалось и не наблюдается;

2) более того натурными исследованиями ИГД УрО РАН в эксплуатируемом вертикальном стволе Клетевой шахты «10-летия независимости Казахстана» зафиксировано обратное: долговременные процессы постепенного снижения нагрузок на крепь и релаксации действующих там напряжений. Причем процессы эти активизировались в условиях мокрой консервации ствола [168];

3) по результатам замеров напряжений в крепи нескольких шахтных стволов выявлено, что на глубинах 500–600 м при неизменных геологических условиях и толщине крепи происходит резкое (в 5–6 раз) увеличение действующих напряжений, связанное с увеличением зоны сдерживающего влияния забоя: с 1,5–2 до 3–4 диаметров выработки. Соответственно, в разы увеличивается окружающая зона неупругих деформаций, что негативно сказывается на устойчивости прилегающих выработок [163, 165];

4) по данным оптического буроскопического зондирования пород вокруг стволов и горизонтальных выработок установлено, что увеличение зоны неупругих деформаций является следствием нарушения сплошности и последующего запредельного деформирования вмещающего массива, проявляющегося в сдвиговых и ротационных смещениях структурных породных блоков размерами от нескольких сантиметров до 1,5–2 м на величину 1–1,5 см и более [167].

Вышеизложенные факты указывали на то, что на глубинах, превышающих 500–600 м, в напряженном вмещающем массиве сер-

пентинизированных скальных пород горно-капитальных выработок происходит запредельное деформирование. Однако оно происходит не в соответствии с реологическими моделями деформирования сплошной изотропной среды, а в условиях модели постепенного хрупкого разрушения массива скальных горных пород, вмещающих проходимую горную выработку, с последующими взаимными перемещениями (переупаковкой) структурных породных блоков приконтурного массива. Иными словами, на глубинах более 500–600 м в напряженных массивах серпентинизированных горных пород главным фактором, определяющим формирование НДС крепи капитальных выработок, являются не процессы деформирования, а процессы разрушения окружающего породного массива [169].

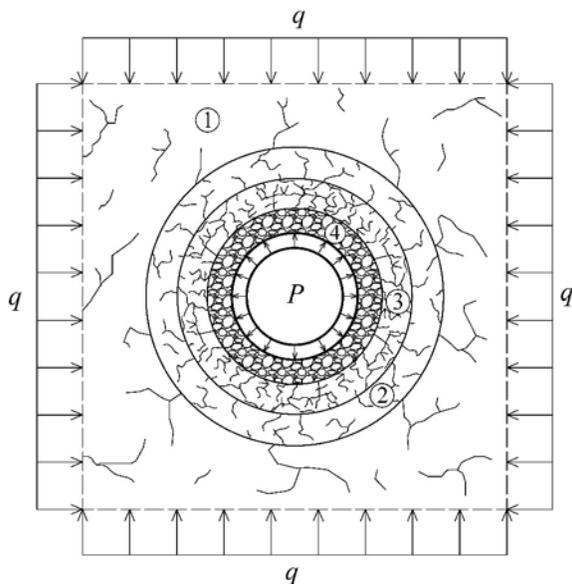


Рисунок 7.1. Расчетная схема формирования нагрузок на крепь протяженной горной выработки в модели разрушающегося массива вмещающих пород q – внешние нагрузки на крепь от массива окружающих пород; P – реактивный отпор (несущая способность) поддерживающей крепи; 1 – зона допредельного деформирования; 2 – зона запредельного деформирования; 3 – зона остаточной прочности; 4 – зона руинного разрушения

В данных условиях вокруг проходимых выработок, вне зависимости от их формы, направленности и местоположения, формируются концентрические зоны с измененными геомеханическими характеристиками вмещающего массива (Рисунок 7.1), которые схематично можно подразделить на 4 типа:

1 — зона ненарушенного массива (зона допредельного деформирования) с предельной прочностью на одноосное сжатие $[\sigma]$;

2 — переходная зона запредельного деформирования с постепенным снижением прочности разрушаемого массива от $[\sigma]$ до $[\sigma_0]$;

3 — зона остаточной прочности разрушаемого массива с пределом прочности на одноосное сжатие $[\sigma_0] = 0,1[\sigma]$;

4 — зона руинного разрушения с практически нулевой прочностью массива на одноосное сжатие.

И поскольку зоны эти формируются не одновременно, а в течение некоторого времени, то это и отражается в процессах постепенно затухающих смещений контура выработки, фиксируемых при инструментальных наблюдениях, в том числе и при удалении забоя на расстояния, превышающие значения 2,5–3 радиусов проходимой выработки.

7.2 Влияние современных геодинамических движений и технологических процессов на возникновение аварийных ситуаций при строительстве и эксплуатации объектов недропользования

Также одним из основных факторов, определяющих формирование системы «крепь — массив» является геодинамическая активность междублоковых границ вмещающего массива. Для выявления в массивах скальных горных пород геодинамически активных и, соответственно, потенциально опасных междублоковых границ предложено использовать результаты замеров вывалообразований, смещений и других видимых нарушений контура поперечного сечения горных выработок вчерне, фиксируемых в процессе их проходки.

Известно, что при приближении забоя выработки к границе между крупномасштабными (размерами в десятки — сотни метров) породными блоками, оконтуриваемыми зонами повышенной трещинова-

тости, происходит ухудшение устойчивости призабойного породного массива. Затем, по мере удаления забоя от междублоковой границы, с тем же темпом происходит улучшение устойчивости.

Представляется вполне очевидным, что при пересечении забоем выработки «активной» границы между подвижными блоковыми структурами ухудшение устойчивости призабойного породного массива будет происходить более быстро, чем при пересечении «пассивной» границы между блоками неподвижными. Это отразится в скачкообразном увеличении размеров выработки вчерне. При последующем же удалении забоя от «активной» границы их приближение к проектным размерам будет происходить более медленно, чем при удалении от границы «пассивной», вследствие влияния блоковых подвижек, провоцируемых проходкой выработки. Соответственно, степень (коэффициент) геодинамической активности, пересекаемой междублоковой границы может быть охарактеризован отношением градиента скачкообразного увеличения размеров выработки к градиенту их последующего приближения к проектным.

Наиболее наглядно данный критерий самоорганизации крупномасштабных подвижных блоковых структур проявляется при проходке вертикальных стволов, как по причине их больших размеров, так и вследствие меньшего влияния случайных породных вывалов, происходящих под воздействием силы тяжести, чем в выработках горизонтальных. Кроме того, при проходке шахтных стволов детальные замеры породного контура предусмотрены нормативными документами, а их результаты подлежат архивированию.

В соответствии с требованиями пунктов 334–336 «Инструкции по производству маркшейдерских работ» (утв. 2003 г.) для оперативного контроля процесса проходки вертикальных стволов замеры контура их поперечного сечения вчерне регулярно выполняются маркшейдерскими службами горнопроходческих предприятий. Профили породных стенок строящегося ствола с точностью до сантиметра измеряются от центрального или боковых отвесов по восьми радиусам через 45° с шагом, кратным проходческим циклам, но не более чем через 8 м. Результаты замеров фиксируются в специальном журнале, который хранится в архиве предприятия и доступен для ретроспективного анализа.

Объектом исследования является скальный, тектонически напряженный массив, который характеризуется благоприятными условиями для изучения процессов разрушения и подвижек породных

блоков, вследствие сочетания сравнительно высоких тектонических напряжений с низкими прочностью и модулем упругости массива.

Вмещающий породный массив вскрывающих горных выработок шахты в основном представлен трещиноватыми габбро-амфиболитами и ультраосновными серпентинизированными породами: дунитами, перидотитами, пироксеновыми дунитами.

Физико-механические свойства пород в образцах:

- предел прочности на одноосное сжатие $[\sigma]_{\text{сж}} = -45 \div -90$ МПа;
- на одноосное растяжение $[\sigma]_{\text{раст}} = 5 \div 9$ МПа;
- характер разрушения хрупкий;
- статический модуль упругости $E = 35 \div 40$ ГПа;
- статический коэффициент Пуассона $\mu = 0,25 \div 0,30$.

Несмотря на довольно прочные породы устойчивость горных выработок на шахте повсеместно низкая, не превышающая IV–V категорий (по 5-категорийным классификациям З. Бенявского, Д. Лобшира, Н. Бартона и др.). Причина такого положения в интенсивной разбитости породного и рудного массива многочисленными хаотичными трещинами и разноориентированными тектоническими нарушениями на разномасштабные структурные блоки. При этом если блоки с линейными размерами менее $0,1 \div 0,5$ м оконтурены трещинами, закрытыми или залеченными прочным заполнителем, то блоки размерами порядка $1 \div 1,5$ м и больше, как правило, (особенно в серпентинизированных породах) бывают оконтурены трещинами с милонитовым или серпофитовым тальковидными заполнителями, которые при увлажнении становятся мыльными на ощуп. Междублочные связи при этом падают практически до нуля. Соответственно, оказываются слабы и связи между крупномасштабными породными блоками, размерами в десятки и сотни метров, которые оконтуриваются зонами повышенной трещиноватости. На исследование геодинамической активности крупномасштабных породных блоков и были направлены натурные исследования.

Проанализированы журналы проходки трех вскрывающих (диаметр в свету $R = 8$ м) вертикальных стволов шахты: Вентиляционного, Скипового и Клетевого, в процессе строительства которых происходили нарушения постоянной крепи, связанные с горизонтальными подвижками вмещающего породного массива.

Проходка стволов Вентиляционный и Скиповой осуществлялась в сходных условиях. Стволы находятся на расстоянии 120 м друг от друга и до глубины 900–1050 м их проходка велась в сравнительно

устойчивом и однородном трещиноватом габбро-амфиболитовом массиве, а глубже — в неустойчивом напряженном массиве серпентинизированных пород.

Строительство ствола Клетевого, удаленного от Вентиляционного и Скипового на расстояние 3,5 км, проходило в качественно иных условиях. На всем протяжении ствола проходка велась в трещиноватом неустойчивом массиве серпентинизированных пород при существенно более высокой геодинамической активности и, соответственно, напряженном состоянии вмещающего породного массива.

При проходке ствола Вентиляционный в 2015 г. на глубине около 950 м на границе габбрового и серпентинитового массивов произошли нарушения двух колец тубинговой крепи: разрывы чугунных полок, трещинообразование в спинках и ребрах тубингов, сопровождаемые изгибами монтажных балок - расстрелов и формированием эллипсоидности тубинговых колец с максимальным суммарным отклонением $\Delta R = 187$ мм. Замеры положения стенок ствола относительно центрального отвеса показали, что нарушения крепи произошли вследствие взаимных срезающих подвижек двух крупномасштабных блоковых структур вмещающего породного массива, наклонно пересекающих ствол, которые привели к смещению его сечения в восточном направлении на 50 мм.

При проходке ствола Скиповой в 2020 г. в интервале глубин 1067–1077 м (также вблизи границы между габбровым и серпентинитовым массивами) в трех кольцах монолитной бетонной крепи высотой по 6 м, наблюдалось выколы бетона и формирование наклонно секущих трещин с раскрытием до 3 мм. При этом ниже, на призабойном участке высотой 6 м, в ортогональном к нарушениям бетонной крепи направлении по изгибам временной крепи из колец СВП была зафиксирована подвижка породной стенки ствола на 40 см.

Судя по косвенным данным с горизонтальными подвижками крупных блоковых структур вмещающего породного массива связаны и нарушения бетонной крепи Клетевого ствола. На этом стволе в 1984 г. при проходке в относительно однородном серпентинитовом массиве уходками по 3–4 м в интервале глубин 572–765 м произошло аварийное разрушение 193-метрового участка монолитной бетонной крепи. Причем произошло оно аномально быстро, но неравномерно. После вывала крупного (свыше 20 м³) породного объема из северной призабойной стенки ствола на глубине 765 м и появления в выше-лежащем бетонном кольце первых трещин и выколов бетона нача-

лось интенсивное разрушение участка крепи, находящегося на 30 м выше, на глубине 727–730 м, а также трещинообразования в северо-восточной стенке ствола в интервале глубин 737–743 м. И лишь затем, в течение последующих двух суток, произошло лавинообразное разрушение 193-метрового участка бетонной крепи.

Для выявления геодинамической активности междублоковых границ вмещающего породного массива были проанализированы замеры превышений проектных радиусов вышеперечисленных стволов в проходке. На стволах Вентиляционный и Клетевой замеры выполнялись с шагом 8 м (при уходках по 3–4 м), а на стволе Скиповой – 3 м (при уходках по 6 м). Результаты замеров, усредненные по периметрам поперечных сечений стволов, представлены на рисунках 7.2– 7.4 в форме точечных диаграмм. Там же отмечены глубины, на которых

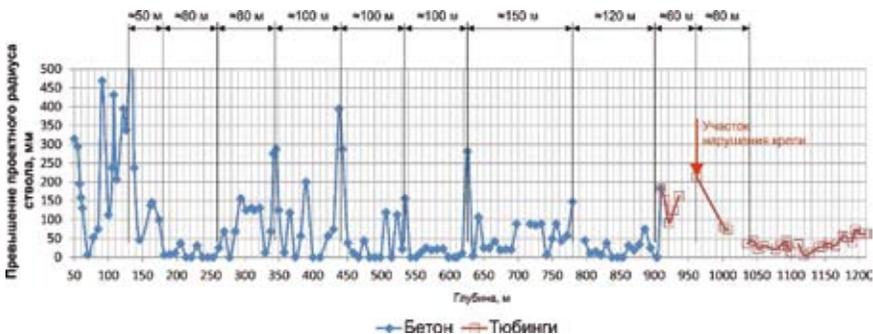


Рисунок 7.2. Результаты замеров превышений проектного радиуса ствола Вентиляционный в проходке с выделением границ между 100-метровыми блоковыми структурами

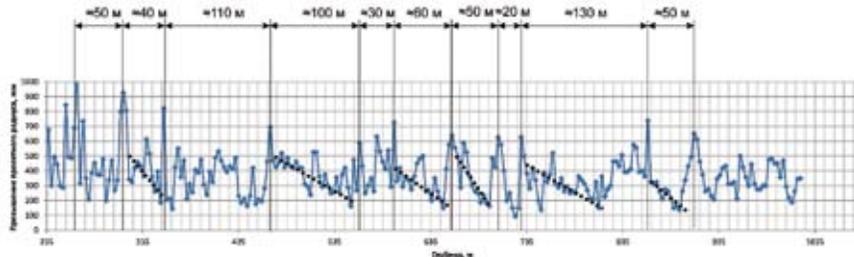


Рисунок 7.3. Результаты замеров превышений проектного радиуса ствола Скиповой в проходке с выделением границ между 100-метровыми блоковыми структурами

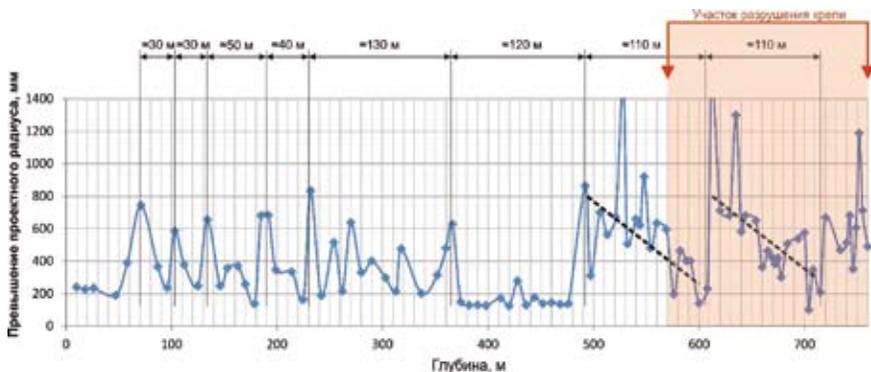


Рисунок 7.4. Результаты замеров превышений проектного радиуса ствола Клетевой в проходке с выделением границ между 30 и 100-метровыми блоковыми структурами

происходили нарушения крепи, и границы крупномасштабных блоковых структур, выделяемых по пиковым превышениям проектных радиусов.

Анализ точечных диаграмм свидетельствует о возможности выделения в массивах скальных горных пород в различных геомеханических и технологических условиях «активных» междублоковых границ, не выделяемых геолого-морфологическими методами.

В стволе Вентиляционный произошедшие на глубине 950 м подвижки крупномасштабных блоковых структур, наклонно пересекающих ствол и приведших к смещению его сечения на 50 мм, совпали со скачкообразным (за 8–9 уходов) ростом и последующим в 3 раза более постепенным (свыше 24 уходов) приближением усредненного радиуса ствола к проектным значениям (на рисунке 7.2 выделено пунктиром). Ранее фиксируемые в процессе проходки пиковые возрастания усредненного радиуса ствола, зачастую совпадающие с выделенными геолого-морфологическими методами тектоническими нарушениями, имели «симметричный» характер возрастания и уменьшения, что свидетельствовало о меньшей их геодинамической активности по сравнению с нарушением на глубине 950 м.

Еще более наглядно, вследствие увеличенных уходов и меньшего шага замеров, данный критерий иллюстрируют результаты замеров в стволе Скиповой (Рисунок 7.3). Быстрые возрастания и медленные уменьшения усредненного радиуса ствола начали проявляться там с глубин порядка 450 м. На рисунке 7.3 на это указывают пунктирные

линии линейных аппроксимирующих трендов, отражающих существенно более медленные, чем возрастания (в 5–6 и более раз), приближения сглаженных значений усредненного радиуса ствола к проектным. Они свидетельствуют о наличии на глубинах около 470, 600, 660, 730 и 860 м «активных» границ между крупномасштабными (размерами порядка 100 м) подвижными блоковыми структурами. Можно сказать, что при увеличенном масштабе в радиальных направлениях на этом участке внешний контур бетонной крепи ствола приобрел «штуцерообразную» форму.

Следует отметить, что способ сглаживания замеренных значений радиуса ствола на их линейную аппроксимацию влияет слабо, поскольку предлагаемый метод заведомо не требует больших коэффициентов аппроксимации. Об этом можно судить по рисунку 7.5, где на точечную диаграмму рисунка 7.3 в интервале глубин 420–1020 м наложены результаты, усредненные не только по периметру ствола, но и по 6-метровым заходкам. Это позволило сгладить разницу между замерами у забоя и на высоте 3 м, (которые в 85 % уходов были больше, чем у забоя, но в среднем лишь на 28 мм). Однако на выявленные границы геодинамически активных блоковых структур это практически не повлияло. В любом случае линейные размеры подвижных блоковых структур составляли порядка 100 м, а размеры слагающих их более мелких породных блоков, выделяемых по «симметричным» пиковым превышениям проектных радиусов, — около 30 м.

Такие же соотношения размеров «активных» и «пассивных» породных блоков прослеживается и по замерам в стволе Клетевой (Рисунок 7.4). Выделяются границы между 100-метровыми подвижны-

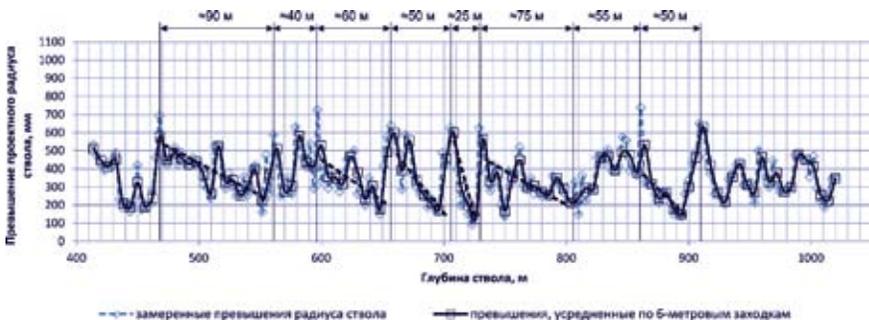


Рисунок 7.5. Результаты замеров превышений проектного радиуса (в проходке) ствола Скиповой, усредненные по его периметру и по 6-метровым заходкам с выделением 100-метровых породных блоков

ми структурами, с коэффициентом взаимной активности около 5–6, которые сформированы из 30-метровых малоподвижных блоковых структур с коэффициентом активности порядка 1.

В этой связи следует отметить, что размеры более крупномасштабных подвижных породных блоков, выявленных по замерам горизонтальных смещений реперных пунктов на поверхности шахтного поля, в среднем составляли 300–500 м. Такое распределение размеров иерархий подвижных блоковых структур, с коэффициентом вложения около трех, хорошо вписывается в современные математические модели процессов самоорганизации (консолидации, вторичного структурирования) деформационного поля массива скальных горных пород, проявляющихся в формировании в нем относительно стабильных блоковых структур, выделяемых по согласованным смещениям слагающих их более мелкомасштабных породных блоков.

7.3. Совершенствование технологических регламентов строительства и эксплуатации подземных сооружений с использованием новых модельных представлений о геодинамически активном иерархически блочном массиве скальных горных пород

Из всего множества типоразмеров подземных сооружений и объектов недропользования: энергетического, минерально-сырьевого комплексов, городской инфраструктуры – выделены подземные выработки рудных шахт как объекты исследований, которые с позиции геодинамической активности вмещающего породного массива находятся в наиболее сложных условиях. В качестве ключевых горнотехнических систем рассмотрены те системы, которые с минимальными затратами снижают негативное воздействие современных геодинамических движений на конструктивные элементы крепи и закрепное пространство наиболее большеобъемных выработок: вертикальных стволов, вскрывающих месторождения, капитальных камер и сопряжений рудворов, протяженных откаточных выработок. Проанализированы современные технологии управления горным давлением, направленные на повышение устойчивости и минимизацию затрат

на строительство и эксплуатацию такого рода выработок в геодинамически активных массивах скальных горных пород.

Исходя из выявленных модельных представлений о геодинамически активном иерархически блочном массиве скальных горных пород, представленных в разделах 7.1 и 7.2, рекомендуемые технологии управления напряженно-деформируемым состоянием системы «крепь подземного сооружения — массив вмещающих горных пород» регламентируются взаимными связями между тремя иерархическими масштабными уровнями проявлений современной геодинамической активности. Таким образом, с учетом масштабного фактора геодинамических воздействий, рекомендуются следующие мероприятия:

— на 1-м масштабном уровне (на базах в десятки — сотни метров): снижение геодинамической активности массива горных пород в окрестностях подземного сооружения путем уменьшения амплитуды подвижек его структурных блоков за счет повышения жесткости междублоковых связей и разгрузки определенных породных объемов за счет управления их подвижками;

— на 2-м масштабном уровне (на базах в метры — первые десятки метров): снижение напряжений в крепи и в массиве вмещающих пород подземного сооружения путем повышения их деформационной способности за счет обеспечения податливости определенных элементов крепи и породных объемов;

— на 3-м масштабном уровне (на базах в дециметры — первые метры): повышение несущей способности крепи и массива вмещающих пород подземного сооружения путем упрочнения и обеспечения жесткости определенных элементов крепи и породных объемов.

Основные технологии минимизации негативного влияния геодинамических движений на крепь подземного сооружения представлены на рисунке 7.6 в форме блок-схемы, на которой отражены взаимные связи между технологическими приемами и масштабами деформирования элементов системы «крепь подземного сооружения — массив вмещающих горных пород» для всего диапазона блоковых подвижек, подлежащих управлению: от дециметровых баз деформирования отдельных элементов крепи до породных структур с поперечными размерами в сотни метров.

На самых мелкомасштабных базах деформирования элементов крепи и массива вмещающих пород подземного сооружения — от дециметров до первых метров — для минимизации негативного влия-

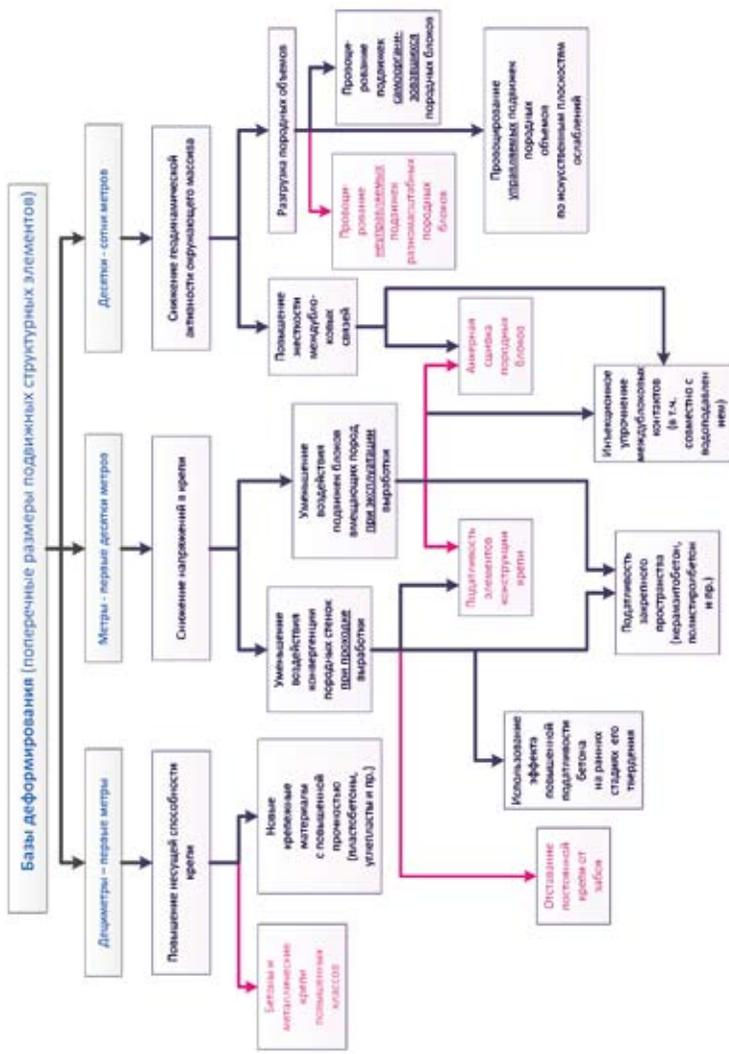


Рисунок 7.6. Взаимные связи между основными (выделены цветом) технологиями предотвращения негативного влияния современных геодинамических движений на крепь подземных сооружений и масштабами деформирования элементов систем «крепь — массив вмещающих горных пород»

ния на крепь современных геодинамических движений зачастую наиболее оправданным мероприятием оказывается повышение несущей способности крепи за счет применения тьюбингов, бетонов и металлических рамных крепей более высоких классов. В перспективе возможно также и внедрение новых крепежных материалов с повышенной прочностью: пластобетонов, углепластиков и пр. В настоящее время главным препятствием для их применения является высокая цена.

Однако с увеличением баз деформирования до метров — десятков метров более рациональным и экономически оправданным оказывается снижение напряжений, формирующихся в крепи и в массиве вмещающих пород подземного сооружения (выработки), путем обеспечения податливости определенных элементов крепи и прилегающих породных объемов. Эти мероприятия могут быть применены как на стадии проходки выработки, так и при ее эксплуатации.

При проходке основной эффект дает уменьшение воздействия на постоянную крепь конвергенции призабойных породных стенок выработки, что обеспечивается комплексированием следующих способов:

- возведением постоянной крепи с отставанием от забоя на 1,5–3 радиуса выработки с временным креплением призабойной части анкерами с металлической сеткой, спецпрофилем с набрызгбетоном и прочими облегченными видами крепи;

- обеспечением податливости элементов конструкции постоянной крепи путем формирования в ней податливых узлов и соединений;

- обеспечением податливости закрепного пространства путем формирования в нем слоев низко модульных заполнителей и варьирования соотношением между прочностными и деформационными свойствами тампонажных смесей, создающих различные марки, облегченные бетона: газобетоны, пенобетоны, полистиролбетоны, плаstopерлитобетоны, керамзитобетоны и др. (Рисунок 7.7);

- использованием эффекта повышенной податливости бетона на ранних стадиях твердения и, таким образом, управление временем тампонажа закрепного пространства и скоростью проходки.

Из вышеперечисленных способов наибольший эффект обеспечивает отставание постоянной крепи от забоя, которое дает возможность полностью реализовать сколь угодно большие смещения призабойных породных стенок выработки до возведения крепи.

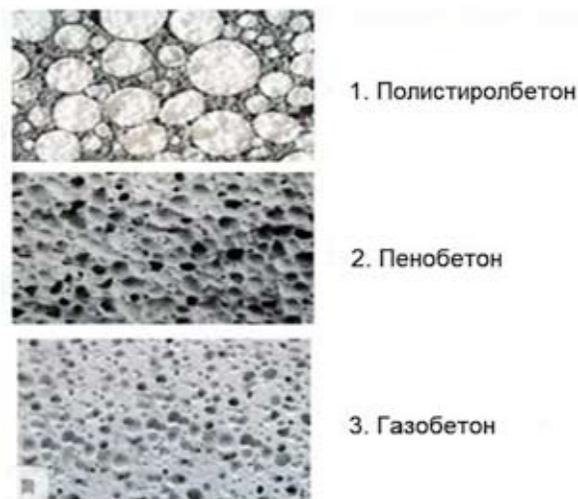


Рисунок 7.7. Марки облегченных бетонов с различной степенью пустотности

Податливость элементов постоянной крепи лимитируется конструктивными особенностями податливых узлов и соединений. Из них наиболее эффективны металлические арочные крепи, узлами податливости которых являются соединения элементов крепи с помощью скоб, гаек, планок и фасонных хомутов с клиньями, податливость которых обеспечивается за счет вдвигания одного элемента арки в другой. Но даже в этих конструкциях податливость ограничена: для трехзвенной крепи — 300–500 мм, а для пятизвенной — 700–1000 мм.

Еще меньшую податливость, не превышающую десятков миллиметров, дают узлы податливости в монолитных бетонной и железобетонной крепях: за счет формирования в их массиве пустот, в том числе заполненных низко модульными материалами.

Аналогичную податливость, в пределах нескольких десятков миллиметров, обеспечивает и тампонирующее закрепное пространство пористыми и низко модульными податливыми бетонными смесями (Рисунок 7.7).

В процессе последующей эксплуатации выработки требуется минимизация воздействия на постоянную крепь случайных неконтролируемых подвижек структурных блоков приконтурного породного

массива и, соответственно, минимизация дальнейших приращений напряжений крепи. Это можно обеспечить за счет вышеупомянутой податливости закрепного пространства и элементов конструкции постоянной крепи в комплексе с повышением жесткости междублоковых связей приконтурного массива и, соответственно, уменьшения подвижности его структурных породных блоков путем инъекционно-упрочнения (тампонажа) междублоковых контактов и их взаимной сшивкой путем анкерования. Тампонаж при этом может быть совмещен с мероприятиями по водоподавлению, поскольку в условиях трещиноватых скальных массивов нагнетание гидроизолирующих составов и осушение способствуют укреплению междублоковых связей.

Повышение жесткости связей между структурными блоками происходит и при проведении мероприятий по осушению больших объемов породного массива в окрестностях подземного сооружения. Этот фактор может быть использован для уменьшения амплитуды блоковых подвижек и, таким образом, снижения геодинамической активности массива в целом на базах в десятки — сотни метров.

В особо ответственных случаях для этой цели также возможна и сшивка блоков канатными анкерами.

Однако наиболее эффективным мероприятием снижения геодинамической активности массива на больших базах является разгрузка заранее определенных породных объемов путем провоцирования блоковых подвижек: как неуправляемых, так и управляемых.

Неуправляемые подвижки разномасштабных породных блоков провоцируются при различного рода опережающем воздействии на породный массив: проходкой опережающих выработок, опережающей подсечкой и отработкой при ведении очистных работ, принудительной посадкой кровли и массовых обрушениях налегающей породной толщи и пр. Все эти мероприятия входят в перечень ключевых горнотехнических систем — горных работ — особого пояснения не требуют. Сложнее дело обстоит с организацией управляемых подвижек заранее определенных породных объемов, требующей более подробных разъяснений.

Блочно-иерархическая структура массивов скальных горных пород по самой своей природе предопределяет дискретный характер распределения напряжений и деформаций. При деформировании больших объемов скальных породных массивов существенную роль начинают играть взаимные перемещения структурных породных

блоков, от которых в конечном итоге и будет зависеть устойчивость горных выработок.

Вместе с тем при решении большинства практических задач геомеханики, как правило, используют расчетные схемы, отображающие поведение скального массива геомеханическими моделями сплошной упругой изотропной среды, где взаимные подвижки структурных породных блоков не учитываются. Однако в условиях современной геодинамики эти подвижки становятся значимым фактором, и результаты расчетов существенным образом расходятся с реальностью. Применение же дискретных геомеханических моделей, отображающих динамику структурных неоднородностей конкретных участков горного массива, сопряжено со сложностью задания граничных условий для всего того множества структурных блоков и их иерархий, которые вовлекаются во взаимные перемещения. Это делает проблематичным практическую реализацию дискретных моделей.

В ИГД УрО РАН для разрешения данного противоречия предложен новый подход, использующий явление диссипативного структурирования дискретных массивов и сред при пластических деформациях. Имеются в виду процессы самоорганизации деформационного поля, проявляющиеся в объединении подвижных структурных элементов деформируемой среды во временно стабильные объемы, которые выделяются по их относительно согласованному совместным подвижкам. Вследствие этого в хаос разнонаправленных и разномасштабных взаимных перемещений структурных элементов вносится определенная трендовая упорядоченность, и такой самоорганизовавшийся и относительно стабильный породный объем уже вполне можно рассматривать как сплошную среду. Ранее такие процессы выявляли на малых пространственно-временных масштабах: при деформировании образцов различных твердых материалов [170], сыпучих сред (рисунок 7.8) [171], при кратковременных (взрывных и вибрационных) воздействиях на скальный горный массив [172, 173] и пр.

Натурными исследованиями Института горного дела УрО РАН процессы диссипативного структурирования впервые экспериментально зафиксированы в массивах скальных горных пород на больших пространственно-временных базах деформирования, соответствующих масштабам ведения горных работ: от десятков — сотен метров до первых километров за интервалы времени от нескольких недель до первых десятков лет. Основное условие возникновения в массивах скальных горных пород относительно стабильных объемов,

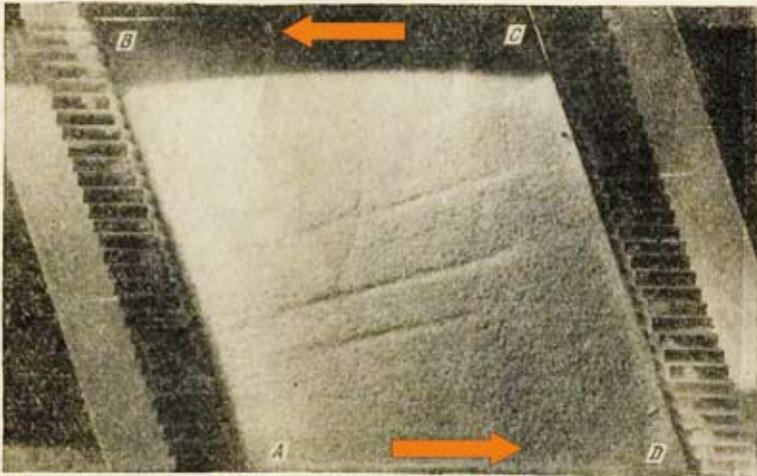


Рисунок 7.8. Формирование самоорганизующихся блоковых структур в массиве песка, деформирующегося в условиях сдвига (по материалам Ревуженко А.Ф., Стажевского С.Б., Шемякина Е.И., Бобрякова А.П.) [172]

сохраняющих свойства сплошной среды, было выявлено путем сопоставления результатов натуральных замеров деформаций породных массивов, проводившихся на протяжении 30 лет на шахтах Урала и Казахстана, с результатами математического моделирования напряженно-деформированного состояния исследуемых участков как упругой изотропной среды.

Установлено, что такие структуры формируются в тех областях массива, где в процессе перераспределения первоначальных напряжений направление изменения (иначе говоря, временной градиент) углов разворота главных осей тензора этих напряжений меняется на противоположное. Размеры самоорганизующихся структур не превышают ширины этой области. Вне ее массив дезинтегрируется в соответствии с теорией прочности Кулона — Мора и деформируется в форме разнонаправленных хаотичных подвижек структурных породных блоков различных рангов по разномасштабным междублоковым нарушениям.

Положение подтверждено качественно различным распределением деформаций в областях с массовой сменой знака перед временным градиентом приращений углов разворота главных осей тензора первоначальных напряжений массива и теми областями, где смен

знака не было. Натурными наблюдениями зафиксировано совпадение таких областей с местом и временем формирования зон концентрации деформаций, разделяющих массив на крупные породные объемы со свойствами сплошной среды. Распределение деформаций реперных интервалов, подтвержденных результатами сейсмо- и георадарного зондирования, совпадало с районированием массива по данному критерию как во времени, так и в пространстве. По другим же критериям такого совпадения не наблюдалось. Подробное обоснование критерия и примеры проявления процессов самоорганизации породных структур представлены в работе [174].

При этом натурными наблюдениями было выявлено совпадение зон концентрации деформаций с наиболее крупными тектоническими нарушениями, картируемыми геолого-морфологическими методами в пределах каждой такой области со сменой знака перед градиентом приращений углов. При последующих изменениях напряженного состояния основные приращения деформаций концентрируются в тех же зонах, которые, таким образом, выступают в роли каналов диссипации внешней энергии. Это обеспечивает сохранение однажды сформировавшихся структур до новой смены знака перед временным градиентом углов. В тех областях, где таких смен знака не происходит, массив дезинтегрируется с хаотичными смещениями по площадкам сдвига самых разномасштабных иерархий, а не только по самым крупным. Источником внешней энергии для блоковых подвижек служат перераспределения напряжений окружающего массива, происходящие вследствие развития зоны обрушения.

Характерные размеры самоорганизующихся породных структур определены на основании современных концепций о параметрах структурного строения скального массива [172, 173], согласно которым усредненный линейный коэффициент, определяющий скачкообразное изменение расстояния между элементами структурной нарушенности смежных масштабных объемов массива, варьируется в диапазоне $2 \div 3$. Из такого коэффициента вложения смежных структурных иерархий следует, что ширина относительно стабильных породных объемов не может быть меньше $1/3$ ширины той области, где происходит смена знака перед временным градиентом приращений углов разворота главных осей тензора первоначальных напряжений массива. Данное положение также было подтверждено натурными наблюдениями [174].

По результатам инструментальных исследований выявлена зависимость условий самоорганизации деформационного поля от масштабов техногенного воздействия. Установлено, что при перераспределении первоначальных напряжений в окрестностях, типичных для условий разработки мощных рудных залежей крупномасштабных зон обрушения (с поперечными размерами порядка 250–300 м и более), критерий смены знака перед временным градиентом приращений углов тензора является достаточным для любой категории устойчивости массива. При перераспределении же напряжений вокруг горизонтальных и вертикальных горных выработок (в процессе проходки) критерий применим лишь для сравнительно низкопрочных массивов четвертой и пятой категорий устойчивости.

Сопоставление результатов комплекса натуральных геомеханических и геофизических исследований с данными математического моделирования показало, что в окрестностях зон обрушения массовая смена временных градиентов углов разворота главных осей тензора первоначальных напряжений обуславливается масштабными изменениями формы зон обрушения, которые происходят при оставлении и последующей выемке целиковых участков рудной залежи. Размеры же области со сменой знака перед градиентом углов при любых первоначальных напряжениях окружающего массива определяются шириной целикового участка. На этом основании был определен параметрический критерий, связывающий процессы самоорганизации деформационного поля с параметрами подземной геотехнологии.

Критерий представляет собой отношение ширины целикового участка рудной залежи, отработка которого обуславливает возникновение в прилегающем массиве области с переменной знака перед временным градиентом приращений углов осей тензора, к расстоянию между наиболее крупными структурными нарушениями массива, выделяемыми в пределах данной области. Ширина стабильных структур, таким образом, составляет $1/3 \div 1$ от ширины целикового участка. При разработке мощных рудных залежей это обеспечивает формирование пространственно протяженных участков концентрации деформаций шириной порядка 20–30 м, разделяющих массив на относительно разгруженные породные объемы размерами в несколько сотен метров. В соответствии с общепризнанными критериями применимости методов механики сплошной среды, согласно которым область задания граничных условий должна по крайней мере в 3 раза превышать размеры моделируемого объекта, такие базы де-

формирования вполне достаточны для расчетов устойчивых параметров подземных выработок, которые могут находиться как на участках концентрации деформаций, так и между ними. Таким образом, появляется возможность использовать решения упругой задачи, вводя в модель деформирования сплошной среды корректирующие поправки, учитывающие расположение выработки. Выявленная связь между параметрами процесса самоорганизации и минимальными размерами формирующихся структур позволяет прогнозировать размеры и границы стабильных участков массива заблаговременно, на стадии составления проекта отработки залежи.

Зависимости, связывающие решения упругой задачи с фактическим напряженно-деформированным состоянием при самоорганизации деформационного поля, определены на основании сопоставительного анализа результатов математического моделирования и данных натуральных исследований. В основном были использованы данные регулярных инструментальных наблюдений за деформированием горного массива на шахте Северопесчанская Богословского рудоуправления, ежегодно проводившихся в течение 28 лет по 17 поверхностным и 4 подземным реперным линиям. Линии включали более 250 постоянных (забетонированных) реперов, заложенных с интервалом около 20 м в окрестностях зоны обрушения вне области гравитационного оседания горного массива, главным образом в лежащем боку рудной залежи. Общая протяженность линий составляла более 5 км.

Универсальность выявленных зависимостей обоснована типичностью геомеханических характеристик породного массива Северопесчанского месторождения (в ряду трещиноватых массивов скальных горных пород рудных месторождений), широким диапазоном горно-геологических и геомеханических условий, охваченных натурными исследованиями, и качественным совпадением с натурными данными, полученными по другим рудникам Урала и Казахстана. При этом были учтены следующие, ранее установленные в ИГД УрО РАН, положения:

— в окрестностях крупномасштабных (с поперечными размерами более 250–300 м) зон обрушения, формирующихся при выемке мощных рудных залежей, напряженное состояние скального массива в целом адекватно отображается моделью деформирования сплошной среды, где в качестве граничных условий задаются горизонтальные напряжения окружающего нетронутого массива [175];

— в скальных породных массивах на базах деформирования 20–30 и более метров связь между прочностными и деформационными параметрами имеет универсальный характер, не зависящий от литологических разностей [176].

Сопоставительный анализ показал, что в окрестностях крупномасштабных зон обрушения техногенные деформации массива на базах 20–30 и более метров соответствуют поведению сплошной упругой изотропной среды при условии введения в расчетные деформации (полученные решением упругой задачи) следующих корректирующих коэффициентов:

— для пространственно протяженных зон концентрации деформаций:

$$K_b = 3,0 \pm 0,3;$$

— для относительно стабильных участков массива, околуртунных этими зонами:

$$K_s = 0,5 \pm 0,06.$$

Коэффициенты определены путем статистической обработки результатов по 275 точкам, отражающих горизонтальную деформацию 75 реперных интервалов подземных и поверхностных наблюдательных станций за 5 характерных этапов развития зоны обрушения шахты Северопесчанская, выделенных на основании наиболее существенных скачкообразных изменений ее формы и размеров, происходивших в течение всех 28 лет ежегодных натурных наблюдений и замеров.

При определении корректирующих коэффициентов принято во внимание, что выявленные эмпирические зависимости не функциональные, а корреляционные, и следствием изменений факторных признаков являются лишь усредненные (трендовые) значения расчетных техногенных деформаций. Эта объективная особенность исследуемых процессов обусловлена их природной стохастичностью, препятствующей выходу на строгие функциональные зависимости, что было учтено путем введения специальной поправки на принципиально неустранимую (флуктуационную) изменчивость техногенных деформаций. Для этого выполнен ретроспективный дисперсионный анализ натурных данных, полученных за все 28 лет ежегодных замеров горизонтальных деформаций, как по этапам развития зоны, так и по местоположению консолидированных объемов.

Сводные результаты сопоставительного анализа представлены в таблице 7.1 и на точечных диаграммах рисунка 7.9.

Таблица 7.1

Сопоставительная оценка расчетных ε_r и замеренных ε_f значений деформации массива в окрестностях зон обрушения рудных шахт

Параметры аппроксимирующих прямых	Количество сопоставляемых пар значений	Достоверность аппроксимации R^2 (индекс корреляции r)	Среднеквадратичное отклонение значений ε_f от аппроксимирующей прямой	Критерий Стьюдента при доверительной вероятности 0,95	Доверительный интервал значений ε_f
По участкам концентрации деформаций					
$\varepsilon_f = 3.1 \varepsilon_r$	26	0.76 (0.87)	0.777	2.06	± 0.31
По участкам со свойствами сплошной среды					
$\varepsilon_f = 0.5 \varepsilon_r$	20	0.61 (0.78)	0.119	2.09	± 0.06
По обобщенным реперным интервалам					
$\varepsilon_f = 1.1 \varepsilon_r$	16	0.91 (0.96)	0.163	2.06	± 0.08

По итогам статобработки было выявлено, что амплитуды знакопеременных «пилообразных» отклонений, относительно соответствующих трендовых кривых, при любой комбинации выборок распределяются по нормальному закону и практически (для уровня значимости 5–10%) не зависят от интенсивности приращения техногенного поля деформаций, определяемого последовательностью и скоростью выемки рудной залежи и, соответственно, развития зоны обрушения. Все это позволило ограничить искомую флуктуационную поправку $\Delta\varepsilon$ половиной доверительного интервала, определенного для максимального значения стандартного отклонения замеряемых техногенных деформаций — $\pm 0,3$ мм/м.

В соответствии с двухсторонним критерием «отсечения» хвостов кривой нормального распределения для уровня значимости 10 % максимальная амплитуда отклонений составила 1 мм/м и, соответственно, $\Delta\varepsilon = \pm 0,5$ мм/м. Уровень относительной деформации в 1 мм/м совпадает с теоретическими значениями предельной деформации скальных пород и массивов на одноосное сжатие и подтверждается данными натуральных мониторинговых замеров [177]. Все это свидетельствует об универсальности выявленных зависимостей.

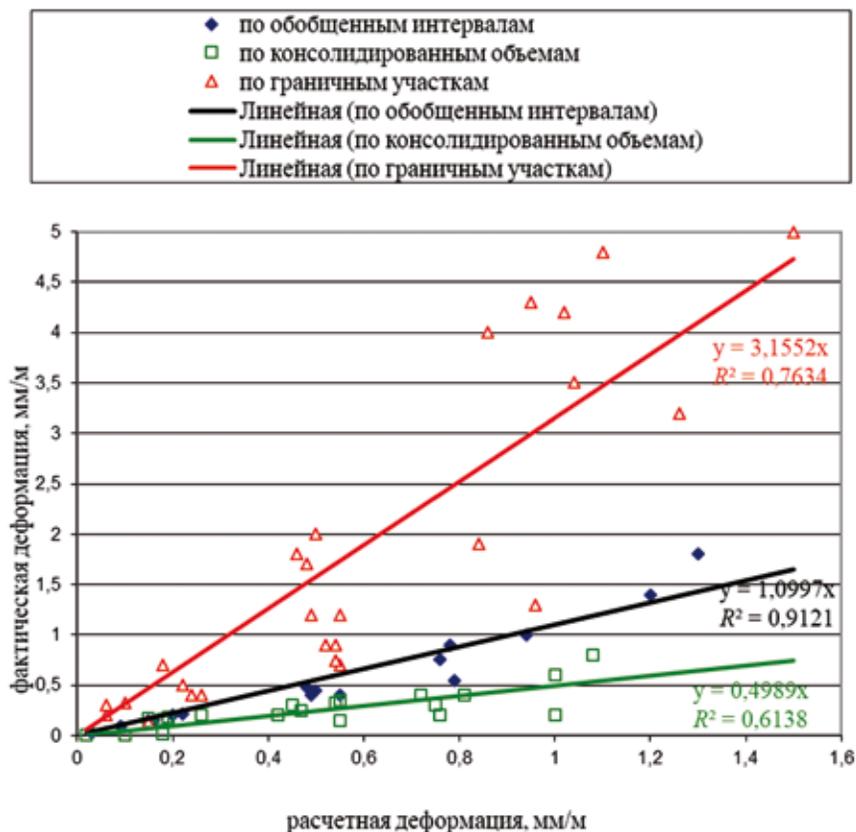


Рисунок 7.9. Сопоставление расчетных и замеренных деформаций горного массива в окрестностях типичных крупномасштабных зон обрушения рудных шахт

Таким образом, было обосновано, что для условий дискретизации деформационного поля в окрестностях типичных крупномасштабных зон обрушения, поперечные размеры которых превышают 250–300 м, максимальные прогнозные значения техногенных деформаций на базах 20–30 и более метров определяются следующими соотношениями:

— при расположении выработки в пределах области, деформирующейся как сплошная упругая изотропная среда

$$\varepsilon_s = K_s \varepsilon_r \pm \Delta\varepsilon; \quad (7.1)$$

— при расположении выработки на пограничном участке концентрации деформаций

$$\varepsilon_b = K_b \varepsilon_r \pm \Delta\varepsilon. \quad (7.2)$$

где ε_s , ε_b — фактические значения техногенных деформаций горного массива в окрестностях зон обрушения подземных рудников, соответственно, для сохраняющих свойства сплошной среды относительно стабильных объемов массива и для пограничных участков концентрации деформаций;

ε_r — расчетные значения техногенных деформаций, полученные путем решения упругой задачи;

$K_s = 0,5 \pm 0,06$ — поправочный коэффициент для деформаций участков массива внутри областей со свойствами сплошной упругой изотропной среды;

$K_b = 3,0 \pm 0,3$ — поправочный коэффициент для пограничных зон концентрации деформаций;

$\Delta\varepsilon = 0,5$ мм/м — поправка на принципиально неустранимую (вследствие вероятностной природы) изменчивость техногенных деформаций.

На основании выявленных закономерностей неизвестного ранее явления самоорганизации скальных массивов была разработана новая методика задания граничных условий для расчета устойчивых параметров горных выработок при подземной разработке мощных рудных тел системами с обрушением. Главное ее отличие от известных методик заключается в том, что масштабные уровни напряженного состояния деформируемой среды определяются не структурным строением массива, а его напряженно-деформированным состоянием на двух уровнях: в окрестностях зоны обрушения на базах в десятки — сотни метров и в окрестностях рассматриваемой подземной выработки на базах менее 20–30 м. Граничные условия, определяющие напряженное состояние в окрестностях подземной выработки, складываются из первоначальных напряжений нетронутого массива и дополнительных, обусловленных влиянием зоны обрушения, которые рассчитываются с учетом самоорганизации деформационного поля путем внесения в результаты решения упругой задачи корректирующих поправок, в соответствии с выражениями (7.1) и (7.2).

На базе данной методики был разработан и опробован на практике при отработке центрального участка шахты Северопесчанская

Богословского РУ новый метод управления напряженно-деформированным состоянием горных массивов при подземной разработке рудных месторождений, использующий процессы самоорганизации деформационного поля в окрестностях зон обрушения. Регулирование последовательности развития зон обрушения путем целенаправленного (с учетом первоначального напряженного состояния и структурного строения окружающего породного массива) оставления и последующей выемки целиковых участков рудных залежей позволило избежать пересечения наиболее ответственных горных выработок зонами концентрации деформаций и обеспечить их нахождение в пределах относительно стабильных и разгруженных областей, где массив ведет себя как сплошная упругая изотропная среда (Рисунок 7.10).

На основании натуральных исследований, выполненных при строительстве и эксплуатации горных выработок в геодинамически активных скальных массивах, получены следующие научные результаты:

Границы между самоорганизовавшимися породными блоками относительно камер ПДК

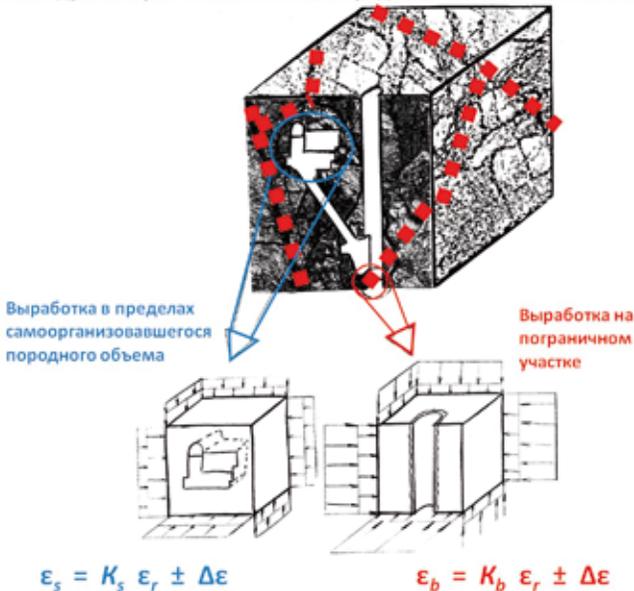


Рисунок 7.10. Расположение камер погрузо-доставочного комплекса в пределах разгруженного самоорганизовавшегося породного блока

1) разработана методика инструментальных натурных исследований современной геодинамической активности массива, где главным критерием выделения самоорганизующегося породного блока на любом масштабном уровне является способность формирующих его блоковых структур более мелкомасштабных иерархий реагировать на внешнее силовое воздействие как единое целое в течение рассматриваемого периода времени;

2) выявлен основной механизм воздействия современных геодинамических движений на устойчивость крепи, согласно которому в напряженных скальных породных массивах 4–5-й категорий устойчивости при ведении проходческих работ в условиях наличия современных геодинамических движений основным критерием опасных геомеханических процессов, определяющих взаимодействие геотехнической системы «крепь — массив», являются не процессы деформирования (как в массивах 1, 2, 3-й категорий), а процессы разрушения, приводящие к формированию в приконтурном массиве концентрических зон с измененными геомеханическими характеристиками;

3) выявлен новый критерий самоорганизации крупномасштабных подвижных блоковых структур, определяющих риск возникновения аварийных ситуаций в строящихся подземных сооружениях, который представляет собой коэффициент геодинамической активности пересеканной проходческим забоем междублоковой границы, характеризуемый отношением градиента скачкообразного ухудшения устойчивости призабойного породного массива (отражаемым аномально быстрым, в течение 1–2 уходов, увеличением размеров выработки вчерне) к градиенту последующего, более постепенного (за 4–6 уходов) его приближения к проектным параметрам;

4) обоснованы основные технологии минимизации негативного воздействия современных геодинамических движений на конструктивные элементы подземных сооружений (элементы крепи), которые регламентируются взаимными связями между тремя иерархически масштабными уровнями:

— на 1-м масштабном уровне (на базах в десятки – сотни метров): снижение геодинамической активности массива горных пород в окрестностях подземного сооружения путем уменьшения амплитуды подвижек его структурных блоков за счет повышения жесткости междублоковых связей и разгрузки определенных породных объемов за счет управления их подвижками;

— на 2-м масштабном уровне (на базах в метры — первые десятки метров): снижение напряжений в крепи и в массиве вмещающих пород подземного сооружения путем повышения их деформационной способности за счет обеспечения податливости определенных элементов крепи и породных объемов;

— на 3-м масштабном уровне (на базах в дециметры — первые метры): повышение несущей способности крепи и массива вмещающих пород подземного сооружения путем упрочнения и обеспечения жесткости определенных элементов крепи и породных объемов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в книге исследования раскрывают механизм формирования аварийных ситуаций на объектах недропользования, на основе которого были сформулированы подход и методы диагностики массива горных пород при районировании территорий Российской Федерации по фактору риска техно-природных катастроф, создаваемых и уже эксплуатируемых сооружений в различных областях экономической деятельности и в первую очередь на участках ведения горных работ.

Несмотря на различные подходы в решении задач обеспечения безопасности недропользования все они объединены одним термином — «Геомеханика».

Внедрение результатов районирования в практику недропользования позволит производить прогнозную оценку опасности проявления деформационных процессов в массиве горных пород в районах размещения объектов недропользования и, при необходимости, своевременно принимать меры по их нейтрализации.

В работе обосновано влияние геомеханики и процессов, происходящих в массиве горных пород, на безопасность строительства и эксплуатации инженерных сооружений, приведены основные понятия и параметры, характеризующие массив горных пород в качестве объекта недропользования.

Приведено описание геофизических методов, позволяющих получать информацию о структурно-тектоническом строении массива горных пород, приведены примеры использования их на различных объектах недропользования. Представлена методика геодинамического моделирования с использованием методов наземной геофизики. Доказано влияние тиксотропии на деформационные процессы. Степень тиксотропного разупрочнения зависит от внешних и внутренних факторов. К внешним факторам относятся динамические

воздействия на горный массив: современная геодинамическая активность, воздействие взрывных работ, движения транспорта и т.д. К внутренним факторам относятся гранулометрический состав породы, ее минеральный состав и влажность.

Обобщая огромный опыт взаимодействия техносферы с провалами поверхности, можно заключить, что пустоты от горных выработок в горном массиве могут пребывать в устойчивом состоянии длительное время, активное деформирование поверхности внутри воронки продолжается две недели, дальше деформации снижаются. На отработанных месторождениях обрушения поверхности происходят многократно над старыми вертикальными выработками с диаметром воронки от 2 до 10 м. В зонах обрушения только отдельные участки деформируются с параметрами, опасными для людей и техники, поэтому при соответствующем подходе к изучению участка зоны обрушения могут успешно использоваться для ведения открытых горных работ.

Исследования параметров деформаций от ведения подземных горных работ позволили сформулировать подход к определению безопасности использования подработанных территорий. Изучение таких территорий необходимо выполнять последовательно в три этапа:

1 этап — прогноз параметров деформаций на основе эмпирических данных, систематизированных в геоинформационной модели;

2 этап — дистанционное зондирование зон опасных деформаций и геодинамический мониторинг прилегающих территорий методами спутниковой геодезии;

3 этап — безопасность зоны обрушения определяется по оседанию поверхности в опасной зоне и модулю скорости горизонтальных деформаций массива горных пород.

Доказано, что основными факторами, определяющими формирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород, являются

- иерархически блочное строение;
- постоянная подвижность;
- вторичное структурирование;
- концентрация современных геодинамических движений на границах вторичных структурных блоков.

Массиву горных пород как иерархически блочной геомеханической среде присущи движения и деформации, обусловленные как естественными, так и техногенными факторами. Для учета их влия-

ния на объекты недропользования, с целью обеспечения их долговременной сохранности, необходимо проведение комплексного геомеханического мониторинга, включающего как геофизические, так и геодезические методы.

При недропользовании важным является не только диагностика геодинамической активности и определение параметров современных геодинамических движений в мониторинговом режиме, но и прогноз их эволюции во времени. Для решения этой задачи необходимо формирование постоянно пополняемых баз данных, включающих результаты инструментальных наблюдений за сдвижением и деформациями на различных пространственно-временных базах.

С целью районирования территории Российской Федерации по риску возникновения природно-техногенных катастроф разработана методика создания базы данных по критерию ее геодинамической активности, основывающаяся на учете скоростей современных движений наблюдательных пунктов постоянно действующих геодезических станций.

В шестой главе приведена систематизация видов и форм разрушения массива горных пород и элементов систем разработки, даны обобщенные результаты длительного геодеформационного мониторинга природных напряжений на рудниках Урала. Выявлено, что относительная деформация Земли и земной коры в отдельных циклах не превышает величины до $\varepsilon_{\text{АФ}} = 1,43 \cdot 10^{-4}$, что приводит к изменению напряженного состояния массива горных пород $\sigma_{\text{АФ}}$ на $5 \div 15$ МПа. Такая деформация предположительно одинакова для всех континентов и везде вызывает аварийные ситуации. Предложено распространить известные положения по геодинамическому районированию для удаороопасных месторождений на все месторождения.

В заключительной части монографии представлены результаты исследования влияния современной геодинамической активности и блочности массива на безопасность строительства подземных сооружений. Доказано, что на глубинах более 500–600 м в напряженных массивах серпентинизированных горных пород главным фактором, определяющим формирование напряженно-деформированного состояния крепи капитальных выработок, являются не процессы деформирования, а процессы разрушения окружающего породного массива.

Исходя из выявленных модельных представлений о геодинамически активном иерархически блочном массиве скальных

горных пород, рекомендуемые технологии управления напряженно-деформируемым состоянием системы «крепь подземного сооружения — массив вмещающих горных пород» регламентируются взаимными связями между тремя иерархическими масштабными уровнями проявлений современной геодинамической активности, а именно:

— на 1-м масштабном уровне (на базах в десятки — сотни метров): снижение геодинамической активности массива горных пород в окрестностях подземного сооружения путем уменьшения амплитуды подвижек его структурных блоков за счет повышения жесткости междублоковых связей и разгрузки определенных породных объемов за счет управления их подвижками;

— на 2-м масштабном уровне (на базах в метры — первые десятки метров): снижение напряжений в крепи и в массиве вмещающих пород подземного сооружения путем повышения их деформационной способности за счет обеспечения податливости определенных элементов крепи и породных объемов;

— на 3-м масштабном уровне (на базах в дециметры — первые метры): повышение несущей способности крепи и массива вмещающих пород подземного сооружения путем упрочнения и обеспечения жесткости определенных элементов крепи и породных объемов.

На основании выявленных закономерностей самоорганизации скальных массивов разработана новая методика задания граничных условий для расчета устойчивых параметров горных выработок при подземной разработке мощных рудных тел системами с обрушением. Главное ее отличие от известных методик заключается в том, что масштабные уровни напряженного состояния деформируемой среды определяются не структурным строением массива, а его напряженно-деформированным состоянием на двух уровнях: в окрестностях зоны обрушения на базах в десятки — сотни метров и в окрестностях рассматриваемой подземной выработки на базах менее 20–30 м.

На основании выполненных исследований по пяти направлениям сформулирован основной научный результат, объединяющий все проведенные исследования.

В рамках настоящих исследований разработана технология снижения риска и уменьшения тяжести последствий техно-природных катастроф в сфере недропользования, основанная на решении задач геодинамической и геомеханической диагностики массива горных пород на четырех масштабных уровнях:

-
- создание баз данных скоростей современных геодинамических движений на территории Российской Федерации (1 и 2-й уровни);
 - деформационное районирование зон влияния горных работ по критериям безопасности недропользования (2 и 3-й уровни);
 - структурно-геодинамическое районирование горного массива на основе применения геофизических методов исследований (2, 3 и 4-й уровни);
 - снижение негативного воздействия современных геодинамических движений на конструктивные элементы подземных сооружений (3 и 4-й уровни);
 - снижение риска динамического проявления горного давления по критерию концентрации напряжений (3 и 4-й уровни).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российская Федерация. Законы. О недрах : Федеральный закон № 395-1 от 21 февраля 1992 года. – Москва : КонсультантПлюс, 2020. – 71 с.
2. Бахурин И. М. Сдвигение горных пород под влиянием горных разработок / И. М. Бахурин. – Москва – Ленинград : Гостопиздат, 1946. – 229 с.
3. Леонтовский П. М. Литература об обрушении и оседании пород в рудниках и о влиянии их на дневную поверхность / П. М. Леонтовский. – Екатеринбург, 1912. – 320 с.
4. Heim A. Mechanismus der Gebirgsbildung. Bale / A. Heim. – 1978.
5. Динник А. Н. Применение теории упругости к решению задач, относящихся к проблеме управления кровлей / А. Н. Динник // Материалы к совещанию по проблеме управления кровлей. – Москва – Ленинград : Изд-во АН СССР, 1937. – С. 11-24.
6. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы / М.А. Садовский // ДАН СССР. – 1979. – Т. 247, № 4. – С. 829-831.
7. Sas I. E. Solving problems in geomechanics: Comparison of the fidesys strength analysis system and the plaxis software package / I.E. Sas, E.B. Cherepetskaya, I. A. Pavlov. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.328 // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 755. – P. 328-332.
8. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании / Ю. О. Кузьмин – Москва : Агентство экологических новостей, 1999. – 220 с.
9. The role of time lapse (4d) seismic technology as reservoir monitoring and surveillance tool: a comprehensive review / C. Sambo, O.A. Akanni, C.C. Iferobia, A. A. Babasafari, S. Rezaei. – DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103312 // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2020. – Т. 80. – С. 103312.
10. Integrating reservoir geomechanics with multiple fracture propagation and proppant placement / R. Manchanda, S. Zheng, S. Hirose, M.M. Sharma. – DOI: 10.2118/199366-PA // Society of Petroleum Engineers Journal. – 2020. – Т. 25. – № 2. – С. 662–691.

11. Геодинамический фактор в формировании депрессионно-деструктивных областей в массиве горных пород / А.Д. Сашурин, С.В. Усанов, В.В. Мельник [и др.] // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах : материалы 2-й Российско-Китайской научной конференции (02 - 05 июля 2012 г.) : сборник трудов 4. – Новосибирск : ИГД СО РАН, 2012. – С. 256-260.
12. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / [В.Н. Опарин и др.] ; РАН, Сибирское отделение, Ин-т горного дела [и др.] – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. – 632 с.
13. Сашурин А. Д. Взаимосвязь геомеханики и недропользования с позиций законодательного определения термина «Недра» / А.Д. Сашурин, В.В. Мельник – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-100-104 // Горная промышленность. – 2022. – № 1S. – С. 100-104.
14. Сашурин А. Д. Природно-техногенные катастрофы на горных предприятиях: Истоки и пути предупреждения / А.Д. Сашурин, В.В. Мельник – DOI: 10.25635/2313-1586.2020.04.005 // Проблемы недропользования. – 2020. – № 4 (27). – С. 5-13
15. Экспериментальное исследование процессов самоорганизации иерархически-блочных массивов горных пород / А.Д. Сашурин, А.Е. Баллек, Т.Ш. Далатказин, В.В. Мельник, А.Л. Замятин, Ю.П. Коновалова, С.В. Усанов // Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. – С. 119-145.
16. Штофф В. А. Моделирование и философия / В.А. Штофф ; отв. ред. В.П. Бранский. – Москва – Ленинград : Наука 1966. – 304 с.
17. Розовский Л. Б. Введение в теорию геологического подобия и моделирования / Л.Б. Розовский. – Москва : Недрa, 1969. – 127 с.
18. ГОСТ Р 50544-93. Породы горные. Термины и определения = Rocks. Terms and definitions : государственный стандарт Российской Федерации : издание официальное : дата введения 1994-07-01 / разработан и внесен Министерством науки, высшей школы и технической политики Российской Федерации. – Москва : Госстандарт России, 1993. – 49 с.
19. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация (с поправками) = Soils. Classification : Межгосударственный стандарт : дата введения 2013-01-01 / разработан Национальным объединением изыскателей (НОИЗ), Научно-исследовательским, проектно-изыскательским и конструкторско-технологическим институтом (НИИОСП) им. Н. М. Герсевича – институтом ОАО "НИЦ "Строительство" [и др.]. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 45 с.
20. Горная энциклопедия : в 5 т. / редкол.: Е. А. Козловский (гл. ред.) [и др.]. – Москва : Советская энциклопедия, 1984 – 1991.

21. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном сжатии = Rocks. Methods for determination of axial compression strength : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 19.06.84 № 1973 / разработан и внесен Министерством угольной промышленности СССР. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2000. – 8 с.

22. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии = Rocks. Method for determination of deformation characteristics under uniaxial compression : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 24.04.91 N 563 / разработан и внесен Министерством угольной промышленности СССР, Академией наук СССР, Министерством геологии СССР, Академией наук УССР, Министерством по производству минеральных удобрений, Государственным комитетом СССР по народному образованию. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2000. – 10 с.

23. ГОСТ 21153.5-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием = Rocks. Method for the determination of cut strength limit : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 15.03.88 N 547 / разработан и внесен Министерством угольной промышленности СССР, Академией наук СССР, Министерством геологии СССР, Академией наук УССР, Академией наук Кирг. ССР, Министерством высшего и среднего специального образования СССР. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – 8 с.

24. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости = Soils. Laboratory methods for determining the strength and strain characteristics : межгосударственный стандарт : издание официальное : дата введения 2012-01-01 / разработан Научно-исследовательским, проектно-изыскательским и конструкторско-технологическим институтом оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова - институтом Открытого акционерного общества "Научно-исследовательский центр "Строительство" (ОАО "НИЦ "Строительство") [и др.]. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 84 с.

25. Griffiths D. H. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology / D. H. Griffiths, R. D. Barker, J. Appl // Geophysics 29. – 1993. – P. 211-226.

26. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред / А. А. Бобачев, И. Н. Модин, Е. В. Перваго, В. А. Шевнин // Разведочная геофизика : обзорная информация / Всесоюзный науч.-исслед. ин-т экономики минер. сырья и геол.-развед. работ (ВИЭМС). – Москва, 1996. – 50 с. – (Геоинформмарк. Вып. 2).
27. Dahlin T. The development of DC resistivity imaging techniques / T. Dahlin // *Computers & Geosciences* 27. – 2001. – P. 1019-1029.
28. Zuev, P. Using the method of electrical imaging for obtaining the modulus of elasticity in open cast mining = Использование метода электромографии для получения модуля упругости при ОГР / P. Zuev, A. Vedernikov, D. Grigoriev. – DOI: 10.1051/e3sconf/202019201030 // E3S Web of Conferences : VIII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources" (PCDG 2020), Khabarovsk, Russia Federation, September 8-10, 2020 г. = VIII Международная научная конференция "Проблемы комплексного освоения георесурсов". – Khabarovsk, 2020. – Vol. 192. – p. 01030
29. Loke M. H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys / M.H. Loke. – 2022. – P. 251. – URL: www.geotomosoft.com (дата обращения: 04.10.2022).
30. Панин Г. Л. Многоэлектродная аппаратура методов сопротивлений «Скала-48» / Г. Л. Панин // Инженерная и рудная геофизика : материалы конференции. – Геленджик, 2008. – 2 с.
31. Kaminski A. E. ZondRes2D User Manual / A. E. Kaminski. – 2022. – P. 153. – URL: <http://zond-geo.com> (дата обращения: 25.10.2022).
32. Электрическое зондирование геологической среды. Ч.1 / под ред. В. К. Хмелевского, В. А. Шевнина. – Москва : Изд-во МГУ, 1988. – 177 с.
33. Электроразведка методом сопротивлений : учебное пособие / под ред. В. К. Хмелевского, В. А. Шевнина. – Москва : Изд-во МГУ, 1994. – 160 с.
34. Рекомендация МСЭ-R P.2040 (09/2013). Серия Р. Распространение радиоволн. Влияние строительных материалов и структур на распространение радиоволн на частотах выше приблизительно 100 МГц. Международный Союз Электросвязи. – URL: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en> (дата обращения: 25.10.2022).
35. Conyers, Lawrence B. Ground-penetrating radar for ge archaeology / Lawrence B. Conyers. – Wiley. USA, 2016. – P. 160. – ISBN 978-1-118-94994-8.
36. Utsi E.C. Ground Penetrating Radar theory and practice / E. C. Utsi. – Elsevier B.V. UK, 2017. – P. 210.
37. David J. Daniels Ground Penetrating Radar / David J. Daniels. – 2 nd Edition // The Institution of Electrical Engineers. UK, 2004. – P. 377. – ISBN 0-86341-360-9.
38. Harry M. Jol Ground Penetrating Radar Theory and Applications / Harry M. Jol. – Elsevier B.V., 2009. – P. 543. – ISBN 978-0-444-53348-7.

39. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных: учебное пособие / А. В. Старовойтов. – Москва : Издательство МГУ, 2008. – С. 192.
40. Жуков А. А. Адаптация методов георадиолокации и ультразвуковой томографии для решения горно-геологических задач в условиях калийных месторождений (на примере Верхнекамского месторождения солей) : автореферат дис. ... кандидата технических наук / Александр Анатольевич Жуков ; [Место защиты: Ин-т геофизики УрО РАН]. – Пермь, 2018. – С. 23.
41. Геофизпрогноз : [сайт]. – Санкт-Петербург. – URL: <http://www.newgeophys.spb.ru/> (дата обращения: 25.10.2022).
42. Шерифф Р. Сейсморазведка : В двух томах. Том 1. История, теория и получение данных. Том 2. Обработка и интерпретация / Р. Шерифф, Л. Гелдарт. – Москва : Издание: МИР, 1987, 448 с., 400 с.
43. РСН 66-87. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Сейсморазведка : республиканские строительные нормы : издание официальное : утверждены постановлением Государственного комитета РСФСР по делам строительства от 31 июля 1987 г. № 133 / разработаны производственным объединением по инженерно-строительным изысканиям ("Стройизыскания") Госстроя РСФСР (исполнитель: В. В. Лисицын). – Москва : МосЦТИЗИС Госстроя РСФСР, 1987. – 54 с.
44. Жуков В. С. Влияние различных видов пористости на скорости упругих волн и электропроводность коллекторов Чаяндинского месторождения / В. С. Жуков, В. В. Моторыгин // Вести газовой науки : научно-технический сборник. – 2017. – № 2 (30). – С. 223-233.
45. Сейсмическое программное обеспечение RadExPro : [сайт]. – Тбилиси. – URL: https://radexpro.com/about_us/ (дата обращения: 25.10.2022).
46. Горбушина Л. В. Эманационный метод индикации геодинамических процессов при инженерно-геологических изысканиях / Л. В. Горбушина, Ю. С. Рябоштан // Советская геология. – 1975. – № 4. – С. 48-50.
47. Резонансные особенности эсхалиции природного радона / В. В. Адушкин, А. А. Спивак, С. А. Кожухов, Ю. В. Кукушкин // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 400, № 3. – С. 369-371.
48. Далатказин Т. Ш. Использование радонометрии при изучении современной геодинамики на территориях, перекрытых мощным чехлом осадочных пород для решения задачи обеспечения безопасной эксплуатации объектов недропользования / Т. Ш. Далатказин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 7. – С. 97-100.
49. Исследования по модернизации использования эманационной съемки в качестве экспресс-метода при геодинамической диагностике /

Т. Ш. Далатказин, Ю. П. Коновалова, В. И. Ручкин, П. И. Зуев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 4. – С. 206-220.

50. Далатказин Т. Ш. Трансформация поля радоновых эманаций в зоне техногенного воздействия горных работ при отработке южной залежи Песчанской группы / Т. Ш. Далатказин. – DOI: 10.18454/2313-1586.2015.4.886 // Проблемы недропользования. – 2015. – № 1. – С. 13-19.

51. Далатказин Т. Ш. Исследования геодинамической ситуации при- бортовых участков с использованием радонометрии при открытом спо- собе разработки месторождений / Т. Ш. Далатказин, П. И. Зуев. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-46-55 // Проблемы недропользования : Гор- ный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 46-55.

52. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов / Ю. О. Кузьмин. – doi: 10.31857/S0002-33372019178-103 // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 78-103.

53. Еманов А. Ф. Применение метода стоячих волн для исследования сейсмоизолированных зданий / А. Ф. Еманов, А. А. Красников // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2015. – Т. 42; № 4. – С. 37-64.

54. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология : Учебник для вузов, обучающихся по специальности "Гидрогеология и инж. геология" / В. Д. Ломтадзе. – Ленинград : Недр. Ленингр. отд-ние, 1970. – 526 с.

55. Бетехтин А. Г. Курс минералогии / А. Г. Бетехтин ; ГНТИ литерату- ры по геологии и охране недр. – Москва : ГНТИ литературы по геологии и охране недр, 1956. – 558 с.

56. Роль тектонических деформаций породного массива в форми- ровании оползневых явлений на Коршуновском карьере / А. Д. Сашу- рин, А. В. Яковлев, Н. И. Ермаков, А. А. Панжин, А. В. Наумов // Горный информационно–аналитический бюллетень(научно-технический жур- нал). – 2003. – № 2. – С.193-196.

57. Панжин А. А. Мониторинг геодинамических процессов на пред- приятиях и урбанизированных территориях / А. А. Панжин, Н. А. Пан- жина // Горный информационно–аналитический бюллетень (научно- технический журнал). – 2007. – № 3. – С. 171-182.

58. Панжин А. А. Диагностика геодинамической активности мас- сива горных пород геодезическим методом / А. А. Панжин // Геодина- мика и напряженное состояние недр Земли = Geodynamics and Stress State of the Earth's Bowels : труды междунар. конф., 6-9 окт., 2003 г. / [науч. ред. А. В. Леонтьев]. – Новосибирск : Изд. ИГД СО РАН, 2004. – 567 с.

59. Сашурин А. Д. Исследование геодинамических процессов с применением GPS-технологий / А. Д. Сашурин, А. А. Панжин, Ю. П. Коновалова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 7. – С. 34–38.
60. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород / Ю. О. Кузьмин, В. С. Жуков. – Москва : Изд-во Моск. госуд. горного университета. – 2004. – 262 с.
61. Далатказин Т. Ш. Литологические особенности горного массива г. Березовский в прогнозе активизации процесса сдвижения горных пород в случае затопления подземного рудника / Т. Ш. Далатказин. – DOI: 10.18454/2313-1586.2016.03.005 // Проблемы недропользования. – 2016. – № 3. – С. 5-9.
62. Ручкин В.И. Зависимость динамики напряженно-деформированного состояния геологической среды от техногенного воздействия на естественное тектоническое состояние массива горных пород на горнодобывающих предприятиях / В. И. Ручкин, Ю. П. Коновалова // Горный информационно-аналитический бюллетень : научно-технический журнал. – 2016. – № 1. – С. 250-259.
63. Сашурин А. Д. Формирование напряженно-деформированного состояния иерархически блочного массива горных пород / А. Д. Сашурин. – DOI: 10.18454/2313-1586.2015.4.890 // Проблемы недропользования. – 2015. – № 1. – С. 38–44.
64. Деформационные предвестники техногенных землетрясений при разработке месторождений углеводородов / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин, В.Г. Букин, С. В. Гришко, И. В. Гетманов, С. Л. Одинцов, А.В. Горбатиков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 4. – С. 40-49.
65. Szwedzicki T. Rock mass behaviour prior to failure / T. Szwedzicki // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2003. – Vol. 40. – P. 573-584.
66. Куксов А. П. Минерально-сырьевая база предприятий объединения / А. П. Куксов, С. Н. Алехин // Горный журнал. – № 7. – 2004. – С. 24-32.
67. Усанов С. В. Обеспечение промышленной безопасности при разработке Соколовского железорудного месторождения подземным способом в условиях обводненной налегающей толщи / С. В. Усанов, А. В. Крутиков, Д. Е. Мельник. – DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.082 // Проблемы недропользования. – 2018. – № 4. – С. 82-89.
68. Исаченко О. С. Соколовский подземный рудник / О. С. Исаченко, С.В. Верин, А. И. Раков // Горный журнал. – 2004. – № 7. – С. 37-42.
69. Костанайский областной еженедельник : сайт // Наша Газета. – 2005, № 47 (191), 24.11. – URL: <http://www.ng.kz/gazeta/191/hronograph?002> (дата обращения: 20.10.2022).

70. Усанов С. В. Подработанные подземными работами территории в г. Березовский и оценка возможности их использования / С. В. Усанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 10. – С. 349-352.
71. Исследование и прогноз активизации процесса сдвижения горных пород и развитие катастрофических последствий в социальной и промышленной инфраструктуре г. Березовского при затоплении Березовского рудника : отчет о НИР ; науч. рук. А. Д. Сашурин // Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2015. – С. 97.
72. Урал горный на рубеже веков : Уральская горная энциклопедия. Т. 2. Горное производство цветной металлургии Урала / Горнопромышленная ассоциация Урала, Урал. гос. горно-геолог. акад. ; под ред. В. С. Хохрякова, И. В. Дементьева, В. Л. Яковлева. – Екатеринбург : Изд-во УГГГА, 2004. – 666 с.
73. Анализ состояния и оценка влияния незаложенных пустот на земную поверхность за пределами медеэлектrolитного завода при консервации Пышминского рудника : отчет о НИР / Пермский Политехнический Институт. – Пермь, 1973. – 89 с.
74. Усанова А. В. Геомеханическая информационная модель влияния ликвидированного подземного рудника в г. Верхняя Пышма / А. В. Усанова, С. В. Усанов // Маркшейдерия и недропользование. – 2014. – № 5 (73). – С. 38-40.
75. Усанов С. В. Современные технологии мониторинга процесса сдвижения / С. В. Усанов, Ю. П. Коновалова, О. Д. Желтышева // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 36-39.
76. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на месторождениях руд черных металлов Урала и Казахстана : утверждены Постановлением Министерства металлургии СССР 02.08.1990 г №1963 : введены в действие 01.01.1991 года. – Свердловск : ИГД Минмета СССР, 1990.
77. Усанов С. В. Мониторинг трансформации структуры горного массива под влиянием процесса сдвижения / С. В. Усанов, В. В. Мельник, А.Л. Замятин / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 6. – С. 83-89.
78. Зеленцов С. Н. Изучение провалов и механизма их образования на подрабатываемой земной поверхности шахты им. А.Д. Рубана / С. Н. Зеленцов, Ю. Ю. Кутепов, Е. Б. Боргер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 5. – С. 271-280.
79. Лобанова Т. В. Особенности обрушения земной поверхности над выработанным пространством слепых рудных тел юго-восточного участка Таштагольского месторождения / Т. В. Лобанова. – DOI: 10.15372/

FPVGN2019060129 // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – 2019. – Т.6, № 1. – С.169-175.

80. Kharisova O. Searching for possible precursors of mining-induced ground collapse using long-term geodetic monitoring data / O. Kharisova, T. Kharisov. – DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106173 // *Engineering Geology.* – 2021. – Т. 289. – С. 106173.

81. Белодедов А. А. Анализ механизма образования деформаций земной поверхности над горными выработками закрытых шахт / А. А. Белодедов, П. Н. Должиков, С. О. Легостаев // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле.* – 2017. – № 1. – С. 160-169.

82. Кожоголов К. Ч. Анализ влияния систем разработок на сдвигание горных пород и образование провалов земной поверхности / К. Ч. Кожоголов, К. Т. Тажибаев, Ш. А. Абдибаитов // *Наука и новые технологии.* – 2008. – № 7-8. – С. 24-26.

83. Абдибаитов Ш. А. Влияние физико-механических свойств и структурных нарушений пород на процесс образования провалов земной поверхности / Ш. А. Абдибаитов, Б. А. Исаев, А. Р. Абдиев // *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета.* – 2017. – Т. 17. – № 8. – С. 140-143.

84. A case study on the characteristics of footwall ground deformation and movement and their mechanisms / Xia, K., Chen, C., Yang, K. [et al.]. – DOI 10.1007/s11069-020-04204-4 // *Natural Hazards.* – 2020. – Vol. 104. – P. 103-1077.

85. Monitoring and statistical analysis of mine subsidence at three metal mines in China / Hui, X., Ma, F., Zhao, H. [et al.]. – DOI: 10.1007/s10064-018-1367-6 // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.* – 2019. – Vol.78. – P. 3983-4001.

86. Cui X. Sudden surface collapse disasters caused by shallow partial mining in Datong coalfield, China // Cui, X., Gao, Y. & Yuan, D. – DOI: 10.1007/s11069-014-1221-5 // *Natural Hazards.* – 2014. – Vol. 74. – P. 911-929.

87. Szwedzicki T. Precursors to rock mass failure in underground mines / T. Szwedzicki // *Archives of Mining Sciences.* – 2008. – Vol. 53, № 3. – P. 449-465.

88. Mine subsidence as a post-mining effect in the Upper Silesia coal basin / G. Stozik, R. Jendrus, A. Manowska, M. Popczyk. – DOI: 10.15244/pjoes/61117 // *Polish Journal of Environmental Studies.* – 2016. – Vol. 25, № 2 – P. 777-785.

89. Sainsbury D. P. Investigation of caving induced subsidence at the abandoned Grace Mine / D. P. Sainsbury, B. L. Sainsbury, L. J. Lorig. – DOI: 10.1179/174328610X12820409992336 // *Mining Technology.* – 2010. – Vol. 119, № 3. – pp. 151-161.

90. InSAR measurements and viscoelastic modeling of sinkhole precursor subsidence: Implications for sinkhole formation, early warning, and

sediment properties / G. Baer, Y. Magen, R. N. Nof, E. Raz, V. Lyakhovsky, E.J. Shalev. – DOI: 10.1002/2017JF004594 // *Geophys. Res. Earth Surf.* – 2018. – № 123. – P. 678-693.

91. Внезапные деформационные процессы в горном массиве при недропользовании: факторы проявления и возможности предупреждения / С. В. Усанов, Ю. П. Коновалова, Е. Ю. Ефремов, О. Д. Харисова, А. В. Усанова. – DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-111-118 // *Горная промышленность.* – 2022. – № 1S. – С. 111-118.

92. Sherman S. I. Destruction of the lithosphere: Faultblock divisibility and its tectonophysical regularities / S. I. Sherman // *Geodynamics & Tectonophysics.* – 2012. – № 3(4). – P. 315-344.

93. Gufeld I. L. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust / I. L. Gufeld, M. I. Matveeva, O. N. Novoselov // *Geodynamics & Tectonophysics.* – 2011. – V. 2, № 4. – P. 378-415.

94. Kuzmin Yu. O. Recent GEODYNAMICS OF FAULT ZONES: faulting in real time scale / Yu. O. Kuzmin // *Geodynamics & Tectonophysics.* – 2014. – Vol. 5, № 2. – P. 401-443.

95. Балек А. Е. Процессы самоорганизации в иерархически блочной геомеханической среде при техногенном воздействии / А. Е. Балек, А. Л. Замятин // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2006. – № 7 – С. 145-154.

96. Макаров П. В. Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения / П. В. Макаров // *Физическая мезомеханика.* – 2010. – Т. 13, № 5. – С. 97-112.

97. Макаров П. В. Эволюционная природа блочной организации геоматериалов и геосред. Универсальный критерий фрактальной делимости / П. В. Макаров // *Геология и геофизика.* – 2007. – Т. 48, № 7. – С. 724-746.

98. Коновалова Ю. П. Оценка влияния короткопериодных геодинамических движений на напряженно-деформированное состояние массива горных пород / Ю. П. Коновалова, В. И. Ручкин. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-90-104 // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* – 2020. – № 3-1. – С. 90-104.

99. Коновалова Ю. П. Особенности учета геодинамических факторов при выборе безопасных площадок размещения ответственных объектов недропользования / Ю. П. Коновалова. – DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-6-17 // *Известия вузов. Горный журнал.* – 2018. – № 6. – С. 6-17.

100. Панжин А. Опыт решения задач геомеханики на горных предприятиях / А. Панжин, А. Сашурин // *Инженерная защита.* – 2016. – № S2 (13). – С. 88-99.

101. Панжин А. А. Устойчивость бортов карьеров в условиях формирования напряженно-деформированного состояния под воздействием

современных геодинамических движений / А. А. Панжин, А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина. – DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-24-59-67 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № S24. С. 59-67.

102. Сашурин А.Д. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния породного массива при комбинированной разработке месторождений / А. Д. Сашурин, А. А. Панжин, Ю. П. Коновалова, Н. А. Панжина. – DOI: 10.17580/gzh.2018.05.05 // Горный журнал. – 2018. – № 5. – С. 43-49.

103. Сашурин А. Д. Геомеханика в горном деле: фундаментальные и прикладные исследования / А. Д. Сашурин // Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 29-32.

104. Панжин А. А. Геомеханическое обоснование метода площадных инструментальных исследований сдвижений горных пород при разработке месторождений : диссертация кандидата технических наук : 25.00.20 / Панжин Андрей Алексеевич ; ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2007. – 175 с.

105. Панжин А. А. Об особенностях проведения геодинамического мониторинга при разработке месторождений полезных ископаемых Урала с использованием комплексов спутниковой геодезии / А. А. Панжин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 6. – С. 46-55.

106. Панжин А. А. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением систем спутниковой геодезии / А. А. Панжин // Маркшейдерия и недропользование. – 2003. – № 2. – С. 43-54.

107. Панжин А.А. Методика и результаты геодинамического мониторинга на карьерах Качканарского ГОКа / А. А. Панжин, Н. А. Панжина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S30. – С. 338-348.

108. Панжин А. А. Визуализация характеристик деформационных полей по данным геодезических наблюдений / А. А. Панжин, Б. Т. Мазуров, А. А. Силаева. – DOI: 10.18454/2313-1586.2015.03.013 // Проблемы недропользования. – 2015. – № 3(6). – С. 13-18.

109. Геодезическое обеспечение геодинамического мониторинга объектов недропользования / А. А. Панжин, А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина, Б. Т. Мазуров // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2016. – № 4 (36). – С. 26-39.

110. Исследование геомеханических условий разработки Киембаевского месторождения открытым способом / Е. Ю. Ефремов, А. А. Панжин, Т. Ф. Харисов, О. Д. Харисова // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 4. – С. 35-45.

111. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика опасных разломов / Ю. О. Кузьмин. – DOI: 10.7868/S0002333716050070 // Физика Земли. – 2016. – № 5. – С. 87-101.

112. Панжин А. А. Исследование геодинамических движений CORS для обоснования методики контроля процесса сдвигения на месторождениях Уральского региона / А. А. Панжин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – № 1 (49). – С. 22-26.

113. Panzhin A. Monitoring of the stress-strain of open pits' adjacent rock mass = Мониторинг напряженно-деформированного состояния прибортового массива карьеров / A. Panzhin, N. Panzhina. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019204001> // E3S Web of Conferences : VIII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesourcef" (PCDG 2020), Khabarovsk, Russia Federation, September 8-10, 2020 г. = VIII Международная научная конференция "Проблемы комплексного освоения георесурсов". – Khabarovsk, 2020. – Vol. 192. – P. 04017.

114. Балек А. Е. Явление самоорганизации деформационных полей массивов горных пород и его использование при решении задач геомеханики / А. Е. Балек. – DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.090 // Проблемы недропользования. – 2016. – № 4(11). – С. 90-96.

115. Panzhin A. Spatial and temporal stability of a reference frame as the basis of deformation monitoring / A. Panzhin, N. Panzhina. – DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012046 // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2022. – T. 991. – 012046.

116. Панжин А. А. Применение исходных данных постоянно действующих станций для геодинамического районирования / А. А. Панжин, Н. А. Панжина // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2021. – № 1. – С. 54-62.

117. Национальный отчет Международной Ассоциации геодезии Международного геодезического и геофизического союза 2007-2010 / Э. А. Боярский, Л. Ф. Витушкин, М. Б. Кауфман [и др.] // Науки о Земле. – 2011. – № 1. – С. 5-36.

118. National report for the International Association of Geodesy of the International Union of Geodesy and Geophysics 2015-2018 / M. D. Gerasimenko, V. L. Gorshkov, V. I. Kaftan [et al.] // Исследования по геоинформатике : труды Геофизического центра РАН. – 2019. – Т. 7, № 1. – С. 1-99.

119. El Shouny A. Accuracy assessment of relative and precise point positioning online GPS processing services / El Shouny A., Miky Y. // Journal of Applied Geodesy. – 2019. – Vol. 13. – № 3. – P. 215-227.

120. Panzhin A. A. The spatial and temporal geodynamic monitoring at the features of subsurface use / A. A. Panzhin // Eurasian Mining. – 2012. – № 1. – P. 20-24.

121. Панжин А. А. Современные методы геодинамического мониторинга при недропользовании / А. А. Панжин, А. Б. Макаров // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2014. – № 4 (1372). – С. 16-22.

122. Инновационная технология диагностики геодинамической активности геологической среды и оценки безопасности объектов недропользования / А. Д. Сашурин, А. Е. Балец, А. А. Панжин [и др.] // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 16-20.

123. Панжин А. А. Исследование короткопериодной геодинамики массива горных пород качканарского горно-обогатительного комбината / А. А. Панжин, Н. А. Панжина // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 2. – С. 318-329.

124. Мазуров Б. Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики / Б. Т. Мазуров. – Новосибирск : Сибпринт, 2019. – 360 с.

125. Панжин А. А. Оценка стабильности опорных пунктов как основы для геодинамического мониторинга / А. А. Панжин, Н. А. Панжина // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 6. – С. 31-40.

126. Сашурин А. Д. Роль геодинамических движений в прорывах вод в выработки при разработке месторождений в сложных гидрогеологических условиях / А. Д. Сашурин, А. А. Панжин, Т. Ф. Харисов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 6. – С. 28-38.

127. Teaching high-accuracy Global Positioning System to undergraduates using online processing services / G. Wang // Journal of Geoscience Education. – 2013. – № 61. – P. 202-212.

128. О сравнении результатов определения координат и скоростей смещения пунктов с помощью двухчастотных приемников космической геодезии / В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев [и др.] // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 63-77.

129. Предварительные результаты GNSS-наблюдений на пунктах геодезической сети северного региона Украины / Р. В. Шульц, А. И. Терешук, А.А. Жалило, А. А. Анненков, А. А. Желанов, И. А. Нисторьяк // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2014. – № 4 (28). – С. 29-38.

130. Современные геодинамические движения территории Курской магнитной аномалии : база данных : № рег. 2022620342 : дата рег. 28.02.2022: дата публ. 28.02.2022. Бюл. № 3 / А. А. Панжин, Н. А. Панжина ; ИГД УрО РАН. – URL: https://www.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2020621723&TypeFile=html.

131. Исследование геодинамики Северного и Среднего Урала по данным GPS / В. И. Уткин, А. А. Белоусова, Д. С. Тягунов, Д. В. Баландин // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 431, № 2. – С. 246-251.

132. Панжин А. А. Исследование геодинамических движений CORS для обоснования методики контроля процесса сдвижения на месторождениях Уральского региона / А. А. Панжин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – № 1(49). – С. 22-26.
133. Мазуров Б. Т. Структурное моделирование полученных по геодезическим данным сдвижений путем визуализации / Б. Т. Мазуров, А.А. Панжин, А. А. Силаева // Геодезия и картография. – 2016. – № 3. – С. 35-40.
134. Современные геодинамические движения Воронежского кристаллического массива : база данных. – № рег. 2020621723 : дата публ. 21.09.2020 / А.А. Панжин, Н.А. Панжина, А.Д. Сашурин; ИГД УрО РАН. – URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB= DB&DocNumber=2020621723&TypeFile=html.
135. Панжин А. А. Оценка стабильности опорных пунктов как основы для геодинамического мониторинга / А. А. Панжин, Н. А. Панжина // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 6. – С. 31-40.
136. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks / J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins [et al.] // Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012). – 1997. – Т. 102, № B3. – С. 5005-5017.
137. Мазуров Б. Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики / Б. Т. Мазуров. – Новосибирск : СГУГиТ. – 2019. – 360 с.
138. Викулин А. В. Ротационные волны в блоковых вращающихся средах (на примере геологической среды) / А. В. Викулин // Процессы в геосредах. – 2016. – № 7. – С. 194-206.
139. Колмогоров В. Г. Алгоритм оценки дивергенции векторных полей движений земной поверхности по геодезическим данным / В. Г. Колмогоров, Б. Т. Мазуров, А. А. Панжин // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79, № 10. – С. 46-53.
140. Мазуров Б. Т. Метод оценки дивергенции векторных полей деформаций земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых / Б. Т. Мазуров, М. Г. Мустафин, А. А. Панжин // Записки Горного института. – 2019. – Т. 238, № 4. – С. 376-382.
141. Сашурин А. Д. Современные проблемы и задачи геомеханики / А. Д. Сашурин, А. А. Панжин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 188-198.
142. Кузьмин Ю. О. Парадоксы сопоставительного анализа измерений методами наземной и спутниковой геодезии в современной геодинамике / Ю. О. Кузьмин // Физика Земли. – 2017. – № 6. – С. 24-39.
143. Панкрушин В. К. Математическое моделирование и идентификация геодинамических систем / В. К. Панкрушин. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 424 с.

144. Шуплецов Ю. П. Прочность и деформируемость скальных массивов / Ю. П. Шуплецов. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 195 с.

145. Зотеев В. Г. Нетипичные деформации бортов глубоких рудных карьеров и меры по их предотвращению / В. Г. Зотеев, О. В. Зотеев // Горный журнал. – 2007. – № 1. – С. 40-45.

146. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология / А. В. Зубков. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2001. – 335 с.

147. Афанасьев С. Л. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов / С. Л. Афанасьев // Циклическая динамика в природе и обществе. – Москва : Научный мир, 1998. – Т.1. – С. 88-94.

148. Зубков А. В. Закономерности формирования напряженного состояния массива горных пород в верхней части земной коры / А. В. Зубков, К. В. Селин, С. В. Сентябов // Литосфера. – 2015. – № 6. – С. 116-129.

149. Зубков А. В. Закон формирования природного напряженного состояния земной коры / А. В. Зубков // Литосфера. – 2016. – № 5. – С. 146-151.

150. Рьльникова М. В. Геомеханика : учебное пособие / О. В. Зотеев, М. В. Рьльникова. – Москва : Руды и металлы, 2003. – 240 с.

151. Афанасьев С. Л. Геохронологическая шкала фанерозоя и проблема геологического времени / С. Л. Афанасьев // Циклическая динамика в природе и обществе. – Москва : Научный мир, 1987. – 144 с.

152. Абдусаматов Х. И. Глобальный минимум мощности солнечного излучения приведет к малому ледниковому периоду / Х. И. Абдусаматов. – Санкт-Петербург : Издательство «Нестор-История», 2013. – 246 с.

153. Борисенков Е. П. Тысячелетняя летопись необычных явлений природы / Е. П. Борисенков, В. Н. Пасецки. – Москва : Мысль, 1988. – 522 с.

154. Добрецов Н. Л. Мантийные суперплюмы как причина главной геологической периодичности и глобальных перестроек / Н. Л. Добрецов // Доклады АН СССР. – 1977. – Т.357, № 6. – С. 797-800.

155. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология / А. В. Зубков. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2001. – 335 с.

156. Зубков А. В. Связь геодинамических событий в литосфере с солнечной активностью / А. В. Зубков // Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр : сборник научных трудов / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2005. – № 3(93). – С. 68-74.

157. Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния земной коры Урала во времени / А. В. Зубков, О. В. Зотеев, О. Ю. Смирнов, Я. И. Липин [и др.] // Литосфера. – 2010. – № 1. – С. 84-93.

158. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология / А. В. Зубков. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2001. – 335 с.

159. Зубков А. В. Периодическое расширение и сжатие Земли как вероятный механизм природных катаклизмов / А. В. Зубков // Литосфера. – 2013. – № 2. – С. 145–156.

160. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых : утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря № 505. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573156117> (дата обращения: 17.01.2022). – (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности).

161. Геодинамическое районирование недр : методические указания / ВНИИ горн. геомеханики и маркшейд. дела, Кузбас. политехн. ин-т ; [составители И. М. Батугина и др.]. – Ленинград : ВНИМИ, 1990. – 127 с.

162. Исследование и совершенствование параметров буровзрывных работ в горизонтальных выработках шахт Донского ГОКа : отчет о НИР / СГИ ; рук. А. С. Шукин, Ю. К. Краев. – Свердловск, 1980. – 35 с.

163. Определение состояния крепи эксплуатационных и строящихся стволов шахт Донского ГОКа и выдача рекомендаций по упрочнению горных пород в зонах тектонических нарушений : отчет о НИР / ИГД МЧМ СССР ; рук. Н. П. Влох, В. Е. Боликов. – Свердловск, 1986. – 58 с.

164. Определение напряженного состояния горного массива Донских хромитовых месторождений : отчет о НИР / ИГД МЧМ СССР ; рук. А. В. Зубков. – Свердловск, 1987. – 34 с.

165. Определение напряжений приконтурного массива горных пород, в крепи и разработка технических решений по проходке стволов ш. "Центральная" : отчет о НИР / ИГД МЧМ СССР ; рук. Н. П. Влох, В. Е. Боликов. – Свердловск, 1988. – 62 с.

166. Исследование НДС массива пород и крепи клетевого ствола шахты «Центральная» ДОН ГОКа : отчет о НИР / ИГД УрО РАН ; рук. В. Е. Боликов – Екатеринбург, 1994. – 31 с.

167. Создание методики определения нагрузок на крепь стволов, определения напряженного состояния массива, управление горным давлением, разработка мероприятий по обеспечению сокращения потерь руды на 5 % : отчет о НИР / ИГД Минметаллургии СССР ; рук. Н. П. Влох. – Свердловск, 1990. – 198 с.

168. Проведение геомеханических исследований по определению закономерностей развития напряженно-деформированного состояния приконтурного массива и тубинговой крепи ствола «Вентиляционный» (5 кс) в процессе проходки ствола в интервале 900–1200 метров, а также ствола «Клетевой» в районе сопряжения с гор. –560 м при проходке околоствольных выработок : отчет о НИР / ИГД УрО РАН ; рук. А. Д. Сашурин – Екатеринбург, 2012. – 95 с.

169. Исследование по напряженному состоянию крепи и структуры массива закрепного пространства клетового ствола шахты "Десятилетие независимости Казахстана" в процессе его расконсервации : отчет о НИР / ИГД УрО РАН ; рук. А. Д. Сашурин, В. Е. Боликов. – Екатеринбург, 2004. – 60 с.

170. Харисов Т. Ф. Обоснование регламента проходки параллельных взаимовлияющих выработок в напряженных трещиноватых скальных массивах / Т. Ф. Харисов, А. Е. Балец, И. Л. Озорнин. – DOI: 10.18799/24131830/2020/10/2851 // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 10. – 71–79.

171. Панин Е. И. Структурные уровни деформации твердых тел / Е.И. Панин, В. А. Лихачев, Ю. В. Гриняев. – Новосибирск : Наука, 1985. – 247 с.

172. Ревуженко А. Ф. О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах / А. Ф. Ревуженко, С. Б. Стажевский, Е. И. Шемякин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1974. – № 3. – С. 130–133.

173. Курленя М. В. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. 1 / М.В. Курленя, В. Н. Опарин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1999. – № 3. – С. 12–26.

174. Курленя М. В. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. 2 / М.В. Курленя, В. Н. Опарин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2000. – № 4. – С. 3–26.

175. Балец А. Е. Процессы самоорганизации в иерархически блочной геомеханической среде при техногенном воздействии / А. Е. Балец, А.Л. Замятин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – № 7. – С. 145–153.

176. Сашурин А. Д. Сдвижение горных пород на рудниках черной металлургии / А. Д. Сашурин. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН. – 1999. – 268 с.

177. Шуплецов Ю. П. Прочность и деформируемость скальных массивов / Ю. П. Шуплецов. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 195 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Анатолий Дмитриевич Сашурин, проф. докт. техн. наук, 08.04.1938–22.08.2021.

Виталий Вячеславович Мельник, к.т.н., заведующий отделом геомеханики, melnik@igduran.ru.

Александр Евгеньевич Балец, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, balek@igduran.ru.

Тимур Шавкатович Далатказин, к.т.н., заведующий лабораторией, 9043846175@mail.ru.

Сергей Валерьевич Усанов, к.т.н., заведующий лабораторией, usv@igduran.ru.

Андрей Алексеевич Панжин, к.т.н., ученый секретарь, panzhin@igduran.ru.

Роман Владимирович Криницын, к.т.н., заведующий лабораторией, roman_krincyn@mail.ru.

Иван Леонидович Озорнин, заведующий лабораторией, ozorno77@mail.ru.

Тимур Фаритович Харисов, к.т.н., старший научный сотрудник, timur-ne@mail.ru.

Юлия Павловна Коновалова, старший научный сотрудник, lisjul@mail.ru.

Алексей Леонидович Замятин, научный сотрудник, a.zamyatin@mail.ru.

Данила Вячеславович Григорьев, научный сотрудник, grigoriev@igduran.ru.

Андрей Сергеевич Ведерников, научный сотрудник, avedernikov@igduran.ru.

Анна Витальевна Усанова, научный сотрудник, anne.usanova@gmail.com.

Альберт Васильевич Зубков, докт. техн. наук, главный научный сотрудник, stress.igd@mail.ru.

Елена Леонидовна Сосновская, к.г.-м.н., старший научный сотрудник, stress.igd@mail.ru.

Научное издание

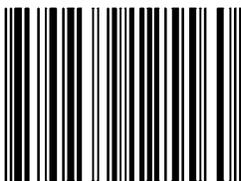
Геомеханические аспекты недропользования

Рекомендовано к изданию решением
Объединенного ученого совета УрО РАН
по наукам о Земле
и Уральским отделением РАН

Компьютерная верстка А. Якубовский

Подписано в печать 10.12.2022. Формат 60x90/16
Бумага ВХИ. Уч.-изд. л. 13,25. Усл. печ. л. 9,3.
Тираж 500. Заказ 26

ISBN 978-5-7691-2556-0



9 785769 125560