

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

1930 95 2025

КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР





ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОПАСНЫХ ЗОН В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

И. Э. Семенова, В. В. Рыбин, Н. Н. Кузнецов,
И. М. Аветисян, С. А. Жукова и др.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОПАСНЫХ ЗОН В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Апатиты
Издательство Кольского научного центра РАН
2025

УДК 622,83
ББК 33
Л73

Печатается по решению Редакционного совета по книжным изданиям ФИЦ КНЦ РАН

Рецензенты:
Барях А. А. — академик РАН;
Батугин А. С. — доктор технических наук, профессор

Л73 Локализация опасных зон в геологической среде горнотехнических систем : монография / И. Э. Семенова, В. В. Рыбин, Н. Н. Кузнецов, И. М. Аветисян, С. А. Жукова и др. — Апатиты : Издательство Кольского научного центра РАН, 2025. — 345 с. : ил.

ISBN 978-5-91137-559-1

В монографии отражены результаты экспериментальных и теоретических исследований геомеханических процессов в геологической среде в районах ведения крупномасштабных горных работ.

В результате исследований процессов организации и локализации геодинамических опасных зон получены новые данные о параметрах напряженно-деформированного состояния, физико-механических свойств массива горных пород. Предложены модели поведения участков массива пород, позволяющие выявлять характеристики его деформирования, причины повышения вероятности разрушения и разрабатывать мероприятия по предотвращению опасных последствий интенсивной отработки месторождений. Изложены подходы к организации системы комплексного мониторинга элементов открытой и подземной геотехнологии. Исследования выполнены на примере крупных горнодобывающих предприятий северо-западной части Арктической зоны Российской Федерации.

Монография может быть полезной специалистам по геомеханике и геофизике, сотрудникам научно-исследовательских и проектных организаций, инженерно-техническим работникам горнорудных предприятий, а также студентам старших курсов и аспирантам горных, инженерно-геологических и строительных специальностей.

УДК 622.83
ББК 33

Фотографии на обложке: А. В. Пантелеев, К. Н. Константинов

© Коллектив авторов, 2025
© Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», 2025
© Горный институт, 2025

ISBN 978-5-91137-559-1
doi:10.37614/978.5.91137.559.1

ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень сокращений и обозначений……..... 8

Введение……...…… 10

1. Определение параметров напряженно-деформированного состояния, физико-механических свойств массива и формирование баз данных геомеханической информации……..…... 14

1.1. Обобщение результатов исследования НДС массива горных пород по данным измерений напряжений на месторождениях Кольского региона……..... 16

1.2. Исследование физико-механических свойств горных пород……..… 22

1.2.1. Изучение прочностных и деформационных свойств скальных горных пород при нагружении в условиях одноосного и трехосного напряженного состояния……...…... 22

1.2.2. Определение склонности скальных горных пород к динамическому разрушению в условиях одноосного и трехосного сжатия……..... 28

1.3. Создание и пополнение базы данных о параметрах напряженно-деформированного состояния пород месторождений Арктической зоны России……..... 35

1.3.1. Структура разрабатываемой базы данных……..... 35

1.3.2. Разработка базы данных горных ударов удароопасных месторождений Хибинского массива……..... 42

1.3.3. Разработка базы данных физико-механических свойств горных пород месторождений Кольского региона…….. 47

2. Инструментальная диагностика опасных зон в геологической среде ГТС. Развитие системы геодинамического мониторинга…… 50

2.1. Выявление зон локальных нарушений устойчивости, оценка роли факторов, влияющих на устойчивость элементов открытой (и подземной) геотехнологии для геомеханического районирования карьеров Кольского региона…….. 50

2.2. Обоснование деформационных предвестников неустойчивости геологической среды ГТС……..... 56

2.2.1. Мониторинг устойчивости прибортового массива Ковдорского карьера геодезическими методами……... 58

2.2.2. Результаты анализа данных радарной системы мониторинга устойчивости борта карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК»……... 67

2.2.3. Оценка состояния породного массива бортов карьера по параметрам сейсмической эмиссии на основе данных системы микросейсмического мониторинга рудника «Железный» Ковдорского ГОКа……. 73

2.2.4. Геодезический мониторинг района размещения Кольской АЭС…… 83

2.2.5. Наклономерно-деформометрический комплекс на Кировском руднике АО «Апатит»…… 87

2.3. Развитие методик комплексной оценки состояния геологической среды по данным локальных методов……...…… 92

2.3.1. Развитие подходов к оценке динамики изменения упругих характеристик массива пород в борту карьера……...……... 92

2.3.2. Комплексный подход к оценке устойчивости борта глубокого карьера с использованием локальных методов исследований……...…… 99

2.4. Развитие методов контроля устойчивости откосов уступов, бортов карьеров и отвалов на основе построения объемных моделей и оценки уровня геомеханического риска……..……...……... 104

2.4.1. Развитие методов контроля устойчивости откосов уступов, бортов карьеров и отвалов на основе построения объемных моделей и оценки уровня геомеханического риска……..…… 104

2.4.2. Оценка устойчивости борта карьера при плоском и объемном вариантах расчета……...…… 106

2.5. Разработка методических основ комплексной системы геомеханического мониторинга геологической среды ГТС…….. 113

2.5.1. Развитие баз данных мониторинга геомеханического состояния объектов открытой геотехнологии и разработка прообраза программного интерфейса обмена данными между компонентами комплексной системы мониторинга геологической среды ГТС……..……... 116

3. Исследование геодинамических процессов на основе данных о техногенной сейсмичности, параметров напряженного состояния, геологических и геодинамических факторов в геомеханическом пространстве природно-технических систем……...……... 129

3.1. Исследование сейсмичности геологической среды природно-технических систем Кольского региона……...…… 129

3.2. Выявление особенностей сейсмической активности рудников Хибинского массива…… 131

3.3. Исследование влияния природных и техногенных факторов на формирование опасных зон в геомеханическом пространстве рудников.....…… 137

3.4. Развитие методики вероятностного прогноза уровня сейсмической опасности на отрабатываемых месторождениях на основе различных прогностических критериев……...…….. 151

3.5. Развитие алгоритмов и программных средств анализа прогностических критериев при совместной 3D-визуализации параметров сейсмичности и напряженно-деформированного состояния……..……... 165

3.6. Разработка и апробация методических подходов к прогнозу опасных геодинамических явлений с учетом параметров сейсмичности, техногенных полей напряжений, геологических и геомеханических особенностей массива горных пород……...….. 168

3.7. Выявление механизмов разрушения массива горных пород и закономерностей формирования опасных зон в окрестности элементов горной технологии с учетом структурных неоднородностей и свойств пород……... 183

4. Развитие подходов, алгоритмов, программ и моделей для численных исследований закономерностей распределения напряжений при ведении горных работ……..... 189

4.1. Развитие принципов численного моделирования НДС с учетом структурной неоднородности массива горных пород на разных масштабных уровнях……... 189

4.1.1. Контакт-элемент, анализ свойств и сравнение модификаций……..... 191

4.1.2. Особенности моделирования НДС массива горных пород в окрестности структурных неоднородностей…….....…… 195

4.2. Разработка алгоритмов и программ для учета влияния параметров неоднородностей геологической среды на напряженно-деформированное состояние горнотехнических систем……..……....… 196

4.2.1. Разработка фиктивного нулевого элемента для сохранения структурированности сетки конечных элементов……..…….. 199

4.2.2. Характеристики контактного элемента……...……... 205

4.3. Разработка разномасштабных 3D-моделей напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с дифференцированным и совместным учетом геомеханических и горнотехнических факторов для месторождений северо-западной части Арктической зоны РФ……..……... 208

4.3.1. Численная геомеханическая модель массива пород в окрестности месторождения Олений ручей как основа обеспечения безопасности подземных горных работ……..……. 211

4.3.2. 3D-модель напряженно-деформированного состояния участка Гакман Юкспорского месторождения для рассмотрения перспективной отработки запасов комбинированным способом……..……. 216

4.3.3. Разработка модели месторождения Плато Расвумчорр для прогнозирования геомеханической ситуации при выемке прибортовых и подкарьерных запасов Центрального карьера……... 218

4.3.4. Разработка объемной конечно-элементной модели Ждановского месторождения……..….... 222

4.3.5. Развитие расчетного модуля ПО Sigma GT для моделей повышенной размерности, более 10 млн элементов……..……..……. 224

5. Обоснование безопасного ведения горных работ при разработке месторождений в сложных геомеханических условиях……. 226

5.1. Геомеханическое обоснование безопасной отработки запасов глубоких горизонтов удароопасных месторождений Хибинского массива……. 226

5.1.1. Выбор оптимального по геомеханическим условиям порядка развития горных работ на месторождении Олений ручей……..…….…. 227

5.1.1.1. Исследование напряженного состояния массива горных пород месторождения Олений ручей по результатам визуального осмотра горных выработок……..…….. 227

5.1.1.2. Оценка состояния приконтурного массива месторождения Олений ручей на основе контроля разрушения скважин….……... 231

5.1.1.3. Контроль напряженного состояния целиков месторождения Олений ручей методом сейсмической томографии….....…… 234

5.1.1.4. Определение оптимального места разрезки на глубоких горизонтах месторождения Олений ручей относительно разломной структуры, пересекающей рудное тело……..…… 238

5.1.2. Геомеханическая оценка параметров взаимного влияния открытых и подземных горных работ на участке Гакман Юкспорского месторождения…….. 242

5.1.2.1. Анализ геомеханических условий западной части участка Гакман Юкспорского месторождения в зоне совместного ведения открытых и подземных горных работ……..….. 242

5.1.2.2. Постановка задач прогнозного численного моделирования для оценки параметров взаимного влияния открытых и подземных горных работ на участке Гакман…...……. 243

5.1.2.3. Определение размеров блока-целика при приближении к карьерной выемке подземных горных работ гор. +320 м…… 246

5.1.2.4. Определение оптимальных опережений вышележащих подэтажей к нижележащим для горизонтов +320, +250 и +170 м……. 250

5.1.3. Защита выработок в тектонически напряженном массиве Кукисвумчоррского месторождения……...…….. 252

5.1.4. Анализ геомеханической ситуации на откаточном горизонте Кировского рудника……...…..... 255

5.2. Обоснование безопасного развития горных работ на удароопасном редкометальном месторождении Ловозерского массива……..…… 258

5.2.1. Анализ данных по пласту II-4 «Малиньиты»……...…. 258

5.2.2. Анализ данных по пласту II-4 «Уртиты»……...…… 262

5.2.3. Анализ состояния внутриблоковых целиков…… 265

5.3. Определение параметров безопасной отработки запасов Ждановского месторождения медно-никелевых руд……..... 268

5.3.1. Результаты визуального обследования незакрепленных подземных выработок рудника «Северный»…….. 269

5.3.2. Численное моделирование НДС массива Ждановского месторождения медно-никелевых руд…….. 276

5.3.2.1. Распределение напряжений в окрестности горных работ ЦРТ, оценка соответствия данным обследования горных выработок……. 276

5.3.2.2. Влияние имитации обрушения подработанных пород на расчетное поле напряжений……..…… 280

5.3.2.3. Геомеханическая оценка вариантов опережений развития горных работ на подэтажах……..……. 283

5.3.3. Оценка качества геологической среды с выделением геомеханических разностей на основе рейтинговых классификаций качества массива горных пород в незакрепленных выработках Ждановского месторождения…… 286

5.4. Развитие методов обеспечения безопасного ведения открытых горных работ на основе накопленной геомеханической информации....……. 291

5.4.1. Определение уровня геомеханического риска потери устойчивости элементами открытой геотехнологии……...……. 291

5.4.2. Мероприятия по управлению устойчивостью элементов открытой геотехнологии……..…….. 294

5.5. Развитие методических основ управления НДС и локализации опасных зон в геологической среде ГТС и экспертной системы оценки удароопасности для обеспечения безопасности горных работ……. 296

Заключение……..…….. 309

Список литературы ……....……....…… 311

Приложение А…….. 322

Приложение Б…….....… 330

Список литературы к Приложению Б……..…… 345

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

2D — двухмерная; 3D — трехмерная
C — сцепление; E — модуль Юнга; v — коэффициент Пуассона;
E_s — сейсмическая энергия
H — глубина; m — мощность; S — площадь
$k_з$ — коэффициент запаса
M_o — сейсмический момент
T — тектоническое напряжение
V_p — скорость продольных волн; V_s — скорость поперечных волн
γ — объемный вес
$\varepsilon_{пол.}$ — полная деформация при одноосном сжатии
$\varepsilon_{упр.}$ — упругая деформация при одноосном сжатии
λ — коэффициент бокового отпора
σ_{max} — максимальная компонента главных напряжений
σ_{min} — минимальная компонента главных напряжений
$\sigma_{пр.}$ — промежуточная компонента главных напряжений
$\sigma_{р.}$ — предел прочности на растяжение; $\sigma_{сж.}$ — предел прочности на сжатие
τ — касательное напряжение
φ — угол внутреннего трения
АО — акционерное общество
АСКСМ — автоматизированные системы контроля состояния массива
БВР — буровзрывные работы
БД — база данных
$B\sigma_{max}$ — угол наклона максимальной компоненты главных напряжений к горизонту
ВВ — взрывчатое вещество
ГГИС — горно-геологическая информационная система
ГНСС (Global Navigation Satellite System) — глобальная навигационная спутниковая система
ГОЗ — геодинамически опасная зона
ГоИ КНЦ РАН — Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук
ГОК — горно-обогатительный комбинат
гор. — горизонт
ГТУ — горно-тектонический удар
ГУ — горный удар
ЗАО — закрытое акционерное общество
ИГС — инженерно-геологический сектор
КГУ — Комиссия по горным ударам

КЗУ — коэффициент запаса устойчивости
КМ — кинематический метод
КоФ ФИЦ ЕГС РАН — Кольский филиал геофизической службы Российской академии наук
КР — Кировский рудник
КРС — контроль разрушения скважин
КРСЦ — Кольский региональный сейсмологический центр
МВ — массовый взрыв
МКА — метод катакластического анализа
МКЦ — междукамерные целики
МКЭ — метод конечных элементов
МСА — метод структурного анализа
НДС — напряженно-деформированное состояние
НМБ — нормативно-методическая база
$H_{ср.}$ — средняя глубина положения измерительной станции от первоначального рельефа
ПАО — публичное акционерное общество
ПО — программное обеспечение
ППГУ — прогноз и предотвращение горных ударов
ППГХО — Приаргунское производственное горно-химическое объединение
ПТС — природно-техническая система
ПШ — полевой штрек
РДКК — рудо-дробильный конвейерный комплекс
РПК — региональный промышленный комплекс
«СЗФК» — «Северо-Западная Фосфорная Компания»
СМУУ ГУ АО «Ковдорский ГОК» — служба мониторинга устойчивости уступов геологического управления АО «Ковдорский ГОК» (сейчас — геомеханическая служба)
СППГУ — служба прогноза и предупреждения горных ударов
ср. — средняя вертикальная компонента напряжений
ср. — средняя горизонтальная компонента напряжений
СРТ — Северное рудное тело
СС — сейсмическое событие
СУБД — система управления базами данных
ТЗ — технологическая зона
ТНЗ — тектонически напряженная зона
УБГТС — управление безопасностью в горнотехнических системах
ЦГМ — Центр геофизического мониторинга
ЦРТ — Центральное рудное тело
ЮВРТ — Юго-восточное рудное тело

ВВЕДЕНИЕ

Горнопромышленному комплексу северо-запада Арктического региона России принадлежит ведущая роль в структуре валового промышленного продукта Мурманской области. Суровая природно-климатическая среда северных территорий, их экологическая уязвимость и усложняющиеся по мере выемке запасов полезных ископаемых горно-геологические условия разработки месторождений обуславливают необходимость применения новейших достижений научно-технического прогресса при добыче и переработке минерального сырья. В том числе повышенные требования предъявляются к геомеханическому обеспечению горных работ для снижения геодинамических рисков и обоснования эффективных и безопасных геотехнологий выемки запасов полезных ископаемых.

Поскольку большинство разрабатываемых и перспективных месторождений северо-запада Арктического региона находится в областях активных современных тектонических процессов, важными научными задачами являются исследование исходных параметров напряженно-деформированного состояния, развитие представлений о закономерностях их трансформации по мере увеличения техногенного воздействия, а также оценки специфики влияния тектонических напряжений как на массив горных пород в целом, так и на особенности перераспределения напряжений в окрестности открытых и подземных обнажений.

Влияние тектонических напряжений на безопасность горных работ неоднозначно: до достижения критических величин действующих сжимающих напряжений при умеренном уровне сжатия ($\sigma_T > 0{,}5\ \sigma_{сж.}$, где $\sigma_{сж.}$ — предел прочности пород на одноосное сжатие) наблюдается минимизация влияния структурной нарушенности на устойчивость элементов горной технологии. С другой стороны, при уровне сжимающих напряжений σ_T более $0{,}5\ \sigma_{сж.}$ фиксируются специфические проявления горного давления в динамической форме — от шелушения и стреляния до горных ударов и техногенных землетрясений.

Многолетние исследования в области прогноза и профилактики катастрофических явлений в геологической среде горнотехнических систем (ГТС) сформировали натурную и научно-методическую базу для формирования единой системы прогноза геомеханической и геодинамической ситуации в тектонически напряженных массивах. Разработка такой

системы остается, безусловно, актуальной задачей, решение которой позволит увеличить надежность геомеханического обоснования, безопасности и эффективности горных работ в условиях усугубляющегося техногенного воздействия на уязвимую геологическую среду Арктического региона.

В предыдущих исследованиях Горного института КНЦ РАН по проблеме геодинамической безопасности основное внимание уделялось изучению закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) геологической среды в горнотехнических системах, как одного из основных факторов, влияющих на весь спектр геомеханических процессов в массивах горных пород. Разработаны разноуровневые прогнозные модели формирования НДС в иерархично-блочной геологической среде ряда горнотехнических систем, выявлены определенные закономерности самоорганизации геологической среды по параметрам сейсмической эмиссии и техногенного деформирования. Определены индикаторы критических состояний участков горнотехнических систем в зонах ведения горных работ и разработаны соответствующие методики геодинамического прогноза. Предложены и геомеханически обоснованные способы безопасного ведения горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород на глубинах до 1 тыс. м от дневной поверхности.

Важным результатом расчета и анализа значений удельной энергии деформирования вмещающих пород и рудного тела на Хибинских месторождениях стал вывод о том, что техногенная нагрузка и критическая концентрация напряжений накопленной энергии массива повышают вероятность перехода в неустойчивое состояние и реализации катастрофических геодинамических событий. То есть реализация катастрофических событий на разных масштабных уровнях в значительной мере зависит от интенсивности ведения горных работ, которые сопровождаются как глобальной трансформацией геомеханического состояния массива, так и локальными концентрациями напряжений в окрестности отдельных элементов геотехнологии.

Полученные результаты нашли применение в методических материалах, регламентах и практике разработки Хибинских и Ловозерских месторождений, Ковдорского месторождения апатитовых и магнетитовых руд, Ждановского месторождения медно-никелевых руд, что позволило существенно снизить геомеханические и геодинамические риски. Однако, несмотря на широкомасштабные интенсивные исследования, актуальность проблемы геодинамической безопасности не снижается, о чем свидетельствуют происходящие периодически мощные динамические события в окрестности геомеханических пространств рудников. Эти угрозы имеют тенденцию роста по мере углубления горных работ, увеличения объемов и интенсивности

техногенного воздействия, взаимного влияния формируемых очистных пространств на ограниченных участках природно-технических систем и ухудшения горно-геологических условий разработки месторождений. Поэтому структурирование многолетних натурных наблюдений, развитие научных и методических основ, а также комплексного подхода в исследовании геомеханических процессов ГТС необходимы для обоснования мероприятий по прогнозу и профилактике геодинамических рисков и обоснованию безопасного ведения горных работ с учетом изменяющихся факторов.

Большинство практических результатов, представленных в монографии, внедрено или находится в процессе внедрения на горнодобывающих предприятиях северо-запада Арктического региона России.

Монография написана авторским коллективом в составе: к. т. н. И. Э. Семенова (главы 1, 4), д. т. н. В. В. Рыбин (главы 2, 4), к. т. н. Н. Н. Кузнецов (глава 1).

Отдельные разделы написаны: к. т. н. И. М. Аветисян (разделы 1.5, 1.6, 4.1), к. т. н. С. А. Жукова (раздел 1.1, глава 3), к. т. н. О. Г. Журавлёва (раздел 1.1, глава 3), к. т. н. И. Ю. Розанов (разделы 2.2.1, 2.2.2, 2.2.4), К. Н. Константинов (разделы 2.1, 2.3.1, 2.3.2, 2.5), А. С. Калюжный (раздел 2.4), М. М. Каган (разделы 2.2.3, 2.2.5, глава 3), к. т. н. С. В. Дмитриев (разделы 1.3, 1.4, 1.5), к. т. н. М. С. Кулькова (разделы 1.5.4, 4.3), вед. инж. М. А. Кузнецов (разделы 2.2.1, 2.2.4).

В написании некоторых разделов приняли участие: А. В. Пантелеев (раздел 2.1, глава 4), И. Г. Панасенко (разделы 1.1, 1.2, 2.2.3, 2.3.5), Ю. А. Старцев (разделы 2.3.1, 2.3.2), Д. С. Чернобров (раздел 2.2.3), Р. Н. Достовалов (раздел 2.2.1, 2.2.4).

В монографии использованы результаты большого объема натурных, лабораторных и модельных исследований, в выполнении которых приняли участие: Ю. Г. Смагина, М. И. Потокин, И. В. Данилов, В. А. Некрасов, А. А. Шестов, А. К. Пак, В. П. Гуменников, С. В. Потемковский, С. А. Власов, А. О. Орлов, А. Ю. Веремеев.

Компьютерная верстка текста монографии выполнена И. Б. Стефанович.

Все натурные исследования и испытания проведены при участии инженерно-технических работников и при активном содействии руководства АО «Апатит», ЗАО «Северо-Западная Фосфорная Компания», АО «Ковдорский ГОК», ООО «Ловозерский ГОК», АО «Кольская ГМК», которым авторы выражают свою благодарность.

Особая роль в подготовке монографии принадлежит Заслуженному деятелю науки Российской Федерации д. т. н., профессору А. А. Козыреву, который на протяжении более 30 лет возглавлял отдел геомеханики. Под его непосредственным участием были определены направление

и тема монографии. Консультации, рекомендации и критические замечания Анатолия Александровича позволили улучшить качество материала.

Авторы признательны официальным рецензентам — академику РАН А. А. Баряху и профессору, д. т. н. А. С. Батугину, сделавшим ряд ценных замечаний и пожеланий по рукописи, которые были учтены в ее окончательной редакции.

В монографии изложено авторское понимание и взгляд на геомеханические процессы, происходящие в массиве горных пород, отражен авторский опыт научного обоснования обеспечения безопасности горных работ.

Авторы надеются, что монография будет полезна не только научным сотрудникам, но и инженерно-техническим работникам горнодобывающих предприятий, а также студентам и аспирантам горных, геологических и геофизических специальностей.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАССИВА И ФОРМИРОВАНИЕ БАЗ ДАННЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Процессы организации и локализации опасных зон в геологической среде горнотехнических систем напрямую связаны как с исходным геомеханическим состоянием массива горных пород: видом и параметрами поля напряжений, физико-механическими свойствами пород и руд, рельефом дневной поверхности, так и с техногенным воздействием: его интенсивностью, порядком ведения горных работ, системой разработки и ее параметрами. В этой связи натурные данные о состоянии массива горных пород являются основой для принятия решений по разработке месторождений полезных ископаемых на различных стадиях выемки запасов — от разработки проекта до планирования развития горных работ, а позже и консервации рудника или карьера. Геомеханические исследования и прогнозы на каждом из этих этапов становятся неотъемлемой частью обоснования и выбора оптимальной технологии отработки и ее параметров, направления горных работ, системы мониторинга, крепления и других аспектов. При этом данные о геологических, геомеханических и геодинамических особенностях месторождения постоянно пополняются, уточняются, что дает возможность минимизировать риски и обеспечивать эффективность и безопасность горных работ.

Особенно актуально геомеханическое обоснование и сопровождение горных работ на месторождениях склонных и опасных по горным ударам, где необходимый объем и качество натурных данных о состоянии массива горных пород приобретают ключевое значение для обеспечения планомерного ведения горных работ, снижения вероятности горных ударов и техногенных землетрясений и связанных с ними потерь персонала и оборудования, а также нарушений технологических процессов. В этой связи все больше внимания уделяется систематизации натурных данных для более полного научного анализа и использования их при регламентировании, проектировании, планировании и сопровождении горных работ.

Одно из определений геомеханики констатирует, что это фундаментальная часть горной науки, изучающая физико-механические свойства горных пород и массивов, их напряженно-деформированное состояние (НДС) и разрушение, развивающееся под влиянием природных и горнотехнических факторов.

Таким образом, без полноценной информации по этим составляющим и организации их всесторонней обработки и анализа невозможно обеспечить качественные геомеханические исследования.

В отделе геомеханики ГоИ КНЦ РАН с 60х гг. прошлого века велись исследования и сбор фактических геомеханических данных на месторождениях

северо-западной части Арктической зоны РФ при крупномасштабном техногенном воздействии. За несколько десятилетий собраны данные о физико-механических свойствах руд и пород, слагающих месторождения; имеются данные прямых и косвенных определений типа и параметров НДС, в том числе измерений напряжений методом торцевой разгрузки; накоплены данные о проявлениях горного давления в динамической форме по нескольким рудным полям Кольского полуострова, в том числе карточки горных ударов по Хибинским и Ловозерским месторождениям.

Эволюция внедрения цифровых технологий как в научные исследования, так и в производственные процессы и значимость всего собранного объема данных требуют разработки комплексной базы данных (рис. 1.1), включающей в структурированном виде сам материал, методы его переработки и анализа, а также создание единого интерфейса, позволяющего оперативно формировать блок геомеханических данных по месторождению, участку, горизонту; визуализировать информацию в ГГИС (например, Mineframe), использовать ее при постановке исходных и граничных условий численного моделирования НДС.

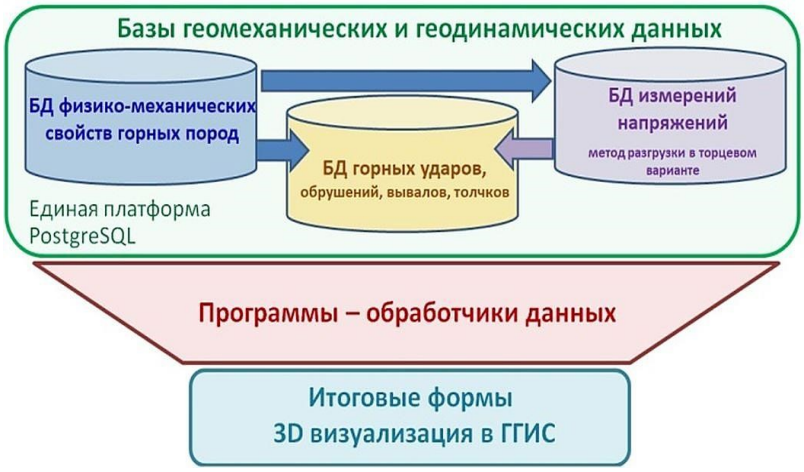


Рис. 1.1. Общая схема комплексной базы геомеханических данных

При выборе способа хранения данных учитывались следующие требования:

— возможность корректного совместного использования;

— наличие способа разграничения прав доступа, редактирования и преобразования данных для различных категорий пользователей;

— возможность удаленного доступа к данным как через локальную сеть института, так и через глобальные информационные сети;

— возможность комбинированной выборки данных для дальнейшего использования;

— обеспечение целостности и связности различных типов данных;

— возможность миграции на другую платформу.

Если с первыми двумя пунктами может справиться файловая система хранения данных, то в остальных пунктах ее недостаточно. Поэтому необходимо было

выбрать сервер баз данных. Наиболее приемлемым с учетом приведенных требований является сервер баз данных PostgreSQL.

К достоинствам PostgreSQL следует отнести следующие факторы:

— имеются варианты реализации практически для всех платформ (все Unix-подобные и Windows);

— осуществляется поддержка триггеров и процедур, что позволяет обеспечивать связность и целостность данных в самой базе, а не на стороне клиентского ПО, имеется широкий выбор языков для написания этих процедур;

— PostgreSQL поддерживает язык клиентских запросов с поддержкой последних стандартов SQL;

— поддержка широкого набора типов данных, а также возможность определения пользовательских типов;

— развитая система разграничения прав на различные виды действий с данными;

— PostgreSQL — ПО с открытым программным кодом и свободной лицензией; из всех подобных систем с открытым программным кодом PostgreSQL имеет наиболее широкие возможности;

— данная СУБД существует и развивается уже более 20 лет и может рассматриваться как устойчивая и надежная платформа для хранения различных типов данных.

1.1. Обобщение результатов исследования НДС массива горных пород по данным измерений напряжений на месторождениях Кольского региона

В данном разделе представлены результаты измерений напряжений, выполненные на месторождениях Кольского региона (апатит-нефелиновые месторождения Апатитовый цирк, Олений ручей и Ньоркпахкское; Ждановское медно-никелевое месторождение; Ковдорское магнетит-апатит-бадделеитовое месторождение, Ловозерское месторождение редкоземельных металлов) с 2016 г. Измерения напряжений проводили методом разгрузки в торцевом варианте. В основу метода положена способность выбуренного керна восстанавливать свои первоначальные размеры после снятия нагрузки с него. По измеренным деформациям с использованием математического аппарата теории упругости вычисляли действующие в месте отбора керна напряжения.

В пределах Печенгского Восточного рудного узла, расположенного в северо-западной части Кольского региона, в период с 2016 г. по настоящее время измерения напряжений выполнены на 7 станциях на различных высотных отметках, в том числе и на значительной глубине — около 1 км. Измерениями охвачены различные участки Ждановского месторождения: юго-восточный, юго-западный и центральный, а также подстилающее его Заполярное месторождение.

За последние 3 года выполнены измерения напряжений на 2 горизонтах, а также анализ и обобщение полученных данных. В октябре 2019 г. измерения напряжений проводили на 1 замерной станции в Погрузочно-разгрузочной

камере, пройденной из заезда на гор. –260 м в районе Юго-восточного рудного тела (ЮВРТ). В ноябре 2020 г. измерения были выполнены на гор. –410 м в районе автосъезда № 1 Центрального рудного тела (ЦРТ). Расположение станций выбрано таким образом, чтобы они были по возможности удалены от влияния фронтов горных работ и каких-либо крупных геологических нарушений, которые могли бы привести к значительным искажениям данных, полученных в ходе измерений природных напряжений.

Результаты всех измерений, выполненных на руднике «Северный» с использованием метода полной разгрузки, представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Результаты измерений напряжений за 2016–2020 гг. на Ждановском месторождении

№ изм. станции	Горизонт, м	Главные напряжения			Азимут вектора σ_{max}, град	Угол наклона вектора σ_{max} к горизонту, град
		σ_{max}, МПа	σ_{mid}, МПа	σ_{min}, МПа		
124 (ЮЗРТ)	–260	29	9	3	83	32
128 (ЮВРТ)	–260	21	10	8	113	19
123 (ЦРТ)	–310	40	10	9	88	5
129 (ЦРТ)	–410	32	27	9	10	–19
111 (ЦРТ)	–440	43	29	10	124	–23
118 (Заполярное мест-е)	–680	54	27	10	125	16
114 (Заполярное мест-е)	–760	57	29	21	150	27

Результаты, полученные в 2019–2020 гг., дополняют полученные с 2016 г. данные об НДС массива и подтверждают сделанный ранее вывод о действии на Ждановском месторождении высоких субгоризонтальных напряжений.

На рис. 1.2 представлен график изменения максимальных напряжений с глубиной. Синей линией показано изменение σ_{max}, полученных при измерениях, а оранжевой — рассчитанная гравитационная составляющая поля напряжений на соответствующих высотных отметках. Для отметки –260 м значения максимальных напряжений усреднены.

Как видно из графика (рис. 1.2), значения максимальных напряжений растут с глубиной. Наклон вектора σ_{max} к горизонту не превышает 31°. Таким образом, субгоризонтальные напряжения значительно превышают гравитационную составляющую, что свидетельствует о наличии в массиве гравитационно-тектонического поля напряжений.

На рис. 1.3 представлена горизонтальная плоскость, на которую нанесены проекции векторов σ_{max}. Как видно из рисунка, большая часть векторов ориентирована с северо-запада на юго-восток примерно, как рудные тела Ждановского месторождения. Отдельные колебания векторов связаны с изменчивостью положения рудных тел. Значительное отличие наблюдается на измерительной станции № 5 на горизонте –260 м в районе Юго-восточного рудного тела. Такое сильно отличающиеся от всех остальных направление вектора, возможно, связано с геологическими особенностями массива в данном районе.

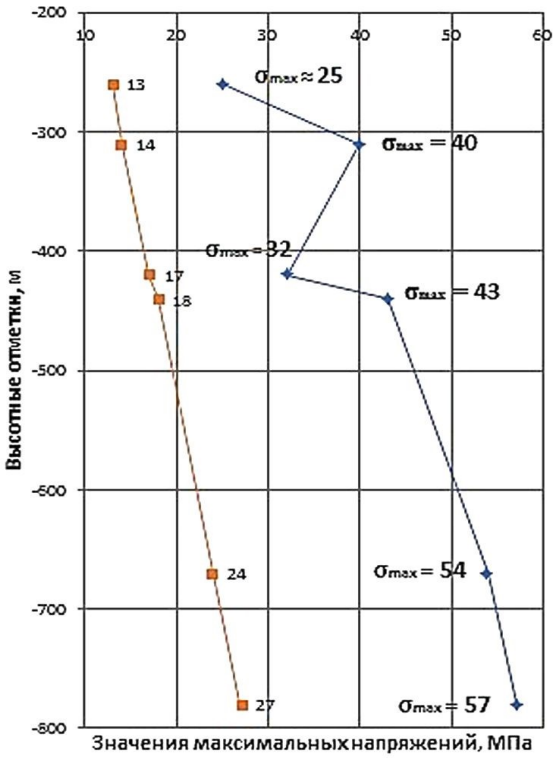


Рис. 1.2. Изменение максимальных напряжений с глубиной

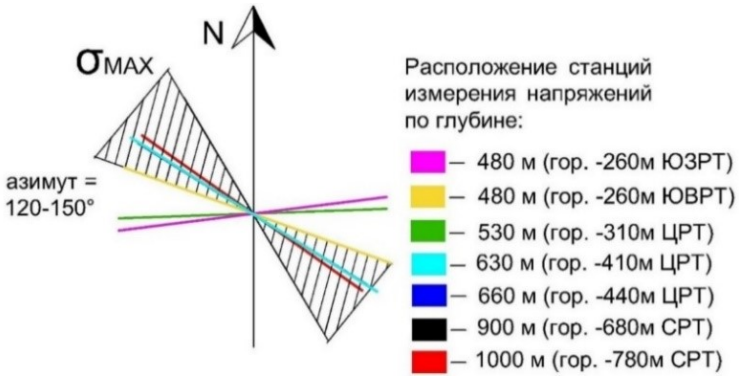


Рис. 1.3. Проекции векторов максимальных напряжений на план

Таким образом, по результатам измерений напряжений методом разгрузки на 7 замерных станциях можно сделать вывод о действии в массиве пород Ждановского месторождения высоких субгоризонтальных напряжений, значения которых существенно превышают вертикальную гравитационную составляющую (рис. 1.2) и увеличиваются с глубиной. Напряженное состояние Ждановского месторождения можно отнести к гравитационно-тектоническому виду.

На месторождении Апатитовый цирк (Расвумчоррский рудник КФ АО «Апатит», Хибинский массив) измерения напряжений проводили

на горизонтах, находящихся на глубине 500–600 м от дневной поверхности. Одна станция находилась на гор. +425 м и две — на горизонте +310 м. Результаты измерений значений действующих напряжений представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Результаты измерений напряжений на месторождении Апатитовый цирк

№ изм. станции	Горизонт, м	Главные напряжения			Азимут вектора σ_{max}, град	Угол наклона вектора σ_{max} к горизонту, град
		σ_{max}, МПа	σ_{mid}, МПа	σ_{min}, МПа		
108	+425	41,6	22,5	12,7	164,9	32,2
109	+310	59,5	25,9	10,1	118,7	11,9
110	+310	33,5	15,2	12,7	167,9	33,5

Установлено, что результаты измерений напряжений по станциям 108 и 110, расположенным в лежачем боку рудного тела, хорошо коррелируют друг с другом в части направления действия максимальной компоненты напряжений. Абсолютные величины напряжений здесь существенно ниже, чем на станции 109 в висячем боку рудной залежи. Также следует отметить, что направление действия σ_{max} в висячем боку под консолью совпадает с направлением простирания рудного тела, а наклон вектора σ_{max} к горизонту не превышает 34°. Таким образом, субгоризонтальные напряжения σ_{max} в этом случае, как и для Ждановского месторождения, значительно превышают гравитационную составляющую, что свидетельствует о наличии в массиве гравитационно-тектонического поля напряжений.

На расположенных в непосредственной близости **месторождениях Олений ручей и Ньоркпахкское** (Хибинский массив) в первом случае измерения напряжений проводили на горизонте +240 м (2 станции), а во втором случае — на горизонтах +440, +470 и +500 м (4 станции). Результаты измерений напряжений представлены в табл. 1.3 и 1.4.

Таблица 1.3

Результаты измерений напряжений на месторождении Олений ручей

№ изм. станции	Горизонт, м	Главные напряжения			Азимут вектора $\sigma_{max}\sigma_{max}$, град
		σ_{max}, МПа	σ_{mid}, МПа	σ_{min}, МПа	
1	+240	36	10	–2	75
2	+240	30	16	12	90

Таблица 1.4

Результаты измерений напряжений на Ньоркпахкском месторождении

№ изм. станции	Горизонт, м	Главные напряжения		Угол наклона вектора σ_{max} к горизонту, град
		σ_{max}, МПа	σ_{min}, МПа	
1	+500	18	12	–16
2	+470	24	10	–18
3	+440	33	20	56
4	+470	22	12	106

При измерении методом разгрузки на горизонте +240 м (месторождение Олений ручей) установлено, что значения максимальных сжимающих напряжений составили 30–36 МПа (табл. 1.3), а вектора этих напряжений имели субгоризонтальную ориентацию. Измерения на Ньоркпахкском месторождении также показали наличие высоких горизонтальных напряжений, действующих в массиве горных пород (табл. 1.4).

Как следует из данных (табл. 1.3, 1.4), значения максимальных напряжений на месторождениях Ньоркпахкское и Олений ручей более чем в 3 раза превышают уровень напряжений, возникающих под действием собственного веса пород. Этот факт подтверждает наличие в массиве пород тектонических напряжений, величина которых выше гравитационных в несколько раз.

При анализе данных, полученных при измерении напряжений на рудниках Хибинского массива (Кировский и Расвумчоррский) за 1960–1990 гг. [1], можно сделать следующий вывод: повсеместно наблюдается превышение горизонтальными напряжениями вертикальных во вмещающих породах лежачего бока (до 10 раз и более). Просматривается взаимосвязь измеренных горизонтальных напряжений с прочностными и деформационными свойствами пород, а именно более жестким высокоупругим разностям соответствует больший уровень измеренных напряжений.

Также установлено, что во вмещающих породах Расвумчоррского рудника значения максимальных напряжений изменяются в пределах от 40 до 70 МПа, а в рудах — от 20 до 40 МПа [1]. На Кировском руднике средняя величина максимальных сжимающих напряжений во вмещающих породах колеблется от 35 до 65 МПа, а в апатитовых рудах — от 20 до 40 МПа [1]. Графики изменения напряжений с глубиной представлены на рис. 1.4.

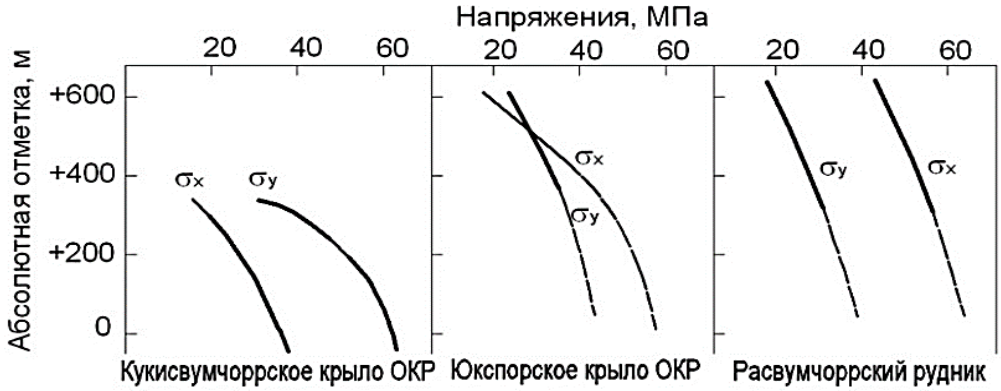


Рис. 1.4. Изменение напряжений с глубиной на рудниках Хибинского массива: σ_x, σ_y — компоненты нормальных напряжений (направление оси x — по простиранию рудного тела; y — вкрест простирания рудного тела) [2]

На Ковдорском месторождении (рудник «Железный» АО «Ковдорский ГОК») измерения параметров напряженно-деформированного состояния выполнены в 2015–2018 гг. на участках борта карьера высотой от 230 до 300 м в массиве скальных слаботрещиноватых пород. Результаты измерений представлены в табл. 1.5.

На основании данных об измеренных напряжения (табл. 1.5) в массиве скальных пород Ковдорского месторождения установлено, что максимальные напряжения, как и в предыдущих случаях, имеют субгоризонтальную ориентацию, а их значения в несколько раз превышают значения напряжений, вызванных действием собственного веса пород [3]. В связи с этим поле действующих напряжений в Ковдорском массиве также можно отнести к гравитационно-тектоническому виду.

Таблица 1.5

Результаты измерений напряжений на Ковдорском месторождении

Абсолютная отметка измерительной станции, место измерений, участок борта карьера	Средняя глубина измерительной станции от первоначального рельефа, м	Главные напряжения		Угол наклона вектора σ_{max} к горизонту, град
		σ_{max}, МПа	σ_{min}, МПа	
Н/С-33: +43 м, 2015, ЮБ	290	18	5	18
Н/С-34: +14 м, 2015, ЮВБ	300	26	17	–14
Н/С-35: –75 м, 2017, ВБ	300	22	8	8
Н/С-36: –20 м, 2017, СБ	230	27	5	1
Н/С-37: –47 м, 2018, СБ	250	19	6	3
Н/С-38: –47 м, 2018, СБ	250	19	14	42

На Ловозерском месторождении редкоземельных металлов (рудник «Умбозеро» и рудник «Карнасурт», Ловозерский массив) измерения напряжений по ряду причин в последние несколько десятилетий не проводили. Однако известны данные таких измерений, полученных Горным институтом КНЦ РАН [1] в 1970–1980 гг.

Согласно работе [1], по результатам натурных измерений напряжений методом разгрузки на руднике «Карнасурт» на глубине до 350 м от поверхности установлено, что напряженное состояние пород Ловозерского массива обусловлено совместным действием гравитационных и тектонических сил. При этом величина максимальной составляющей напряжений в массиве, имеющей субгоризонтальное направление в пространстве, до 5 раз превышает величину вертикальных напряжений, создаваемых за счет веса пород.

Результаты измерений на другом участке Ловозерского массива (рудник «Умбозеро»), удаленном от первого на расстояние нескольких километров, показали, что здесь имеет место более высокий уровень субгоризонтальных тектонических напряжений — до 50 МПа при глубине горных работ 250 м. То есть на рассматриваемом участке горизонтальные напряжения превышают вертикальные в 10 раз.

Также по результатам более поздних измерений напряжений в Ловозерском массиве, выполненных на глубине порядка 400–500 м от дневной поверхности, установлено, что величина максимальных сжимающих напряжений для условий рудника «Карнасурт» может достигать 70 МПа, а для условий рудника «Умбозеро» — 80–90 МПа.

Таким образом, на основании анализа литературных источников [1] и результатов измерений напряжений методом разгрузки, выполненных с 2016 г., выявлено, что для месторождений Кольского региона (апатит-нефелиновые месторождения Апатитовый цирк, Олений ручей и Ньоркпахкское; Ждановское медно-никелевое месторождение; Ковдорское магнетит-апатит-бадделеитовое месторождение, Ловозерское месторождение редкоземельных металлов) характерен гравитационно-тектонический тип поля действующих напряжений. При этом максимальные тектонические напряжения, ориентированные преимущественно субгоризонтально, в несколько раз,

а то и на порядок, превышают по величине напряжения, создаваемые действием собственного веса пород.

Также при сопоставлении результатов измерений напряжений на месторождениях Кольского региона выявлено, что наибольшие значения тектонических напряжений соответствует Ловозерскому месторождению — до 90 МПа. Для месторождений Хибинского массива значения максимальных сжимающих напряжений достигают 70 МПа, на Ковдорском месторождении — порядка 30 МПа, а на Ждановском месторождении — порядка 60 МПа. Таким образом, в большей степени напряженными являются Ловозерский и Хибинский массивы Кольского региона.

1.2. Исследование физико-механических свойств горных пород

1.2.1. Изучение прочностных и деформационных свойств скальных горных пород при нагружении в условиях одноосного и трехосного напряженного состояния

С целью исследования прочностных и деформационных свойств скальных горных пород, характера их деформирования и разрушения, а также пополнения базы данных проведены испытания образцов в условиях одноосного сжатия и растяжения, трехосного сжатия. В качестве основных объектов изучения выбраны следующие месторождения Кольского региона: апатит-нефелиновые месторождения Кукисвумчоррское, Юкспорское и Апатитовый цирк, железорудные месторождения Куркенпахк, Южно-Кахозерское и Кировогорское, Ковдорское магнетит-апатит-бадделеитовое месторождение и Ждановское медно-никелевое месторождение. Для проведения испытаний с обозначенных выше месторождений отбирали керн и штуфы скальных пород (руды и вмещающие породы) и изготавливали образцы в форме цилиндров и призм (рис. 1.5).



а *б*

Рис. 1.5. Подготовленные образцы скальных горных пород: *а* — в форме цилиндров; *б* — в форме призм

Испытания выполняли на сервогидравлической установке MTS 816 Rock Test System (рис. 1.6) в конфигурациях на одноосное сжатие, одноосное растяжение и трехосное сжатие.



Рис.1.6. Сервогидравлическая испытательная установка MTS 816 Rock Test System

При одноосном сжатии и растяжении испытания образцов скальных пород (рис. 1.7) проводили в режиме заданной скорости нагружения 2,5 МПа/с. В ходе испытаний регистрировали значения прикладываемой на образцы нагрузки, их продольные и поперечные деформации, а также время нагружения. По результатам проведенных экспериментов определяли значения пределов прочности образцов пород при сжатии и растяжении, модулей упругости и коэффициентов Пуассона. Всего было исследовано 15 литотипов пород месторождений Кольского региона.

На основании анализа полученных экспериментальных данных (табл. 1.6) установлено, что наибольшие значения пределов прочности при сжатии (свыше 190 МПа) и модулей упругости (свыше 80 ГПа) соответствуют вмещающим породам удароопасных апатит-нефелиновых месторождений — ийолитам и уртитам. Наименьшие величины прочностных характеристик (ниже 60 МПа при сжатии и 6 МПа при растяжении) и модуля упругости (ниже 50 ГПа) установлены для ювитов с содовым налетом (апатит-нефелиновые месторождения) и кальцитового карбонатита (Ковдорское месторождение). Остальные породы занимали промежуточное по свойствам положение.



а *б*

Рис. 1.7. Испытание образцов скальных горных пород: *а* — при одноосном сжатии; *б* — при одноосном растяжении методом сжатия по образующим

Таблица 1.6

Результаты определения прочностных и деформационных свойств скальных горных пород Кольского региона

Горная порода	Предел прочности, МПа		Модуль упругости ГПа	Коэффициент Пуассона	Критическое значение удельной энергии деформирования, МДж/м^3
	при сжатии	при растяжении			
Уртиты	90–200	4,5–10,0	40–83	0,15–0,28	0,09–0,25
Апатит-нефелиновые руды	90–150	5,0–7,0	50–65	0,19–0,25	0,06–0,16
Ювиты	50–130	5,0–7,0	30–65	0,11–0,20	0,04–0,24
Пегматиты	50–130	6,5–8,5	57–88	0,16–0,28	0,06–0,18
Ийолит	230	13,0	90	0,22	0,29
Мончикитовая дайка	185	12,7	70	0,17	0,23
Лампрофиллит-эгирин-полевошпатовая жила	180	14,6	80	0,22	0,20
Апатит-карбонатно-магнетитовая руда	130	9,3	130	0,26	0,06
Кальцитовый карбонатит	50	4,6	50	0,22	0,03
Гнейсы	160–190	10,5–11,5	68–75	0,17–0,20	0,18–0,24
Туфогенно-осадочная порода	140	12,7	83	0,24	0,11
Габбро	100	18,0	65	0,28	0,08
Диабаз	75	15,3	65	0,27	0,04
Медно-никелевая руда	185	12,8	85	0,26	0,20
Перидотит	95	14,0	83	0,28	0,05

Используя полученные данные о прочностных и деформационных свойствах скальных пород, определяли их критические значения удельной энергии

деформирования, которые являются показателями энергоемкости разрушения пород. На основании этих значений можно оценивать потенциальную удароопасность блоковых структур массива.

$$w_{*сж.} = \frac{\sigma_{сж.}^2}{2E}, \quad (1.1)$$

$$w_{*тр.} = \frac{1}{2E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)), \quad (1.2)$$

где $\sigma_{сж.}$ — предел прочности при одноосном сжатии, МПа; σ_1, σ_2, σ_3 — осевое и боковые давления на образец, МПа; E — модуль упругости, ГПа; ν — коэффициент Пуассона.

Выполнен сравнительный анализ энергоемкости и характера разрушения исследуемых скальных горных пород при одноосном сжатии. По результатам анализа установлено, что породы с величиной критической удельной энергией деформирования свыше 0,05 МДж/м^3 разрушались в динамической форме с разлетом осколков и взрывоподобным звуком (рис. 1.8). Наиболее интенсивное разрушение установлено для образцов уртита, ийолита (апатит-нефелиновые месторождения) и гнейса (Кировогорское железорудное месторождение). Величины критической удельной энергии деформирования таких пород являются самыми высоким (свыше 0,25 МДж/м^3).

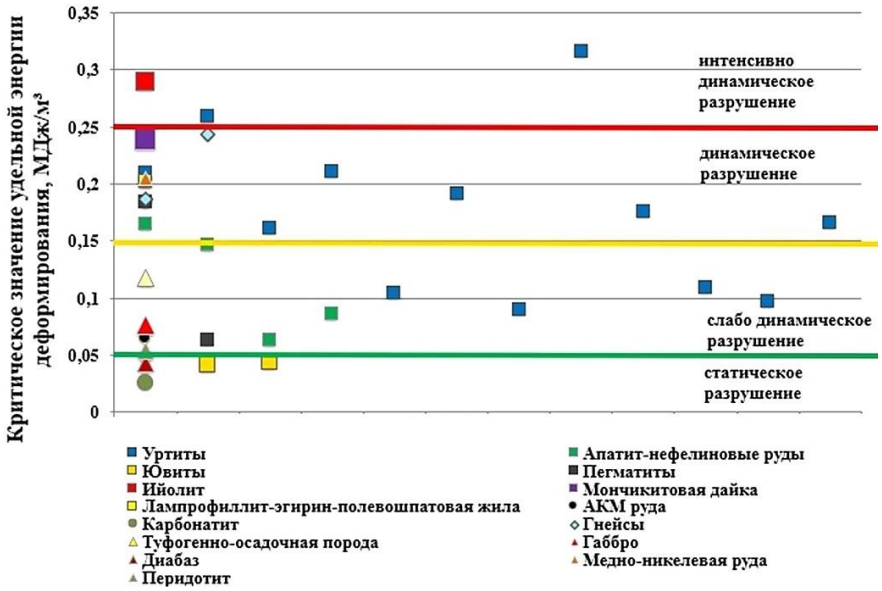


Рис. 1.8. Характер разрушения образцов исследуемых скальных горных пород при одноосном сжатии

Статический характер разрушения установлен для двух типов пород (рис. 1.8) — ювитов (апатит-нефелиновые месторождения) и кальцитового карбонатита (Ковдорское месторождение), критическая удельная энергия деформирования которых в среднем ниже 0,05 МДж/м^3. Таким образом, по результатам испытаний скальных горных пород месторождений Кольского

региона установлено пороговое значение критической удельной энергии деформирования для отнесения пород, к склонным и не склонным к динамическому разрушению. В условиях одноосного сжатия при значениях критической удельной энергии до 0,05 МДж/м^3 преобладает статическое разрушение. При больших величинах этого параметра для пород характерны динамические разрушения, интенсивность которых возрастает с его увеличением.

Изучение прочностных и деформационных свойств в условиях трехосного сжатия (рис. 1.9) проведено для 9 литотипов скальных горных пород месторождений Кольского региона: апатит-нефелиновая руда, уртит, ийолит, гнейс, карбонатит, пироксенит, туфогенно-осадочная порода, диабаз и перидотит.



а *б*

Рис. 1.9. Испытание образцов скальных горных пород в условиях трехосного сжатия: *а* — ячейка трехосного сжатия; *б* — подготовленный для испытания образец

Установлено, что в условиях трехосного сжатия при боковом давлении порядка 20–30 МПа значения пределов прочности образцов по сравнению со значениями прочности при одноосном сжатии увеличились в среднем в 2–3 раза (рис. 1.10), а критическая удельная энергия деформирования —в 5–10 раз (рис. 1.11).

Проведены испытания образцов уртита среднезернистого массивного при боковом давления от 40 до 80 МПа, по результатам которых установлено, что при высоких значениях бокового давления ($\sigma_2 = \sigma_3 = 80$ МПа) для образцов уртита наблюдается небольшой участок выполаживания графика деформирования на пределе прочности, после чего происходит его обрыв и разрушение образцов в динамической форме (рис. 1.12). В этом случае значение предела прочности образца уртита при боковом давлении 80 МПа увеличилось в 4 раза по сравнению

со значением прочности при одноосном сжатии, а критическое значение удельной энергии деформирования возросло в 14 раз.

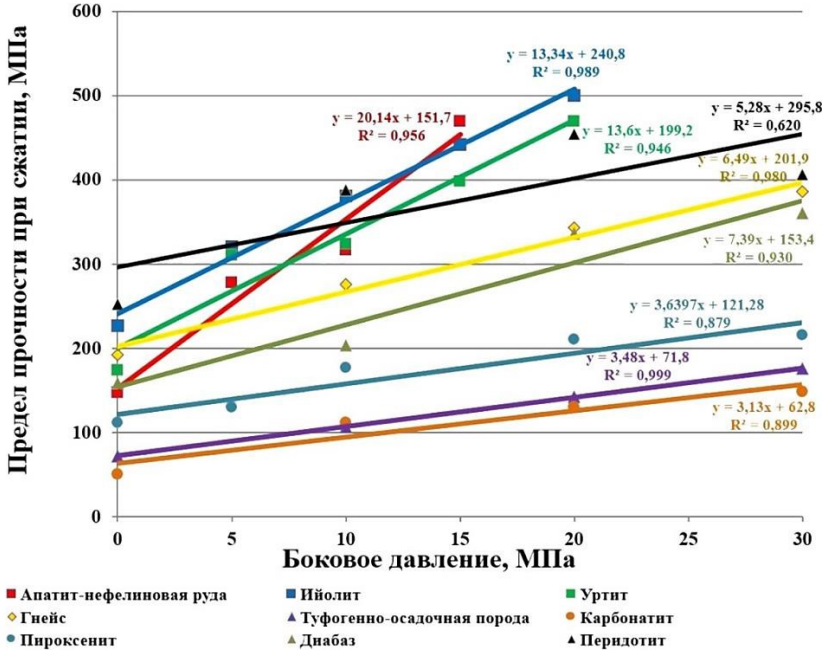


Рис. 1.10. Зависимость значений пределов прочности при сжатии образцов скальных горных пород от бокового давления

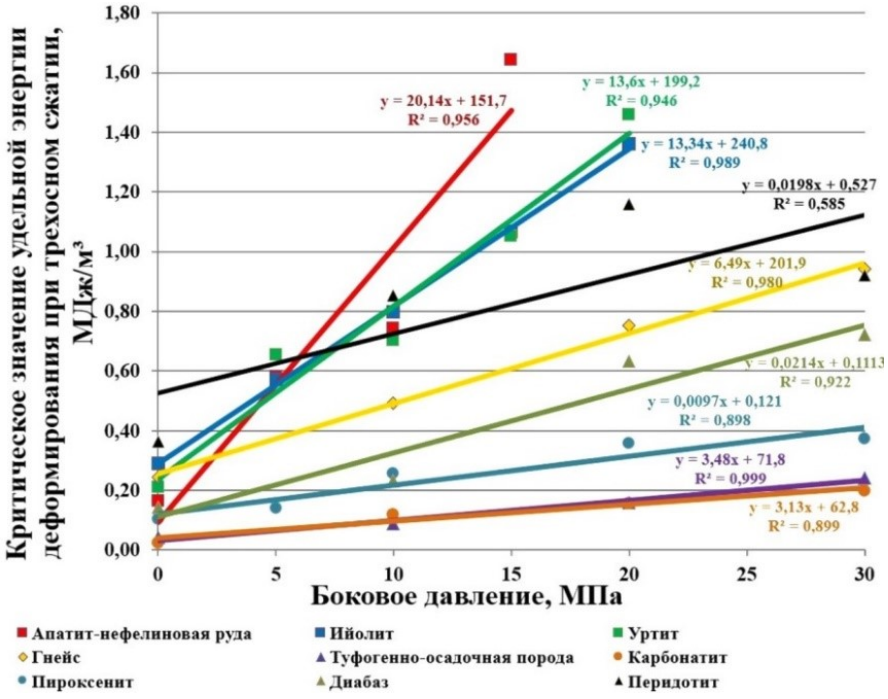


Рис. 1.11. Зависимость критических значений удельной энергии деформирования образцов скальных горных пород от бокового давления

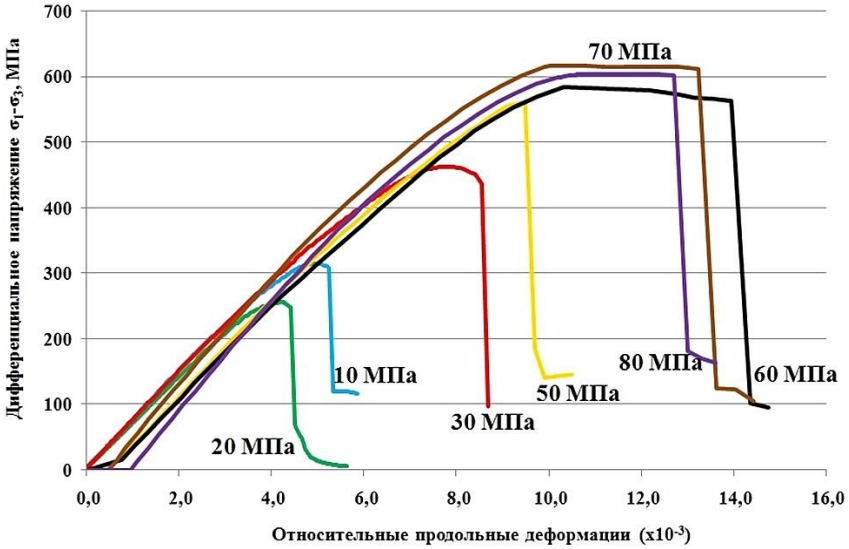


Рис. 1.12. Графики деформирования уртита среднезернистого массивного в условиях трехосного сжатия

Таким образом, по результатам испытаний образцов скальных горных пород месторождений Кольского региона в условиях одноосного сжатия и растяжения, а также трехосного сжатия, установлены основные их прочностные и деформационные свойства. Определены величины критической удельной энергии деформирования образцов исследуемых пород. Установлено пороговое значение энергии деформирования для предварительного разделения скальных пород на склонные и не склонные к динамическому разрушению. Проведена оценка изменения значений пределов прочности и критической энергии образцов при увеличении бокового давления в условиях трехосного сжатия. Полученные данные необходимы для определения склонности скальных горных пород к динамическому разрушению.

1.2.2. Определение склонности скальных горных пород к динамическому разрушению в условиях одноосного и трехосного сжатия

Определение склонности скальных горных пород к динамическому разрушению в условиях одноосного сжатия выполняли по критерию, предложенному Горным институтом КНЦ РАН [4], и критерию А. Н. Ставрогина [5].

Предложенный Горным институтом КНЦ РАН критерий [4] основывается на анализе графиков деформирования образцов при одноосном сжатии до предела прочности и сопоставлении величин их расчетной идеально упругой и реальной энергии деформирования, согласно которому, в случае если график деформирования имеет вогнутый вид и разница значений расчетной идеально упругой и реальной энергии деформирования больше 10 %, то порода

не склонна к разрушению в динамической форме, а во всех остальных случаях породы склонны к разрушению в динамической форме.

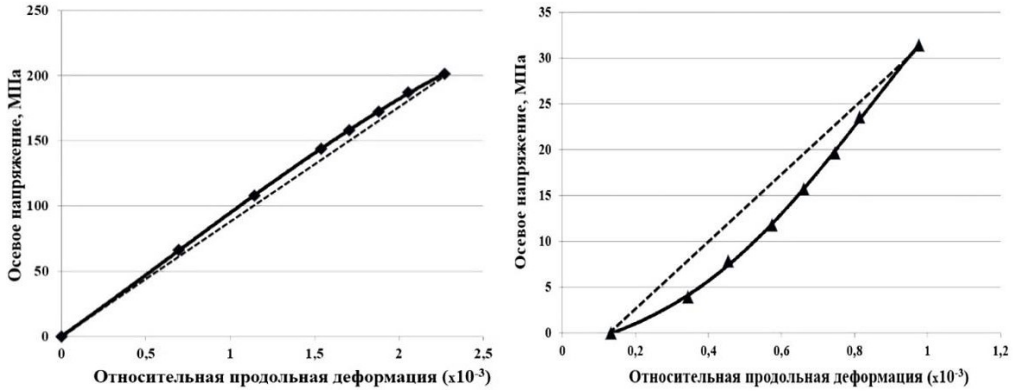
Согласно критерию А. Н. Ставрогина [5] определение склонности горных пород к динамическому разрушению выполняют на основании сопоставления величин модуля упругости (E) и модуля спада (M). Если коэффициент удароопасности $K_1 = E/M \leq 1$, то порода склонна к разрушению в динамической форме, а если $K_1 = E/M > 1$, то порода не склонна к такому виду разрушения.

На данный момент критерий А. Н. Ставрогина [5] является основным при оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам [6]. Однако сложность в определении модуля спада из-за отсутствия повсеместной доступности «жесткого» испытательного оборудования привела к вопросу о поиске альтернативных методов определения склонности пород к динамическому разрушению, в связи с чем и был разработан критерий, предложенный Горным институтом КНЦ РАН [4].

Испытания образцов скальных пород с целью определения их склонности к разрушению в динамической форме по предложенному Горным институтом КНЦ РАН критерию выполняли на сервогидравлической установке MTS 816 Rock Test System. Для этого отобран керн и подготовлены образцы 12 литотипов скальных пород месторождений Кольского региона.

По результатам испытаний строили графики деформирования образцов до предела прочности (рис. 1.13) и определяли величины их расчетной идеально упругой и реальной энергии деформирования (табл. 1.7).

Согласно полученным данным (табл. 1.7), склонными к динамическому разрушению оказались ийолит, уртиты, апатит-нефелиновая руда, гнейсы, апатит-карбонатно-магнетитовая руда, диабаз, перидотит и туфогенно-осадочная порода. Для этих пород разница значений расчетной идеально упругой и реальной энергии деформирования составила в среднем менее 10 %, а разрушение образцов происходило с разлетом осколков и взрывоподобным звуком. Не склонным к разрушению в динамической форме оказался карбонатит, для которого разница значений идеально упругой и реальной энергий деформирования составила в среднем 28 %. Разрушение образцов этой породы происходило в статическом режиме.



а *б*

Рис. 1.13. Графики деформирования при одноосном сжатии до разрушения: *а* — образца уртита неравномерно-зернистого; *б* — образца кальцитового карбонатита

Таблица 1.7

Результаты определения склонности исследуемых скальных горных пород к разрушению в динамической форме по критерию Горного института КНЦ РАН

№ п/п	Наименование горных пород	Удельная энергия идеально упругого деформирования, $W_{и.у.}$, МДж/м^3	Удельная энергия деформирования при разрушении (реальная), $W_{п}$, МДж/м^3	Разница между $W_{и.у.}$ и $W_{п}$		Заключение о склонности к динамическому разрушению
				МДж/м^3	%	
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
1	Ийолит трахитоидный	0,1401	0,1298	0,0103	7	Склонен
		0,2923	0,2619	0,0304	10	
		0,1723	0,1650	0,0072	4	
		0,2016	0,1856	0,0160	8	
2	Уртит неравномерно-зернистый с эгирином	0,2543	0,2430	0,0112	4	Склонен
		0,2281	0,2389	–0,0107	–5	
		0,2422	0,2316	0,0105	4	
		0,2347	0,2370	–0,0024	–1	
		0,2398	0,2376	0,0022	1	
3	Уртит среднезернистый массивный	0,1426	0,1426	0,0000	0	Склонен
		0,1591	0,1580	0,0011	1	
		0,2015	0,1996	00,0019	1	
		0,2010	0,2030	–0,0020	–1	
		0,1760	0,1758	0,0002	0	
4	Уртит пегматойдный	0,1073	0,0960	0,0113	11	Склонен
		0,1922	0,1872	0,0051	3	
		0,1260	0,1249	0,0011	1	
		0,1191	0,1215	–0,0025	–2	
		0,1361	0,1324	0,0037	3	
5	Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	0,1430	0,1197	0,0233	16	Склонен
		0,1554	0,1507	0,0047	3	
		0,1122	0,1120	0,0003	0	
		0,1746	0,1642	0,0104	6	
		0,0860	0,0763	0,0097	11	
		0,1343	0,1246	0,0097	7	
6	Гнейс серый	0,1451	0,1415	0,0036	2	Склонен
		0,0946	0,0927	0,0019	2	
		0,1795	0,1826	–0,0032	–2	
		0,0840	0,0769	0,0071	8	
		0,1258	0,1234	0,0024	2	
7	Гнейс серый лейкократовый	0,1366	0,1275	0,0090	7	Склонен
		0,1832	0,1642	0,0189	10	
		0,0845	0,0770	0,0076	9	
		0,0877	0,0741	0,0137	16	
		0,1230	0,1107	0,0123	10	
8	Кальцитовый карбонатит	0,0066	0,0054	0,0012	18	Не склонен
		0,0113	0,0079	0,0033	30	
		0,0171	0,0129	0,0042	25	
		0,0169	0,0125	0,0044	26	
		0,0169	0,0109	0,0060	35	
		0,0137	0,0099	0,0038	28	
9	Апатит-карбонат-но-магнетитовая руда	0,0502	0,0409	0,0012	2	Склонен
		0,0470	0,0469	0,0001	0	
		0,0412	0,0408	0,0004	1	
		0,0405	0,0396	0,0009	2	
		0,0432	0,0404	0,0028	6	
		0,0444	0,0433	0,0011	2	

Окончание таблицы 1.7

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
10	Диабаз	0,0896	0,0905	–0,0009	–1	Склонен
		0,1247	0,1321	–0,0074	–6	
		0,1113	0,1119	–0,0006	–1	
		0,2709	0,2918	–0,0209	–8	
		0,1485	0,1434	0,0051	3	
		0,2052	0,2149	–0,0097	–5	
		0,1584	0,1641	–0,0057	–3	
11	Рудный перидотит	0,2814	0,2605	0,0209	7	Склонен
		0,2842	0,2735	0,0107	4	
		0,2746	0,2683	0,0063	2	
		0,3085	0,2995	0,0090	3	
		0,1665	0,1623	0,0042	3	
		0,3570	0,3301	0,0268	8	
		0,2787	0,2657	0,0130	5	
12	Туфогенно-осадочная порода	0,0336	0,0348	–0,0012	–3	Склонен
		0,0208	0,0214	–0,0006	–3	
		0,0417	0,0417	0,0000	0	
		0,0435	0,0412	0,0023	5	
		0,0451	0,0444	0,0007	2	
		0,0651	0,0692	–0,0041	–6	
		0,0416	0,0421	–0,0005	–1	

Испытания образцов скальных пород с целью определения их склонности к разрушению в динамической форме по критерию А. Н. Ставрогина [5] выполняли в Санкт-Петербургском горном университете на сервогидравлической установке MTS 816 Rock Test System с повышенной жесткостью. Для этого отобран керн и подготовлены образцы 6 литотипов скальных пород месторождений Кольского региона.

По результатам испытаний строили полные графики деформирования образцов при одноосном сжатии (рис. 1.14–1.15) и определяли величины их модуля упругости и модуля спада (табл. 1.8).

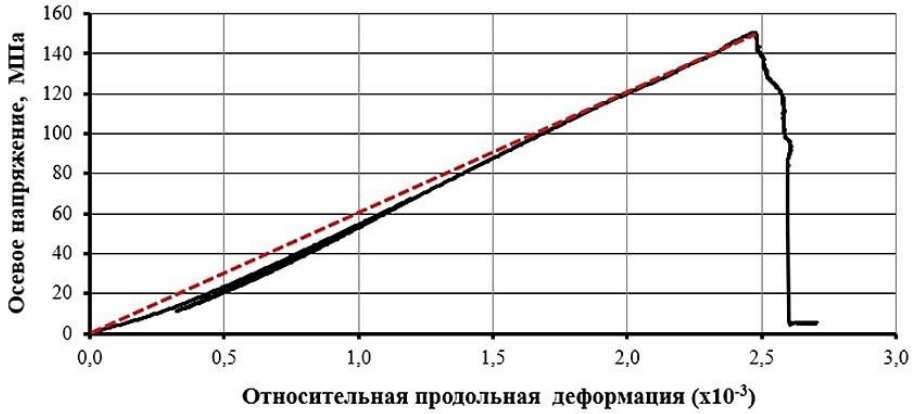


Рис. 1.14. График деформирования образца уртита (Кукисвумчоррское месторождение), пунктирная линия — условная линия идеально-упругого деформирования пород

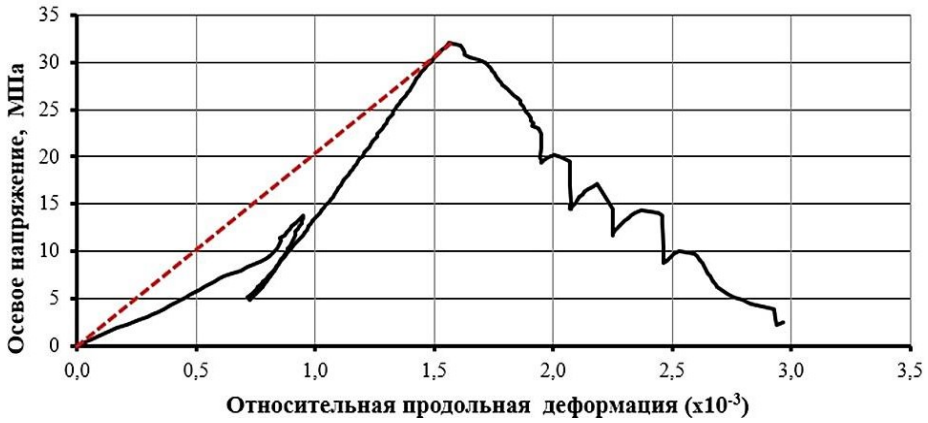


Рис. 1.15. График деформирования образца кальцитового карбонатита (Ковдорское месторождение), пунктирная линия — условная линия идеально-упругого деформирования пород

По результатам испытаний (табл. 1.8) установлено, что для всех образцов уртита, апатит-нефелиновой руды, диабаза, перидотита и туфогенно-осадочной породы значения коэффициента удароопасности меньше единицы, т. е. выполняется условие $K_1 \leq 1$. Таким образом, эти горные породы являются склонными к динамическому разрушению. Для образцов карбонатита значения коэффициента удароопасности больше единицы ($K_1 > 1$). Следовательно, данная порода не является склонной к динамическому разрушению.

При сопоставлении результатов оценки склонности исследуемых скальных пород к динамическому разрушению при одноосном сжатии по предлагаемому Горным институтом КНЦ РАН критерию [4] и критерию А. Н. Ставрогина [5] можно сделать основной вывод, что склонными к такому виду разрушения в обоих случаях являются уртит, апатит-нефелиновая руда, диабаз, перидотит и туфогенно-осадочная порода, а не склонным — карбонатит. Это, в свою очередь, подтверждает возможность применения предлагаемого Горным институтом КНЦ РАН критерия.

Определение склонности скальных горных пород к динамическому разрушению в условиях трехосного сжатия выполняли по критерию А. Н. Ставрогина [5]. С этой целью подготовлены образцы 4 литотипов скальных пород месторождений Кольского региона. Испытания проводили в Санкт-Петербургском горном университете на сервогидравлической установке MTS 815 Rock Test System (рис. 1.16). По результатам испытаний строили полные графики деформирования образцов при трехосном сжатии (рис. 1.17) и определяли величины их модуля упругости и модуля спада (табл. 1.9).

По критерию А. Н. Ставрогина [5] установлено, что для всех образцов уртита и апатит-нефелиновой руды значения коэффициентов удароопасности меньше единицы, т. е. выполняется условие $K_1 \leq 1$. Таким образом, эти горные породы являются склонными к динамическому разрушению. Для образцов карбонатита значения коэффициентов удароопасности больше единицы ($K_1 > 1$). Следовательно, данная порода не является склонной к динамическому разрушению.

Таблица 1.8

Результаты определения деформационных характеристик и склонности к динамическому разрушению скальных горных пород при одноосном сжатии по критерию А. Н. Ставрогина

Наименование горных пород	№ образца	Модуль упругости, ГПа	Модуль спада, ГПа	Коэффициент удароопасности	Заключение о склонности к динамическому разрушению
Уртит среднезернистый массивный	6-16	73,6	1473,7	0,05	Склонен
	6-17	46,6	105,1	0,44	Склонен
	6-18	60,5	302,4	0,20	Склонен
	7-15	64,6	1143,8	0,06	Склонен
	7-16	76,2	568,3	0,13	Склонен
	8-16	67,2	1981,2	0,03	Склонен
Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	4-1	48,2	203,4	0,24	Склонен
	4-2	64,1	923,6	0,07	Склонен
	4-6	75,6	1597,3	0,05	Склонен
	4-10	63,2	946,6	0,07	Склонен
	4-11	50,0	149,2	0,34	Склонен
	4-13	60,4	684,5	0,09	Склонен
Кальцитовый карбонатит	1-2-6	50,3	2,6	19,35	Не склонен
	1-3-4	39,6	19,2	2,06	Не склонен
	1-3-6	40,0	21,3	1,88	Не склонен
	1-5-4	48,0	5,9	8,14	Не склонен
	1-8-4	32,7	16,8	1,95	Не склонен
	46-7-4	41,2	9,9	4,16	Не склонен
Диабаз	1-4-2	90,4	457,5	0,20	Склонен
	1-7-1	83,1	612,0	0,14	Склонен
	1-4-1	100,3	585,1	0,17	Склонен
	1-16-3	87,9	625,4	0,14	Склонен
	1-16-4	85,4	374,1	0,23	Склонен
	1-17-1	77,5	491,0	0,16	Склонен
Рудный перидотит	2-33-2	77,5	650,7	0,12	Склонен
	2-33-4	81,5	629,1	0,13	Склонен
	2-42-2	79,5	413,0	0,19	Склонен
	2-42-4	76,0	586,8	0,13	Склонен
	2-46-3	84,6	558,9	0,15	Склонен
	2-48-1	76,8	502,1	0,15	Склонен
Туфогенно-осадочная порода	3-20-2	61,0	189,3	0,32	Склонен
	3-20-4	67,2	145,2	0,46	Склонен
	3-30-3	57,7	413,1	0,14	Склонен
	3-30-4	57,6	413,9	0,14	Склонен
	3-30-5	61,9	466,0	0,13	Склонен
	3-41-2	56,2	613,6	0,09	Склонен



Рис. 1.16. Сервогидравлическая испытательная установка MTS 815 Rock Test System

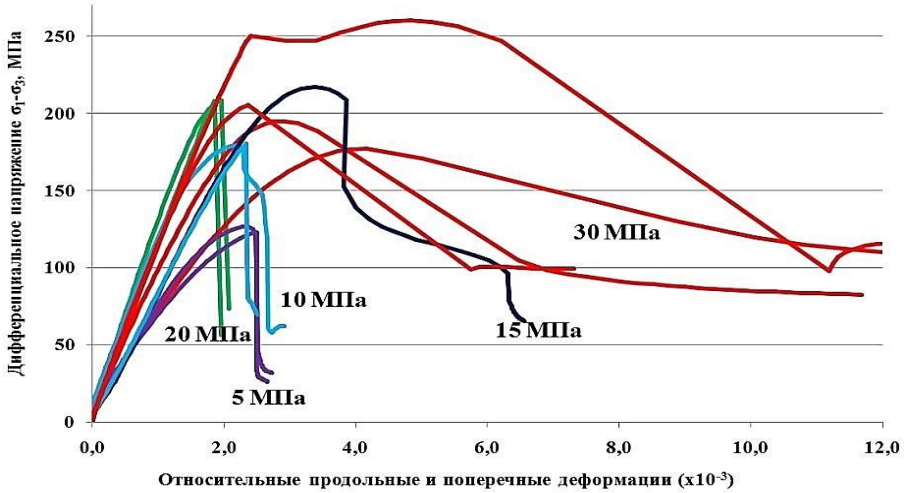


Рис. 1.17. Графики деформирования образцов пироксенита в условиях трехосного сжатия

Таблица 1.9

Результаты определения деформационных характеристик и склонности к динамическому разрушению скальных горных пород при трехосном сжатии

Литотип	№ образца	Боковое давление, МПа	Модуль упругости, ГПа	Модуль спада, ГПа	Коэффициент удароопасности	Заключение о склонности к динамическому разрушению
Уртит среднезернистый массивный	3-15	10	75,0	588,3	0,13	Склонен
	4-15	10	74,8	288,6	0,26	Склонен
	3-17	20	69,6	809,4	0,09	Склонен
	3-18	20	79,1	138,3	0,57	Склонен
	4-17	30	76,2	76,8	0,99	Склонен
	4-18	30	72,9	460,1	0,16	Склонен
Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	2-2-2	10	74,4	116,9	0,64	Склонен
	3-1-1	10	67,6	91,3	0,74	Склонен
	3-7-1	20	80,1	95,5	0,84	Склонен
	4-7-1	20	72,0	99,4	0,72	Склонен
	4-8-1	30	74,2	1525,0	0,05	Склонен
	4-10-1	30	71,0	73,0	0,97	Склонен
Кальцитовый карбонатит	1к	10	51,1	2,5	20,44	Не склонен
	2к	10	53,9	3,0	17,97	Не склонен
	4к	20	51,2	5,4	9,48	Не склонен
	5к	20	62,1	4,0	15,53	Не склонен
	6к	30	61,4	6,1	10,07	Не склонен
	7к	30	57,9	0,3	193,00	Не склонен
Пироксенит	1п	5	44,1	1333,1	0,03	Склонен
	2п	5	50,8	499,6	0,10	Склонен
	3п	10	75,3	258,0	0,29	Склонен
	4п	10	75,6	3576,3	0,02	Склонен
	5п	15	62,8	102,0	0,62	Склонен
	6п	20	107,2	1516,9	0,07	Склонен
	7п	20	104,2	1136,0	0,09	Склонен
	8п	30	85,1	31,4	2,71	Не склонен
	9п	30	64,5	24,0	2,68	Не склонен
	10п	30	41,2	4,1	10,04	Не склонен
	11п	30	59,9	25,5	2,35	Не склонен

При сопоставлении результатов испытаний образцов уртита, апатит-нефелиновой руды и карбонатита (табл. 1.8, 1.9) в условиях одноосного и трехосного сжатия выявлено, что склонность к динамическому разрушению уртита и апатит-нефелиновой руды сохраняется при обоих режимах нагружения, а карбонатит в обоих случаях не проявляет такой склонности.

Для пироксенита Ковдорского месторождения установлено, что склонными к разрушению в динамической форме являются образцы, нагружение которых происходило в условиях трехосного сжатия при величинах бокового давления от 5 до 20 МПа. Однако при боковом давлении 30 МПа образцы пироксенита уже не являются склонными к такому виду разрушения.

Отсюда следует важный вывод, что с переходом от условий одноосного сжатия к трехосному и при снижении разницы между компонентами действующих напряжений, уменьшается склонность скальных пород к динамическому разрушению.

Таким образом, по результатам испытаний скальных горных пород месторождений Кольского региона выполнена оценка их склонности к динамическому разрушению в условиях одноосного и трехосного сжатия. Проведен сравнительный анализ результатов определения склонности скальных пород к разрушению в динамической форме по предлагаемому Горным институтом КНЦ РАН критерию и критерию А. Н. Ставрогина. Подтверждена возможность применения предлагаемого Горным институтом КНЦ РАН критерия.

1.3. Создание и пополнение базы данных о параметрах напряженно-деформированного состояния пород месторождений Арктической зоны России

1.3.1. Структура разрабатываемой базы данных

Структура разрабатываемой базы данных определяется многообразием применяемых методов оценки параметров напряженно-деформированного состояния. Прежде всего это метод разгрузки, по результатам которого восстанавливается полный тензор напряжений для блока массива горных пород. Накоплен существенный объем подобных измерений на месторождениях Кольского полуострова с 60-х гг. XX в. Это позволило сначала выдвинуть гипотезу о типе НДС массива горных пород и, по мере накопления натурных данных, определить основные закономерности изменения напряжений с глубиной, уточнить соотношение величин действующих напряжений в различных плоскостях, генеральное направление главных компонент напряжений в каждом из блоков и в целом по месторождениям. Полученная информация о параметрах НДС используется для задания граничных условий при разработке численных геомеханических моделей, от ее полноты и интерпретации зависит адекватность

оценок и прогнозов трансформации поля напряжений по мере отработки запасов полезных ископаемых.

Согласно современным представлениям определены основные требования к информации для разрабатываемой базы данных:

— непротиворечивость (не должно быть данных, противоречащих друг другу);

— целостность (все данные должны быть связаны, не должно быть ссылок на несуществующие в базе данные);

— отсутствие избыточности и дублирования информации в базе данных.

Структура БД предполагает работу с несколькими видами данных и, соответственно, с несколькими типами файлов. Вся информация, включаемая в БД, разделена на 4 блока по каждой из замерных станций (рис. 1.18).



Рис. 1.18. Общая структура БД о параметрах напряженно-деформированного состояния пород по результатам натурных определений методом разгрузки

I. Время и место исследований:

— время исследований (от начала бурения первой скважины до окончания бурения последней скважины);

— место проведения измерений (наименование горного предприятия, рудника, месторождения, участка; рудничные (геодезические) координаты; название выработки);

— номер станции, количество скважин и их номера;

— план горных работ и разрез (разрезы);

— геологический план и разрез;

— фотографии места проведения исследований.

II. Параметры деформирования выбуренного керна по длине скважины:

— снятые деформации для каждой точки измерений;

— фото и чертежи керна по скважинам.

III. Упругие параметры горных пород:

— по результатам ультразвуковых исследований (неразрушающий метод);

— по результатам испытаний при одноосном сжатии.

IV. Расчетные данные:

— результаты определения значений действующих напряжений и их усреднение по отдельной скважине (расчетные данные по трем методикам);

— результаты определения значений действующих напряжений по станции в целом.

Для использования базы планируется разработка интерфейса, реализующего необходимые пользователю выборки и визуализацию запрашиваемой информации.

Большое значение в описании всех вышеперечисленных пунктов имеют примечания, в которых должны быть отмечены особенности проведенных исследований:

— геологические и горнотехнические особенности места заложения исследовательской станции;

— скорость проходки исследовательских скважин и, соответственно, проведения исследований;

— особенности интерпретации полученных результатов на каждом этапе исследований;

— заключение о статистической обоснованности и достоверности данных о параметрах НДС по скважине и по станции в целом.

Приведем примеры материалов по измерениям напряжений методом разгрузки в разное время. На рис. 1.19 представлены сканы журнала разгрузки начала 1970-х гг.

В процессе работ предполагается создание комплекса баз геомеханических данных, каждая из которых содержит информацию различного вида, относящуюся к одним и тем же участкам массива горных пород. Конечная цель работы — получить возможность совместного анализа имеющихся данных по выбранной пространственной области за выбранный временной интервал.

Независимое наполнение частных баз данных может повлечь за собой определенное дублирование некоторого объема базовой информации, а также создать опасность получения несопоставимых данных при ошибке ввода этой базовой информации в одну из БД.

Поэтому первой задачей является выявление информации, общей для всех (или части) баз данных, и создать для ее хранения отдельный блок базы данных, используемый при наполнении и анализе информации частных баз данных.

Все исходные данные и результаты измерений напряжений (а также данные по горным ударам и физико-механическим свойствам) имеют привязку к времени и месту. Время достаточно легко приводится к выбранному в качестве стандарта часовому поясу. Определение места имеет некоторые особенности. Как правило, в исходных данных координаты точек привязки указаны в локальной рудничной системе координат. Поэтому для сопоставления данных на больших пространствах и для отображения информации в ГИС требуется перевод в региональную систему координат. Таким образом, общая для всех разрабатываемых баз данных информация должна включать в себя иерархию горных объектов (регион – горный массив – месторождение – горизонт – выработка) и иерархию, связанных с горными объектами систем координат (региональные – рудничные).

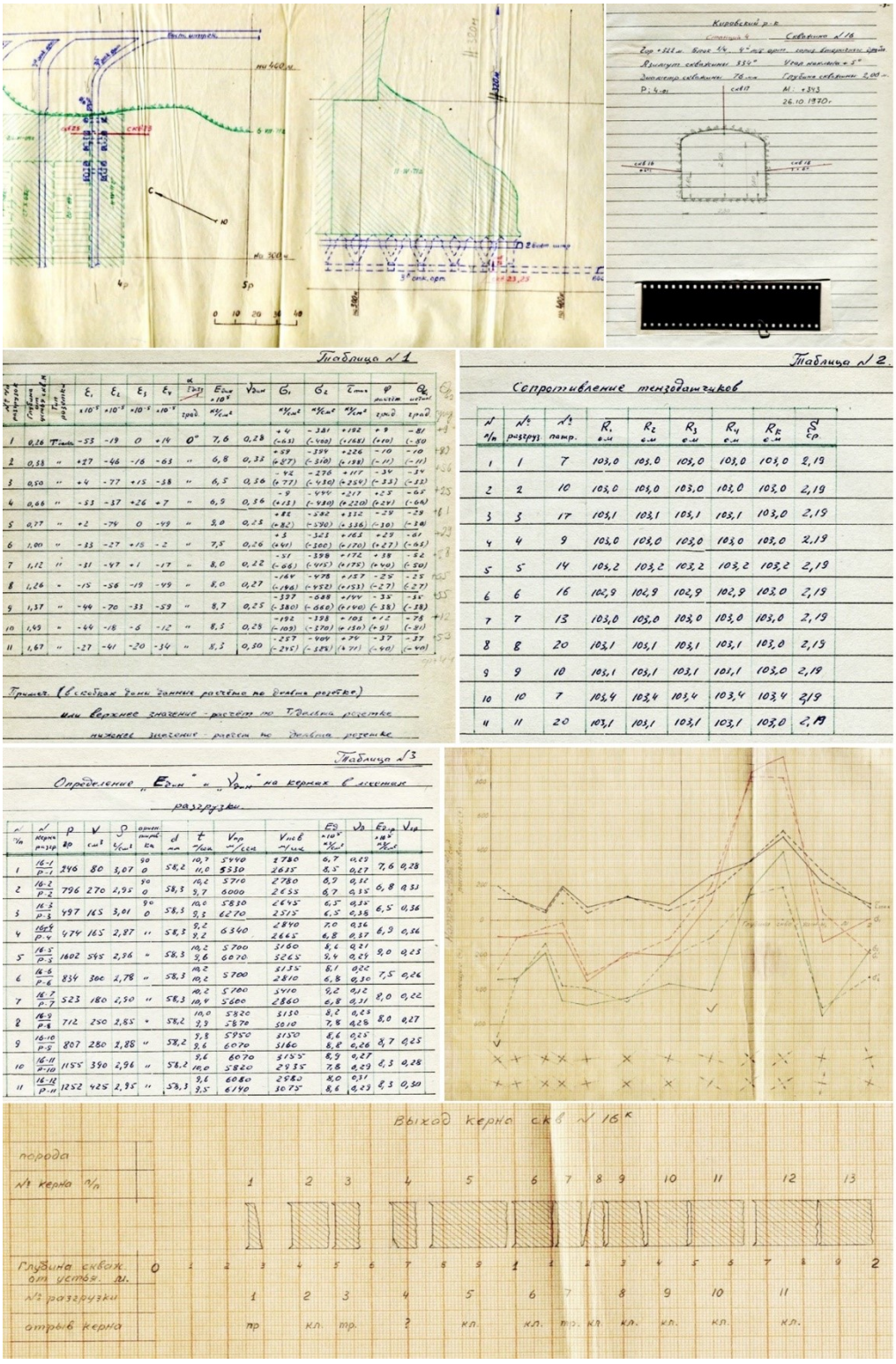


Рис. 1.19. Пример представления данных по определению напряжений методом разгрузки. Журнал начала 1970-х гг.

Еще одну категорию информации, общую для большинства частных баз данных, представляют сведения о расположении источников исходных данных. Это координаты измерительных станций (точек, где пробурены наблюдаемые скважины, взяты пробы пород либо установлены измерительные приборы) и скважин — как относящихся к измерительным станциям, так и пробуренных для определения физико-механических свойств.

Также существует категория общих справочных данных. К ней относится, например, перечень типов горных пород (литотипов).

Среди самих исходных данных также можно выделить информацию, задействованную в нескольких частных базах данных. Это исходные наборы образцов — большей частью керны, но при должной организации работ сюда могут быть отнесены наборы штуфов и проб дисперсного материала. Керны связаны со скважинами, из которых были отобраны, и наследуют их координаты, но дальнейшее назначение и жизненные циклы керна и скважины различны. Скважина может быть ликвидирована в ходе горных работ в то время, как неразрушенные в процессе испытаний образцы керна еще хранятся на складе. Образцы керна используются для определения физико-механических свойств горных пород, а скважина может использоваться для контроля состояния массива и получения косвенных данных о параметрах поля напряжений, например, методом контроля разрушения скважин.

Информационное наполнение всех разделов БД предполагает также наличие неструктурированной сопроводительной информации: документы (договоры, отчеты, методички), фотографии, чертежи. Отсюда следует необходимость хранилища сопутствующих материалов.

1. Справочники.

1.1 Все исходные данные и результаты измерений имеют географическую привязку. Ее обеспечивают следующие таблицы.

1.1.1. Системы координат: региональные и рудничные.

1.1.2. Горные объекты: регион, горный массив, месторождение, горизонт, выработка.

1.2. Общие для большинства (всех) разделов источники исходных данных.

1.2.1. Измерительные станции (точки, объединяющие несколько простых источников исходных данных, возможно, различных типов).

1.2.2. Скважины (как в составе измерительных станций, так и пробуренные отдельно).

1.3. Общие проблемно-ориентированные справочники, применимые к нескольким разделам.

1.3.1. Типы горных пород (литотипы).

2. Исходные данные.

2.1. На данном этапе в качестве общей для нескольких разделов базы данных сущности выделены исходные наборы образцов: керн, штуф, дисперсный материал, — имеющие привязку к месту и времени взятия. Керн имеет обязательную привязку к скважине.

3. Вспомогательные таблицы.

3.1. Информационное наполнение всех разделов БД предполагает наличие неструктурированной сопроводительной информации: документы (договоры, отчеты, методички), фотографии, чертежи. Отсюда следует необходимость хранилища сопутствующих материалов, состоящего из следующих таблиц.

3.1.1. Перечень сопутствующих материалов.

3.1.2. Фрагменты сопутствующих материалов.

Содержание объектов, включенных в БД, представлено в табл. 1.10.

Таблица 1.10

	Тип объекта									
	Горный объект (рудник, предприятие в целом)	Измерительная станция	Скважина	данные замеров						
				дискование керна		статические замеры упругих характеристик		обработка измерений методом разгрузки		
				параметры керна	описание фрагментов керна	параметры образца	результаты замеров	параметры измерений	поразгрузочные измерения	
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	
Тип данных	Краткое наименование/условное обозначение	Номер	Номер	Номер	Привязка к серии	Номер образца	Привязка к образцу	Номер серии замеров	Привязка к серии	Номер партии тензодатчиков
	Расширенное описание	Краткое наименование/условное обозначение	Краткое наименование/условное обозначение	Краткое наименование/условное обозначение	Номер	Краткое наименование/условное обозначение	Номер замера	Краткое наименование/условное обозначение	Номер разгрузки	K — коэффициент чувствительности
	Тип	Расширенное описание	Расширенное описание	Расширенное описание	Положение	Расширенное описание	Нагрузка	Расширенное описание	Номер керна	$T_{\text{р проф.}}$ — время прохода волны, профилирование — 2 числа
	Матрица преобразования между локальными и глобальными координатами	Привязка к горному объекту	Привязка к измерительной станции	Привязка к скважине	Длина	Привязка к скважине	Показания прибора (сопротивление тензодатчика) — 4 числа	Привязка к скважине	Диаметр керна	$T_{\text{р торц.}}$ — время прохода волны между торцами — 3 числа (возможно вместо времени указывать скорости прохождения волн)

Окончание табл. 1.10

	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
		Координаты в локальной системе координат	Точные координаты устья	Диаметр выработки на момент взятия керна	Число дисков	Дата измерения		Тип породы — возможно, из отдельного справочника	Длина керна	V_c — коэффициент Пуассона статический — по результатам обсчета данных статических измерений
		Количество скважин	Ориентация (азимут, угол возвышения)	Диаметр керна	Состояние	K — коэффициент чувствительности		Дата проведения измерений	Масса образца керна	E_c — модуль Юнга статический — по результатам обсчета данных статических измерений
		Дата начала измерений	Дата начала измерений	Дата взятия керна		Диаметр керна			Номер тензопатрона	Глубина взятия керна
		Дата завершения измерений	Дата завершения измерений	Сопутствующие материалы (фото, чертежи и пр.)					Сопротивления тензорезисторов — 4 числа	Относительные деформации — 4 числа
		Сопутствующие материалы (фото, чертежи и пр.)	Сопутствующие материалы (фото, чертежи и пр.)						Сопротивление компенсационного резистора	Угол 1 — коррекция направления напряжений

В Приложении А представлено описание структур основных таблиц базы данных. Диаграмма разработанной БД представлена на рис. 1.20.

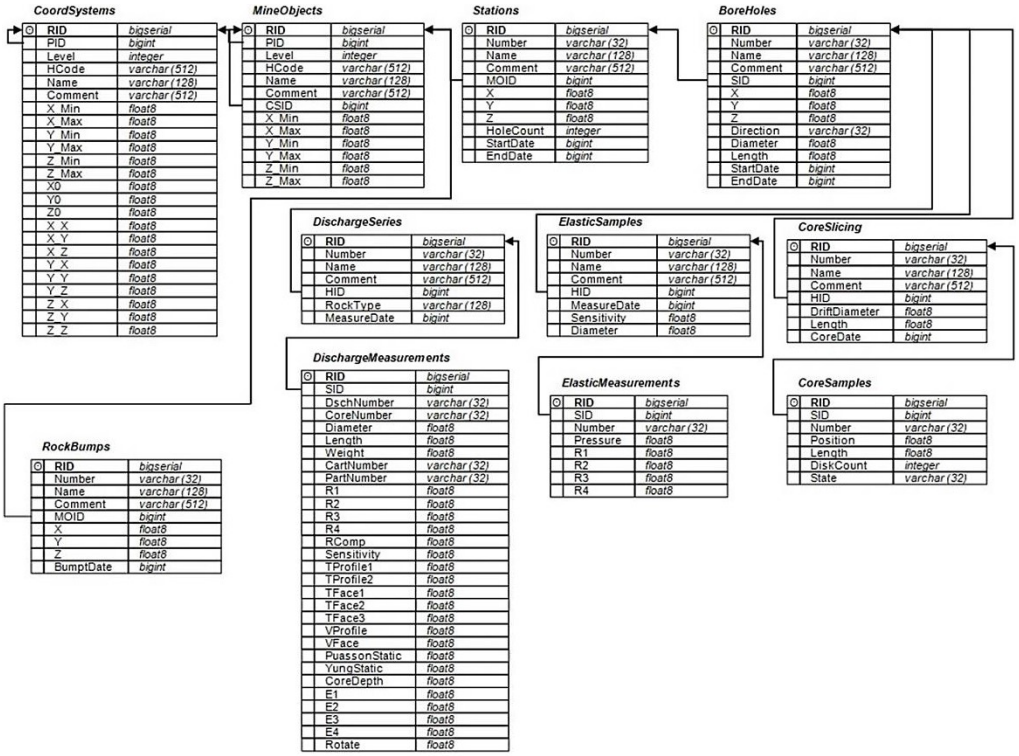


Рис. 1.20. Диаграмма базы данных измерений напряжений

1.3.2. Разработка базы данных горных ударов удароопасных месторождений Хибинского массива

В рамках данной задачи проводилась разработка БД о проявлениях горного давления в динамической форме на месторождениях Кольского полуострова. Основная цель исследований — структурирование информации, создание и пополнение БД для последующего применения при решении задач прогноза местоположения и параметров удароопасных зон в северо-западной части Арктической зоны РФ с учетом всего комплекса геологических и горнотехнических факторов.

На первом этапе исследований проводился поиск и анализ информации на основе имеющихся в Горном институте данных, проведен обзор литературных источников, проанализирована и систематизирована официальная документация: карточки горных ударов (ГУ), протоколы заседаний Комиссий по горным ударам (КГУ), протоколы технических совещаний. На основе обзора всех геодинамических явлений, произошедших в Хибинах с 1948–2020 гг. сформирована база данных в формате MS Excel, которая включает в себя информацию

о времени, месте, классификации, интенсивности, причинах и последствиях произошедших геодинамических явлений (толчки, микроудары, горные и горно-тектонические удары, техногенные землетрясения). На сегодняшний день зарегистрировано 60 мощных динамических проявлений горного давления на рудниках. Наиболее разрушительными являются горно-тектонический удар (техногенное землетрясение), произошедший 16 апреля 1989 г. на месторождении Кукисвумчорр ($M \approx 4{,}2$), а также, произошедший 9 января 2018 г. горно-тектонический удар на месторождении Апатитовый цирк ($M \approx 3{,}3$).

Всего в Горном институте КНЦ РАН имеется 64 карточки ГУ (36 шт. — Кировский рудник; 28 шт. — Расвумчоррский рудник). Также проанализирована информация о событиях, в разборе которых институт принимал участие, но в институте имеются только протоколы заседаний КГУ. Дополнительно учтена информация о событиях, по которым не были составлены карточки и не проводились заседания КГУ. К таким событиям, например, относятся толчки в массиве горных пород, в результате которых разрушений в выработках сотрудниками КФ АО «Апатит» выявлено не было. При отсутствии разрушений в выработках карточки ГУ не составляются, отсутствие разрушений фиксируется Актом визуального осмотра, который является внутренним документом предприятия.

На сегодняшний день для рудников Хибинского массива, отрабатываемых КФ АО «Апатит», систематизирована информация о 92 динамических явлениях (Приложение Б). Работа в данном направлении будет продолжена как в части внесения данных о новых геодинамических явлениях, так и внесение дополнительной информации.

На рис. 1.21 представлена временная шкала сильных геодинамических явлений, зафиксированных на месторождениях. В табл. 1.11 представлены количественные данные о различных геодинамических явлениях: горно-тектонический удар (ГТУ), горный удар (ГУ), микроудар, техногенное землетрясение (ТЗ), толчок и иные случаи. К иным случаям отнесены другие возможные геодинамические явления. На сегодняшний день официально зарегистрирован только один такой случай: самопроизвольное обрушение заколов с большой площади обнажения на Кукисвумчоррском месторождении.

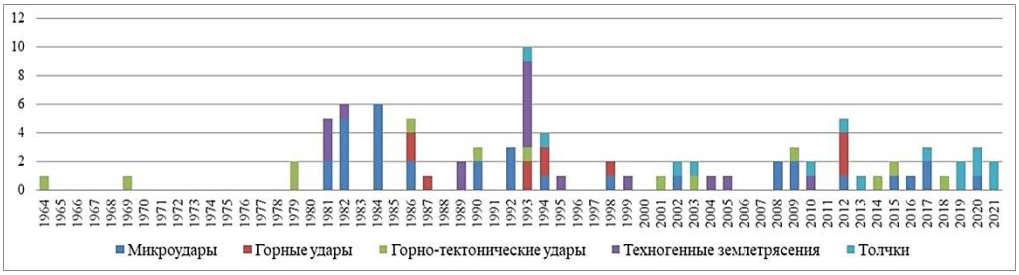


Рис. 1.21. Временная шкала сильных геодинамических явлений

Таблица 1.11

Данные о зарегистрированных геодинамических явлениях

	Месторождения					
	Всего	Кукисвум-чоррское	Юкспорское	Апатитовый цирк	Плато Расвумчорр	Коашвинское
ГТУ	13	8	0	3	2	0
ГУ	11	6	1	3	1	0
Микроудар	34	16	9	9	0	0
ТЗ	19	14	0	0	5	0
Толчок	14	5	2	3	3	1
Иное	1	1	0	0	0	0

В Приложении Б представлена таблица с краткой информацией обо всех произошедших геодинамических событиях, которая была создана прежде всего для оперативного использования. Однако, например, карточки ГУ зачастую содержат развернутую полезную информацию, хранение которой для дальнейшего использования необходимо, но в табличном виде — нерационально. На рис. 1.22 представлен фрагмент карточки горного удара, содержащей большой объем информации. Очевидно, что для хранения такого объема разнородной информации и удобства ее дальнейшей обработки необходимо создание БД.

12	Сведения о горном ударе и его последствиях.	31 БДО вывал произошёл с кровли и с сопряжений стенок с кровлей в интервале от оси 35 ВТШ 23,7- 43м объем вывала ~8-10 м ^{3}. Вывалы произошли также с кровли в местах пересечения выработки с 36 ВТШ и 31 ОШ и с северо-западной и южно-западной пяты с 31 ОШ. Разрушение торкрет-бетонного крепления на кровле и на южной пяте. Трещины в торкрет-бетоне на северо-западном сопряжении стенки с 32 ОШ. 32 БДО вывал произошёл с кровли и с сопряжений стенок с кровлей и кровли в интервале от оси 35 ВТШ 19,5- 46 м объем вывала ~10-15 м ^{3}. 33 БДО вывал произошёл с кровли и с сопряжений стенок с кровлей и кровли в интервале в интервале от М+465 до М+483. 34 БДО вывал произошёл с кровли и с сопряжений стенок с кровлей и кровли в интервале в интервале от М+470 до М+483. 35 БДО вывал произошёл с кровли и с сопряжений стенок с кровлей и кровли в интервале в интервале от М+473 до М+483. 36 БДО в торкрет-бетоне имеются трещины на северно-восточном сопряжении с 36 ВТШ. 32 ОШ вывал произошел с кровли и с сопряжений стенок с кровлей и кровли объемом~7-11 м ^{3} от 36 БДО на север – на длине 20 м.
13	Причины горного удара.	Высокое поле тектонических напряжении в месте ведения горных работ и концентрация напряжений в зоне влияния опорного давления от границы обрушения отм. +262 метра и влияние консоли вышележащих покрывающих пород.
14	Основные выводы Комиссии, расследовавшей горный удар, и принятые решения по обеспечению безопасности дальнейшего ведения горных работ.	Классифицировать событие как микроудар. Произвести инструментальную оценку удароопасности выработках 31 ВТО, 34БДО, 36 ВТШ, 32 ОШ, 31 ОШ в соответствии с проектом. На основании выполненной оценки категории удароопасности разработать проекты бурения разгрузочных строчек на участках выработок, где применение этих мероприятий целесообразно. Определить способы поддержания выработок после выполнения разгрузочных мероприятий.
15	Эскиз места проявления горного удара (план, разрезы).	Приложение 1, приложение 2.

Рис. 1.22. Фрагмент карточки горного удара

На втором этапе исследований проводилась разработка структуры БД горных ударов. За основу принята форма карточки ГУ, утвержденная в действующей редакции «Указаниий по безопасному ведению горных работ в удароопасных условиях» [7].

На рис. 1.23 представлен текущий вариант структуры БД.

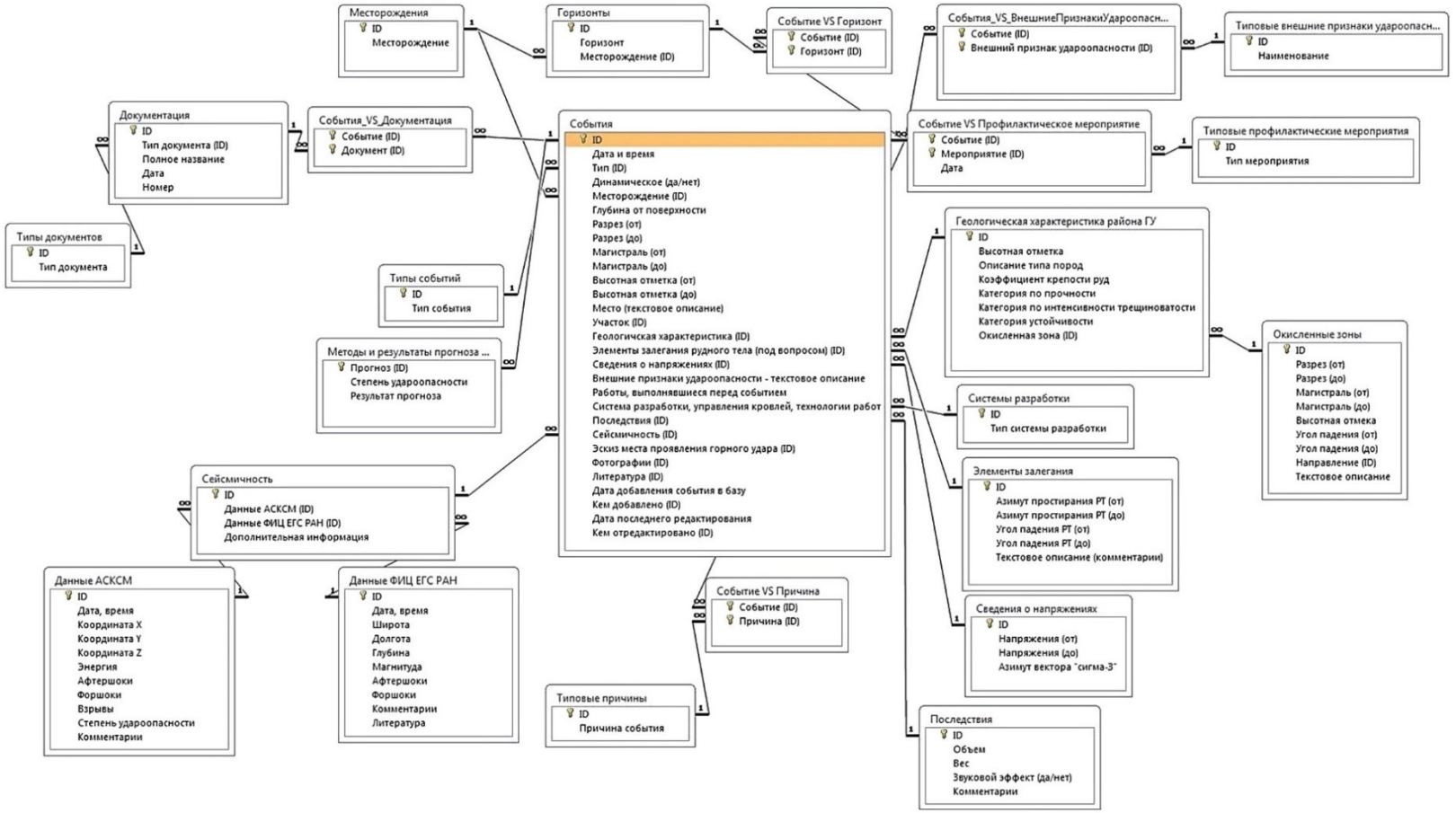


Рис. 1.23. Структура БД горных ударов

Далее приведены некоторые примеры, которые являются хорошей иллюстрацией сложности решаемой задачи.

1. Проблема, характерная для всех типовых данных, — отсутствие исчерпывающего перечня определенных формулировок для заполнения различных разделов карточки ГУ. Фактическая информация в карточках ГУ может быть значительно шире, в связи с этим возникает проблема хранения такой информации. Например, в действующей редакции «Указаниий по безопасному ведению горных работ в удароопасных условиях» существует перечень внешних признаков удароопасности. При этом в карточках ГУ зачастую встречается текстовое описание, которое может содержать как типовые внешние признаки, так и некоторую дополнительную информацию, которая также может быть важной для хранения в БД.

2. При хранении данных о сейсмической активности необходимо учитывать данные как локальной, так и региональной системы сейсмического мониторинга.

2.1. Время регистрации событий локальными и региональными системами сейсмического мониторинга может несколько отличаться по синхронизации времени, например, среднее время по Гринвичу (GMT) или UTC — всемирное координированное время (в АСКСМ КФ АО «Апатит» используется точное Московское, а в КоФ ФИЦ ЕГС РАН — по Гринвичу). Новая шкала времени UTC была введена, поскольку шкала GMT является неравномерной и связана с суточным вращением Земли, отсюда может быть незначительное запаздывание региональных систем по сравнению с локальными.

2.2. Энергетические характеристики события, полученные по данным регистрации локальными и региональными системами сейсмического мониторинга, отличаются (например, п. 83, Приложение Б), поэтому важным является возможность обращения ко всей имеющейся о событии информации.

3. Геологическая характеристика района ГУ является важной составляющей разрабатываемой БД, которая может быть использована для совместного анализа имеющихся данных не только о геодинамических явлениях, но и с другими частями разрабатываемой общей БД.

4. Необходимо хранение большого объема сопроводительной информации: сканированные копии карточек ГУ, протоколов заседаний КГУ, информация о состоянии горных работ на момент проявления геодинамических явлений (чертежи в формате **dxf* и/или сканированные копии планов горных работ), фотографии и др.

5. Квалификация события по результатам проведения комиссионного обследования не всегда является однозначной. Некоторые события предприятием замалчиваются или идет определенное давление на членов комиссии с попыткой уменьшить как энергетические характеристики (п. 2.2 Приложение Б), так и по возможности занизить объем разрушений, время простоя горных работ, уровень повреждения оборудования и т. п. В этой связи важно отражение в БД особых мнений членов комиссии, а также результатов анализа события сотрудниками ГоИ, если таковой проводился.

Таким образом, систематизирован большой объем информации о геодинамических явлениях, произошедших на рудниках Хибинского массива. Разработан прототип БД о геодинамических явлениях, предполагается, что в дальнейшем

в БД может храниться информация о геодинамических явлениях, произошедших и на других рудниках Кольского региона. Предусмотрена возможность объединения этой БД с другими разрабатываемыми БД на единой платформе.

В Горном институте КНЦ РАН накоплен большой объем данных о результатах определений физико-механических свойств горных пород. Испытания образцов пород проводили в разное время для различных месторождений Кольского региона. Более того, массив имеющихся данных постоянно пополняется новыми сведениями. В связи с этим возник вопрос о разработке БД для хранения и обработки информации в структурированном виде.

1.3.3. Разработка базы данных физико-механических свойств горных пород месторождений Кольского региона

На сегодняшний день такие данные хранятся в табличном виде либо на бумажном носителе. Уже сейчас очевидно, что из-за большого объема накопленной информации пользоваться данными становится неудобно (рис. 1.24). Поэтому было принято решение развить идею о создании базы геомеханических данных, разработать блок для хранения и пополнения сведений о физико-механических свойствах горных пород.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Отчет по х/д №		26136	26136	26136	2655	2655	2655
2	Дата заключения х/д		15.07.2021	15.07.2021	15.07.2021	22.06.2018	22.06.2018	22.06.2018
3	Регион (Область)		Кольский регион	Кольский регион	Кольский регион	Кольский регион	Кольский регион	Кольский регион
4	Горный массив		Печенгское рудное поле	Печенгское рудное поле	Печенгское рудное поле	Печенгское рудное поле	Печенгское рудное поле	Печенгское рудное поле
5	Месторождение		Ждановское	Ждановское	Ждановское	Ждановское	Ждановское	Ждановское
6	Номер скважины		261	261	261	-	-	-
7	Номер ящика		15	41	30	-	-	-
8	Интервал отбора, м	от	64,50	186,25	134,00	-	-	-
9		до	65,10	186,85	134,80	-	-	-
10	Номер пробы		1	2	3	1	2	3
11	Петротип		Диабаз	Рудный перидотит	Туфогенно-осадочная порода	Туфогенно-осадочная порода	Габбро	Диабаз
12	Описание структуры		-	-	-	-	-	-
13	Описание места отбора				интервал вскрытия-430/-730 м	Центральное рудное тело	Юго-западное рудное тело	Центральное рудное тело
14	Тип каменного		Керн	Керн	Керн	Штуф	Штуф	Штуф
15	Номер образца		1-4-2	2-33-2	3-20-2	1-1в	1	3-1в
16	Диаметр (сторона 1), см		6,07	6,08	6,08	-	4,64	-
17	Сторона 2, см		-	-	-	-	4,70	-
18	Высота, см		12,05	12,05	12,07	-	4,61	-
19	Масса в воздушно-сухом		1023,57	1047,63	989,31	-	309,90	-
20	Масса в естественно-		-	-	-	80,87	-	93,56
21	Масса в воде, г		-	-	-	-	-	-
22	Масса в		-	-	-	-	-	-
23	Масса в		-	-	-	-	-	-
24	Масса в сухом		-	-	-	80,84	-	93,49
25	Естественная		-	-	-	0,04	-	0,07
26	Метод испытаний		-	-	-	ГОСТ 8269.0-97	-	ГОСТ 8269.0-97
27	Оборудование		-	-	-	Весы ВЛГ-МГ-4, сушильный шкаф	-	Весы ВЛГ-МГ-4, сушильный шкаф
28	Водопоглощение, %		-	-	-	-	-	-
29	Метод испытаний		-	-	-	-	-	-
30	Оборудование		-	-	-	-	-	-
31	Плотность, г/см^3		2,94	2,99	2,82	-	3,08	-
32	Метод испытаний		ГОСТ 30629-2011	ГОСТ 30629-2011	ГОСТ 30629-2011	-	ГОСТ 30629-2011	-
33	Оборудование		Весы ВЛГ-МГ-4	Весы ВЛГ-МГ-4	Весы ВЛГ-МГ-4	-	Весы ВЛГ-МГ-4	-
34	Удельный вес, кН/м^3		28,786	29,366	27,685	-	30,229	-
35	Метод испытаний		Физическая энциклопедия	Физическая энциклопедия	Физическая энциклопедия	-	Физическая энциклопедия	-
36	Оборудование		-	-	-	-	-	-
37	Разрушающая нагрузка		358	625	174	-	270	-
38	Предел прочности при		124	215	60	-	99	-
39	Метод испытаний		ГОСТ 21153.2-84	ГОСТ 21153.2-84	ГОСТ 21153.2-84	-	ГОСТ 21153.2-84	-
40	Оборудование		Пресс гидравлический МТS 816.04	Пресс гидравлический МТS	Пресс гидравлический МТS 816.04	-	Пресс гидравлический МТS 816.04	-

Рис. 1.24. Фрагмент табличных данных

Предполагается, что, помимо удобного хранения и доступа к данным, будет возможен их анализ с использованием современных цифровых технологий, в результате чего могут быть установлены новые зависимости и закономерности.

На первом этапе (логическое проектирование) выполнен анализ результатов испытаний образцов горных пород месторождений Кольского региона за период с 2016 по 2021 гг. Определены основные классы физико-механических свойств горных пород: плотностные, гидрофизические, механические и горно-технологические. Всего выделено 29 наименований свойств такие, как пределы прочности при сжатии и растяжении, плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона и т. д. Установлены взаимосвязи между имеющимися данными, а также породами, месторождениями.

Сформирована проектная структура БД физико-механических свойств горных пород месторождений Кольского региона (рис. 1.25), выделены основные ее сущности.

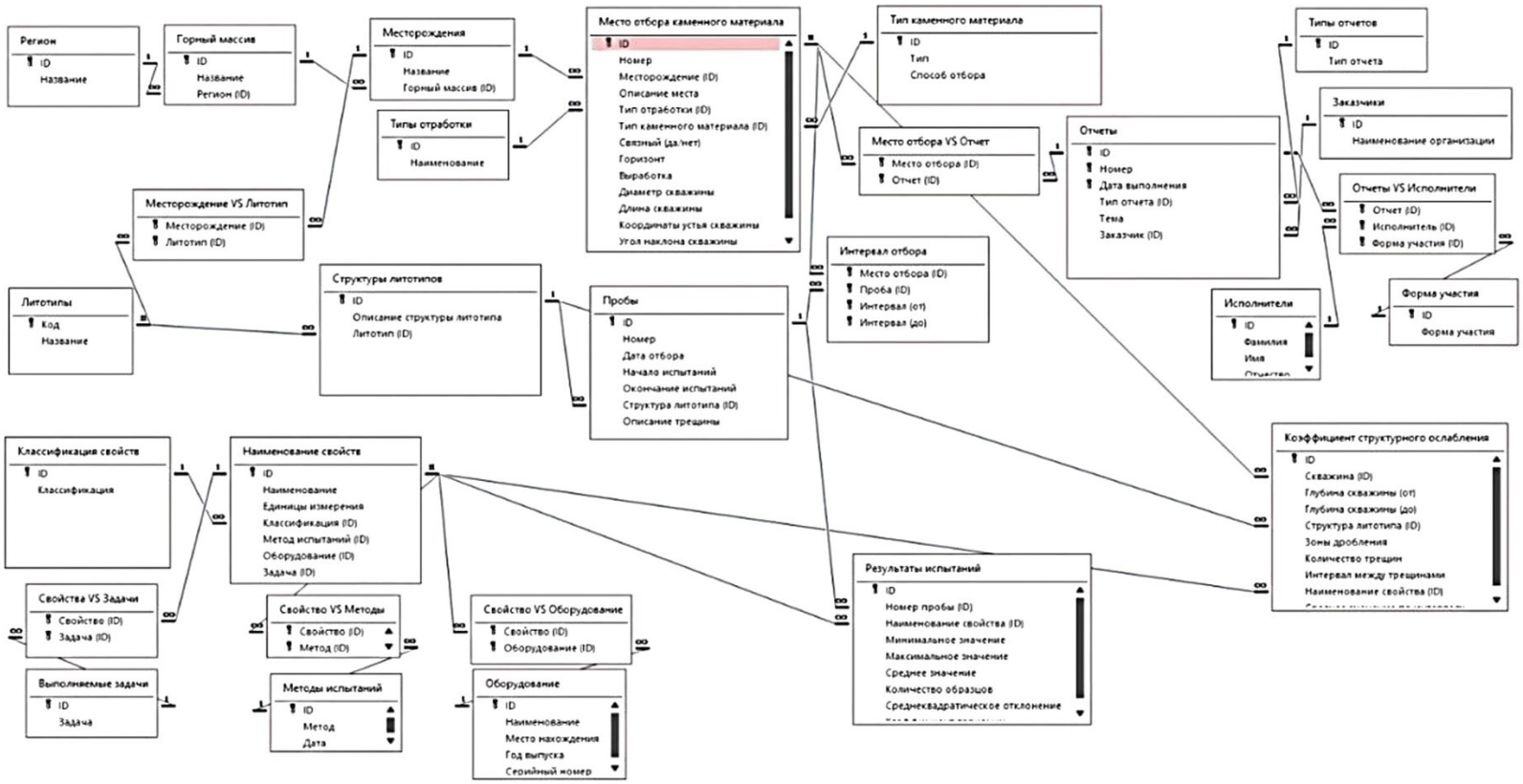


Рис. 1.25. Проектная структура базы данных физико-механических свойствгорных пород месторождений Кольского региона

Проектная структура базы данных включает в себя несколько разделов, таких, как справочники, исходные данные, вспомогательные таблицы.

Раздел «Справочники» содержит следующую информацию:

1) сведения о выполняемых задачах по определению физико-механических свойств горных пород;

2) перечень методов испытаний, необходимых для выполнения поставленных задач;

3) список оборудования для проведения конкретных видов испытаний образцов пород;

4) классификатор типовых физико-механических свойств горных пород;

5) перечень определяемых физико-механических свойств горных пород.

Раздел «Исходные данные» предназначен для заполнения сведений о формируемых пробах горных пород, литотипах, параметрах образцов, результатах испытаний. Часть информации в этом разделе доступна из справочника (перечень задач, методы испытаний, оборудование, классификация и перечень определяемых физико-механических свойств).

Для хранения сопроводительной информации, получаемой в ходе испытаний образцов горных пород (графики деформирования, паспорта прочности, фотографии образцов до и после разрушения и т. п.), разработан раздел «Вспомогательные таблицы».

На сегодняшний день по блоку физико-механических свойств горных пород полностью разработана структура базы данных, входящая в комплексную БД «Геомеханика». Реализован программный интерфейс для ввода и редактирования данных измерений. Он предполагает как внесение данных непосредственно в процессе проведения экспериментальных исследований сотрудниками института, так и работу с имеющейся информацией, представленной в табличном виде в соответствии со сформированной проектной структурой.

Предполагается, что разработанная БД будет позволять осуществлять удаленный доступ к имеющейся информации о физико-механических свойствах горных пород, структурировать ее, обрабатывать. Это, в свою очередь, приведет к ускорению процесса поиска необходимых данных и увеличит степень достоверности результатов их анализа.

2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ОПАСНЫХ ЗОН В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ГТС. РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Обеспечение безопасности при ведении крупномасштабных горных работ, строительстве сооружений в массиве горных пород предполагает организацию системы мониторинга устойчивости объектов геотехнологии и строительства. Мониторинг геомеханического состояния должен осуществляться на протяжении всего времени существования горного предприятия — от вскрытия запасов месторождения с использованием капитальных горных выработок до его закрытия и последующего использования территории в хозяйственной деятельности.

Начальный этап мониторинга устойчивости предполагает выявление потенциально опасных зон, оценку роли факторов, влияющих на устойчивость элементов, применяемых геотехнологий. Затем обосновываются методы, посредством которых необходимо осуществлять мониторинг, определяются критериальные значения его параметров. Формируемая таким образом система мониторинга должна удовлетворять принципу комплексности и иерархичности, т. е. в мониторинге должно быть задействовано несколько взаимодополняющих методов разномасштабного геоконтроля. Контроль геомеханического состояния массива горных пород должен включать в себя широкий диапазон методов — от локальных, посредством которых осуществляется мониторинг отдельных, сравнительно небольших элементов геотехнологий (отдельные подземные выработки, группы выработок, карьерные уступы, группы уступов), до региональных, контролирующих геоблоки, включающие в себя предприятие в целом. В результате формируется комплексная система геомеханического мониторинга геологической среды горнотехнических систем.

Глава 2 посвящена исследованиям, выполняемым в Горном институте КНЦ РАН в направлении инструментальной диагностики потенциально опасных зон в геологической среде горнотехнических систем и развитию систем геомеханического мониторинга.

2.1. Выявление зон локальных нарушений устойчивости, оценка роли факторов, влияющих на устойчивость элементов открытой (и подземной) геотехнологии для геомеханического районирования карьеров Кольского региона

Выявление зон локальных нарушений устойчивости может эффективно осуществляться несколькими методами (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Методы и технические средства выявления зон локальных нарушений устойчивости

№ пп	Наименование метода	Преимущества	Недостатки
1	*2*	*3*	*4*
1.	Визуальный осмотр	- Независимость от наличия дорогостоящих технических средств и аппаратуры; - оперативность осмотра; - оперативность классификации выявленных нарушений устойчивости на основе системы экспертных оценок; - рост квалификации и технического уровня сотрудников и специалистов; - универсальность применения (открытые/подземные ГР)	- Ограниченность вариантов экспозиции нарушений для обследования; - близость оператора к опасным зонам (ограничения по ТБ); - отсутствие объективных инструментальных средств измерений параметров; - осуществление оценки параметров нарушений устойчивости только в первом приближении
2.	Геодезические замеры традиционными методами (теодолит, тахеометр и др.)	- Точность замеров линейных, угловых, площадных и объемных параметров нарушений устойчивости; - нахождение оператора в безопасной зоне; - получение исходных материалов (координатно привязанных точек, линий и т. п.) для выноса на 3D-модель; - возможность организации мониторинга деформационных процессов и выявления кратко-, среднесрочных предвестников нарушений устойчивости	- Ограниченность вариантов экспозиции нарушений для обследования; - ограничения по дальнодействию замеров; - зависимость от параметров атмосферы (природные и техногенные факторы)
3.	Керн скважин и ГИС	- Точность замеров линейных, угловых, площадных и объемных параметров нарушений устойчивости; - получение исходных материалов (координатно привязанных точек и др.) для выноса на 3D-модель; - нахождение оператора (бурение и документация) в безопасной зоне; - получение комплекса параметров нарушения, характеризующих вещество (хим. и мин. составы), гидро-, геологические свойства, отражение в геофизических полях	- Линейность опробования и наблюдения (вдоль траектории скважины); - необходимость минимум трех точек подсечения в разных скважинах для реконструкции положения в пространстве; - зависимость информативности скважины от ее параметров (координаты устья, азимут, угол, глубина)

Окончание табл. 2.1

1	*2*	*3*	*4*
4.	Лазерные сканеры	- Точность замеров линейных, угловых, площадных и объемных параметров нарушений устойчивости; - высокая оперативность, производительность и большие объемы получаемой координатно привязанной информации; - получение исходных материалов (координатно привязанных точек/облака точек и др.) для выноса на 3D-модель; - возможность выделения и геометризации нарушений устойчивости в камеральных условиях (постфактум); - нахождение оператора в безопасной зоне	- Повышенные требования к обслуживанию и проведению съемки; - высокий затратный барьер на приобретение и обслуживание оборудования, а также специализированное ПО; - высокие требования к квалификации операторов съемки и обработки; - ограниченность вариантов экспозиции нарушений для обследования
5.	Фотограмметрия и съемка с применением БПЛА	- Точность замеров линейных, угловых, площадных и объемных параметров нарушений устойчивости; - всеракурсность и настраиваемый масштаб/детальность съемки; - высокая оперативность, производительность и большие объемы получаемой координатно привязанной информации; - получение исходных материалов (координатно привязанных точек/облака точек и др.) для выноса на 3D-модель; - возможность выделения и геометризации нарушений устойчивости в камеральных условиях (постфактум); - нахождение оператора в безопасной зоне; - возможность выделения и геометризации нарушений устойчивости в камеральных условиях (постфактум)	- Высокий затратный барьер на приобретение и обслуживание оборудования, а также специализированное ПО; - высокие требования к квалификации операторов съемки и обработки; - зависимость качества результатов и возможности осуществления съемки от параметров атмосферы (природные и техногенные факторы)
6.	Космосъемка	- масштаб съемки — возможность получения плана/карты всего объекта с локальным/региональным окружением; - возможность организации мониторинга деформационных процессов и выявления кратко-среднесрочных предвестников нарушений устойчивости	- один ракурс съемки (вертикальный); - высокий затратный барьер на приобретение снимков и специализированное ПО - невозможность оперативного получения материалов

Выявление зон локальных нарушений устойчивости в открытых и подземных выработках имеет свою специфику. Для открытых выработок характерна обнаженность и доступность для одновременного наблюдения всего вскрытого массива горных пород, а в случае подземных выработок имеются существенные ограничения. Кроме того, имеется значительная разница в экспозициях (количество и разнообразие) и условиях освещения поверхности выработок. В связи с этим для открытых горных работ имеют преимущество различные дистанционные методы (космо-, аэрофотосъемка, лазерное сканирование и геодезия), а для подземных выработок приоритет за визуальным осмотром.

Для подземных выработок нами выделен комплекс документируемых индикаторов и признаков (как правило, нарушения целостности пород и крепи), позволяющих получить детальную координатно привязанную информацию по геомеханическому состоянию массива пород. Методика получения этих данных предполагает выполнение серии повторных визуальных осмотров, желательно на моменты «до», «сразу после», «спустя 1, 2 и 3–4 месяца после» относительно крупных сейсмогенных событий. Выявленные признаки и индикаторы ценны тем, что позволяют их использование как для заторкеттированных, так и «свежих» выработок (табл. 2.2).

Таким образом, предложен комплекс методов и технических средств выявления зон локальных нарушений устойчивости, который позволяет выполнять первичную диагностику геомеханического состояния горных пород, ориентируясь на геологические признаки.

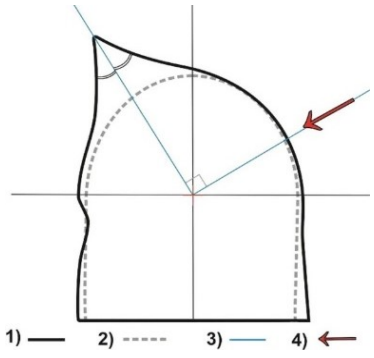
Таблица 2.2

Документируемые признаки/индикаторы геомеханического состояния горных пород

№ пп	Документируемый признак/индикатор	№№ рисунков	Тип информации	Точность информации
1.	Форма поперечного сечения выработки	2.1 (*а*, *б*)	Положение главной сжимающей компоненты поля напряжений в проекции сечения выработки	Высокая
2.	Индикаторы относительного смещения (борозды и штрихи скольжения, ориентированные заколы, гребни, синкинематические игольчатые/шестоватые кристаллы; син- и посткинемактические слоистые минералы с закономерным перекрытием; структуры вдавливания и сглаживания и т. п.)	2.2 (*а*, *б*)	Кинематические параметры нарушения, параметры стресс-состояния (тип и ориентация главных осей)	Высокая
3.	Раскрытие ранее существовавших трещин, зоны водопросачивания	2.3 (*а–г*)	Индикаторы динамических сейсмособытий	Средняя
4.	Новообразованные трещины в торкрет-тбетоне	2.4	Индикаторы динамических сейсмособытий	Средняя
5.	Выколы, заколы и др. деформации в породах и крепи (торкрет-тбетоне)	2.5 (*а*, *б*)	Индикаторы динамических сейсмособытий	Средняя



а



1) фактический контур выработки;
2) проектный контур выработки;
3) биссектриса угла разрушения поперечного сечения и нормали к ней;
4) направление горного давления (максимального сжимающего напряжения) в верхней полусфере

б

Рис. 2.1. Форма разрушения поперечного контура выработок (*а*) и схема определения ориентации главного сжимающего напряжения (*б*). Фото А. В. Пантелеева



а *б*

Рис. 2.2. «Молодые» борозды скольжения на дизъюнктивах СВ простирания, выработки рудника Расвумчорр (*а*); грубые борозды скольжения под тонким слоем натролита, рудная толща, карьер «Центральный» (*б*)



а



б



в



г

Рис. 2.3. Зоны водопросачивания (*а*, *б*); раскрытие трещины в руде (*в*); раскрытие трещины в торкрет-бетоне (*г*)



Рис. 2.4. Пример эшелонированных трещин отрыва в набрызг-бетонной крепи



а *б*

Рис. 2.5. Деформации в породах и крепи: *а* — свежий выкол в крепи; *б* — деформации и выколы в породах и крепи после сейсмособытия 06.01.2019 г.

Таким образом, предложен комплекс методов и технических средств выявления зон локальных нарушений устойчивости, который позволяет выполнять первичную диагностику геомеханического состояния горных пород, ориентируясь на геологические признаки.

2.2. Обоснование деформационных предвестников неустойчивости геологической среды ГТС

С 1998 г. ГоИ КНЦ РАН выполняет исследовательские работы по изучению закономерностей деформирования массивов горных пород с целью оценки степени устойчивости бортов и уступов карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК», а также обоснованию деформационных предвестников.

В 2004 г. ГоИ КНЦ РАН был разработан регламент на создание системы контроля состояния прибортового массива и деформаций бортов и откосов уступов карьера, поставленных на конечный контур [8]. В регламенте были рекомендованы этапы создания общей системы контроля, обоснованы методы проведения комплексных наблюдений за устойчивостью бортов и уступов карьеров на конечном контуре и конструкции наблюдательных станций.

В 2005 г. были осуществлены закладка и оборудование измерительных полигонов и наблюдательных станций, а также получена исходная информация о параметрах полей напряжений и структуре массива на участках контура карьера с вертикальными откосами уступов [9].

Начиная с 2006 г. на карьере проводились регулярные наблюдения за устойчивостью бортов и отдельных уступов карьера, при этом в качестве основного

в системе геодинамического мониторинга состояния бортов карьера принимался метод светодальномерных измерений.

С 2007 г., в дополнение к светодальномерным измерениям, начали проводиться измерения методами спутниковой геодезии. Анализ данных GPS-измерений за период 2007–2017 гг. и сопоставление их с результатами измерений методами традиционной геодезии показал, что методы спутниковой геодезии можно рассматривать в качестве основных, а традиционной — как дополнительные, применяемые в случаях, требующих повышенной точности и надежности получаемых результатов [10].

В 2015 г. для уточнения границ выделяемых структурно-геологических секторов и размеров области влияния карьера на состояние окружающего массива основной светодальномерный полигон в карьере рудника «Железный» был дополнен пунктами, которые образуют внешнее кольцо по отношению к фундаментальным пунктам.

Накопленный опыт выполнения исследований на карьере рудника «Железный» позволяет, исходя из масштабов контролируемых объектов и явлений, четко выделить задачи, методы и результаты наблюдений для двух уровней геомониторинга — регионального и локального [11].

В задачи регионального мониторинга входит [12]:

— наблюдение за процессами деформирования массива горных пород, вмещающего эксплуатируемое месторождение;

— районирование карьера на отдельные участки, по выявленному характеру процесса деформирования массива;

— выявление участков борта карьера, потенциально опасных с точки зрения устойчивости.

В задачи локального мониторинга входит [12]:

— наблюдение за выявленными потенциально опасными участками деформирования массива горных пород;

— контроль состояния потенциально опасного участка;

— прогнозирование развития процессов обрушения;

— анализ причин, характера и параметров деформаций и обрушений пород.

На протяжении довольно длительного периода времени особое внимание требовал к себе восточный участок борта карьера, который характеризуется пониженными деформационно-прочностными характеристиками и относительно высокими скоростями деформирования. Именно здесь располагался рудо-дробильный конвейерный комплекс (РДКК), перерабатывающий всю добываемую руду карьера, и поэтому к оценке условий его эксплуатации было привлечено особое внимание специалистов. С 2015 г. к выполнению инструментальных геодезических наблюдений в районе РДКК были привлечены сотрудники Горного института КНЦ РАН.

В 2014 г. АО «Ковдорский ГОК» взял в аренду радар IBIS FM (производства IDS — Италия) для проведения измерений в тестовом режиме, а в 2017 г. данный радар был куплен и установлен в карьере для постоянных наблюдений. В 2018 г. к имеющемуся радару был добавлен мобильный радар IBIS Rover.

Начиная с декабря 2019 г. оба радара располагались на северном участке борта карьера «Железный» и были направлены на юго-западный, южный и юго-восточный

участки, где активно развивались процессы деформирования массива горных пород, вызванные продвижением горных работ.

В комплекте к радарам прилагаются различного рода технические инструкции и руководства по настройке работы аппаратуры и использованию программного обеспечения, но эти руководства не регламентируют непосредственную работу с радаром для оценки устойчивости обнажений пород и не содержат критические параметры деформирования массива пород в конкретных условиях Ковдорского месторождения.

Исходя из этого, в 2018 г. была составлена специальная инструкция по обработке и анализу наблюдений за деформациями бортов и откосов уступов с помощью радара IBIS FM [13].

Организованная таким образом комплексная система мониторинга позволяет получать представительные данные о деформировании и разрушении прибортового массива пород крупного рудного карьера, которые в свою очередь являются основой для разработки мероприятий по профилактике потери устойчивости участков его борта.

2.2.1. Мониторинг устойчивости прибортового массива Ковдорского карьера геодезическими методами

Региональный геодезический мониторинг. Описание регионального геодезического полигона

Измерительный полигон регионального мониторинга состоит из внутреннего и внешнего контуров наблюдаемых пунктов (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Схема расположения фундаментальных пунктов геомеханического полигона рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» (включая утраченные пункты)

Внешнее кольцо состоит из 5 фундаментальных скальных пунктов — пункты 63, 64, 66 и 67, которые наблюдаются с 2015 г., и вновь заложенный пункт 65. Внутреннее кольцо в настоящее время состоит из 5 фундаментальных грунтовых

пунктов. Полигон включает также базовую станцию KOVD, оборудованную на крыше административно-бытового комбината рудника «Железный».

Пункты внешнего кольца предназначены для выполнения только GPS-измерений, пункты внутреннего кольца — для проведения светодальномерных измерений при наличии видимости между пунктами и GPS-измерений.

Результаты GPS-наблюдений

Регулярные наблюдения с применением технологий GPS-измерений выполняются с 2007 г., при этом пока используются спутники только системы GPS (США).

Процесс GPS-измерений заключается в обработке спутниковых сигналов и регистрации псевдодальностей и фазовых измерений с интервалом 30 сек на двух несущих частотах L1 = 1575,42 и L2 = 1227,60 МГц. Угол минимального возвышения спутников над горизонтом при измерениях принят 10°. Слежение за сигналами, их обработка и регистрация измерений производится автоматически микропрограммным обеспечением приемников.

Точность результатов измерений, получаемая при использовании имеющейся аппаратуры, складывается из приборной точности и влияний различных внешних и внутренних факторов. Аппаратурная точность, определенная изготовителем, для двухчастотных приборов при измерении в режиме статики: горизонтальная ±(3мм + 1 ppm), вертикальная — ±(5 мм + 1,5 ppm).

Параметры деформирования массива пород определяются изменением пространственного положения фундаментальных пунктов полигона, т. е. изменением их координат относительно исходного пункта, который располагается вне области деформирования массива горными работами и во всех циклах измерений принимается неподвижным [14].

С 2016 г. на административном здании рудника постоянно функционирует базовая ГНСС-станция с индексом KOVD (рис. 2.7). Схема GPS-измерений представлена на рис. 2.8.

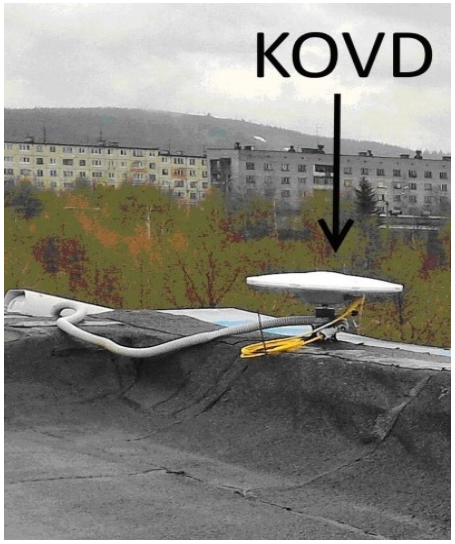


Рис. 2.7. Базовая станция KOVD

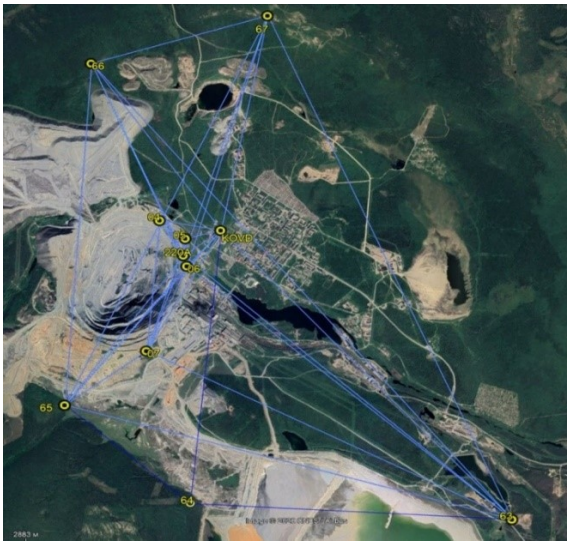


Рис. 2.8. Схема наблюдений пунктов внешнего и внутреннего кольца

Общая картина плановых смещений показана на рис. 2.9. Общая картина плановых смещений показана на рис. 2.10.



Рис. 2.9. Схема перемещений (в плане) фундаментальных пунктов внешнего контура

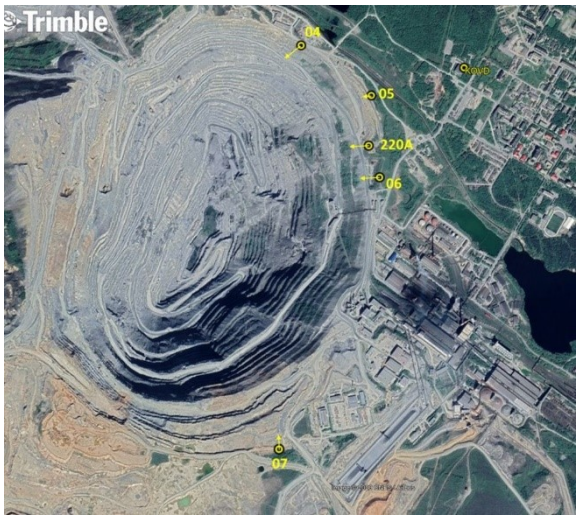


Рис. 2.10. Схема перемещений (в плане) фундаментальных пунктов внутреннего контура

Результаты очередной серии GPS-измерений на пунктах внешнего кольца геодинамического полигона показывают, что плановые смещения составляют 8–18 мм (рис. 2.9). Вектора смещений пунктов 63, 66, 67 имеют практически одинаковое северо-восточное направление. Вектор 64 имеет северо-западное смещение.

На пунктах внутреннего кольца геодинамического полигона зафиксированы плановые смещения 2–9 мм (рис. 2.10), причем все вектора смещений направлены в сторону выработанного пространства.

Для получения более полной картины сдвижений участков борта карьера по мере постановки западного, юго-западного, южного и юго-восточного участков борта карьера в конечное положение необходимо дополнять внутренний контур геодинамического полигона новыми фундаментальными пунктами.

Локальный геодезический мониторинг. Объект локального геодезического мониторинга

Ранее, в период 2005–2006 гг., были оборудованы нивелирные полигоны для локального геомониторинга на гор. +118÷142 м (восток, район РДКК). На данном участке было выполнено 20 циклов наблюдений (включая базисный).

В 2015–2016 гг. силами ГоИ КНЦ РАН и СМУУ ГУ проведена дозакладка пунктов на горизонте +142 м.

В 2015 г. заложены два грунтовых репера (№ 142G1 и 142G2), к настоящему времени по этим пунктам выполнено 18 циклов наблюдений. В 2016 г. были дополнительно заложены 4 стенных и 2 скальных репера, по ним выполнено 14 циклов

наблюдений. За время эксплуатации полигона на гор. +142 м были утрачены два скальных и один стенной реперы (№ 14207, 14208 и14209).

С целью получения дополнительных данных о смещениях массива пород в районе РДКК в 2017 г. заложена станция на горизонте +94 м. Заложено 9 скальных реперов и выполнено 12 циклов нивелирных измерений, включая базисный. За время эксплуатации полигона на гор. +94 м утрачен один скальный репер № 9401.

Кроме того, начиная с сентября 2017 г. при проведении каждого цикла наблюдений выполнялся соединительный нивелирный ход между горизонтами +118 и +94 м для фактического образования в районе РДКК единой наблюдательной станции, которая охватывает горизонты +94, +118, +130, +136, +142 м.

Схема полигона представлена на рис. 2.11.

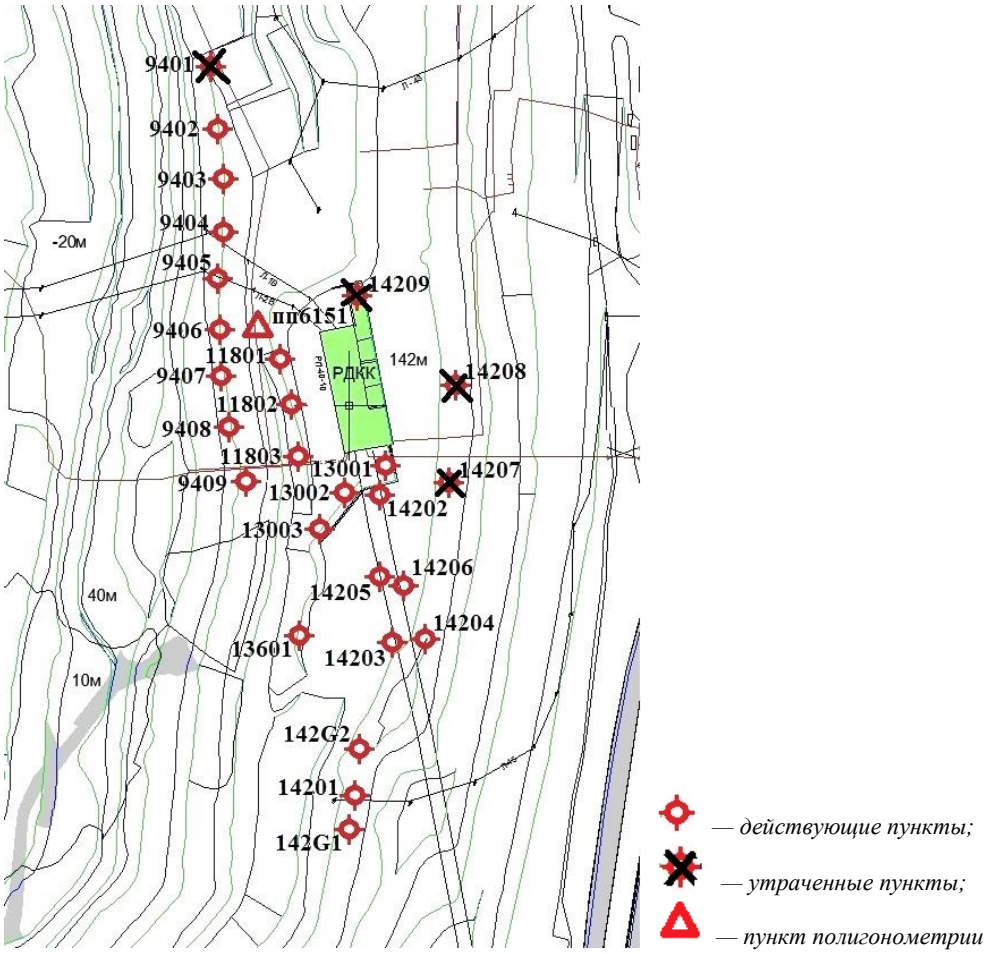


Рис. 2.11. Схема расположения пунктов локального мониторинга наблюдательных станций горизонтов +94, +118, +130 и +142 м в районе РДКК

В качестве метода наблюдения применялось нивелирование технического класса. Анализ наблюдений, выполненных до 2015 г., показал необходимость

применения нивелирования при контроле вертикальных перемещений массива пород с точностью не ниже III класса [15, 16].

До июня 2016 г. (циклы 1–4) сотрудниками Горного института измерения выполнялись оптическим нивелиром Sokkia B1 в комплекте с шашечными рейками. С 5 по 7 циклы измерения выполнялись цифровым нивелиром DINI-12 в комплекте со складными штрихкодовыми рейками. Начиная с 8 цикла (июнь 2017 г.), измерения выполняются цифровым нивелиром Trimble DINI-0.3. Средняя квадратическая ошибка измерений инструмента на 1 км двойного хода составляет ±1,0 мм. Расхождение между прямым и обратным ходом допускается не более ± 10 мм$\cdot\sqrt{L}$ (L — длина хода в километрах).

Главными целями организации мониторинга геодинамического состояния массива в районе РДКК являлись, во-первых, оценка условий безопасности его эксплуатации, во-вторых, получение информации о деформировании и разрушении приконтурного массива карьера. Исходя из этого, необходимо было получать, возможно, более полную картину деформирования массива пород на этом контролируемом участке, т. е. установить общие тенденции деформирования массива. При этом, непосредственно для оценки условий эксплуатации РДКК, наиболее существенное значение имеет степень неоднородности деформирования массива, которая может быть оценена из анализа скоростей перемещений отдельных наблюдательных пунктов на разных горизонтах карьера относительно исходного пункта.

Анализ результатов ранее выполненных измерений показал, что пункт № 14201, который принимался в качестве исходного, расположен в другом структурном блоке (вместе с пунктами № 142G1 и 142G2) по отношению ко всем остальным пунктам наблюдательной станции, поэтому при обработке результатов для некоторых пунктов фиксировались весьма существенные поднятия, что мало соответствует общей картине деформирования данного участка массива указанных горизонтов.

В связи с этим в 2017 г. при обработке результатов измерений в качестве исходного был принят пункт № 14202, расположенный на бетонной подпорной стене около здания РДКК, и все полученные ранее результаты пересчитаны. Пункту № 14202 была присвоена условная высотная отметка $H = 1{,}000$ м.

Чтобы оценить степень однородности деформирования массива пород в районе РДКК анализ полученных результатов проводился для разных групп пунктов наблюдений (отдельно по гор. +94; +118; +130 и +136; +142 м), исходя из их положения в массиве.

Гор. +142 м (восток, в непосредственной близости от РДКК)

На рис. 2.12 представлены величины вертикальных смещений пунктов от базисного цикла (17.06.2015 г.) и относительно исходного пункта № 14202.

Как следует из данных, показанных на рис. 2.12, для пунктов гор. +142 м в 2020 г. наблюдаются изменения вертикальных перемещений от предыдущего цикла на –2÷4 мм, при этом зафиксированные поднятия пунктов находятся практически в пределах точности измерений прибора. На дату последних измерений относительно базисного цикла поднятия составляют 3÷7 мм.

На рис. 2.13 представлены скорости вертикальных перемещений пунктов наблюдений.

Как видно из графиков, представленных на рис. 2.13, диапазон изменения скоростей смещений пунктов в 2020 г. составляет: 17 цикл — 0,0 мм/сут; 18 цикл — (0,0÷0,1) мм/сут;19 цикл — (0,0÷0,1) мм/сут.

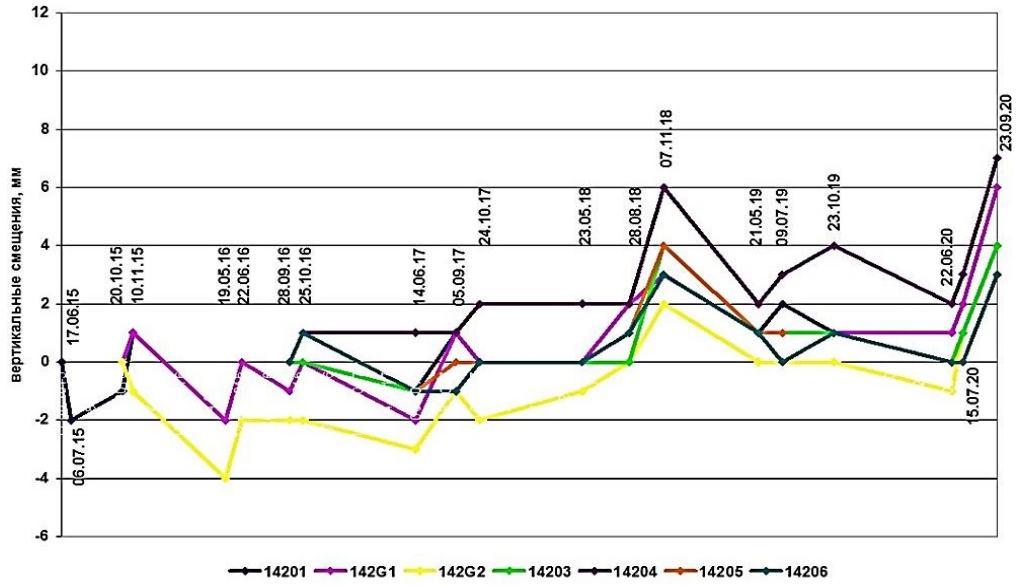


Рис. 2.12. Вертикальные смещения пунктов гор. +142 м относительно исходного пункта (№ 14202)

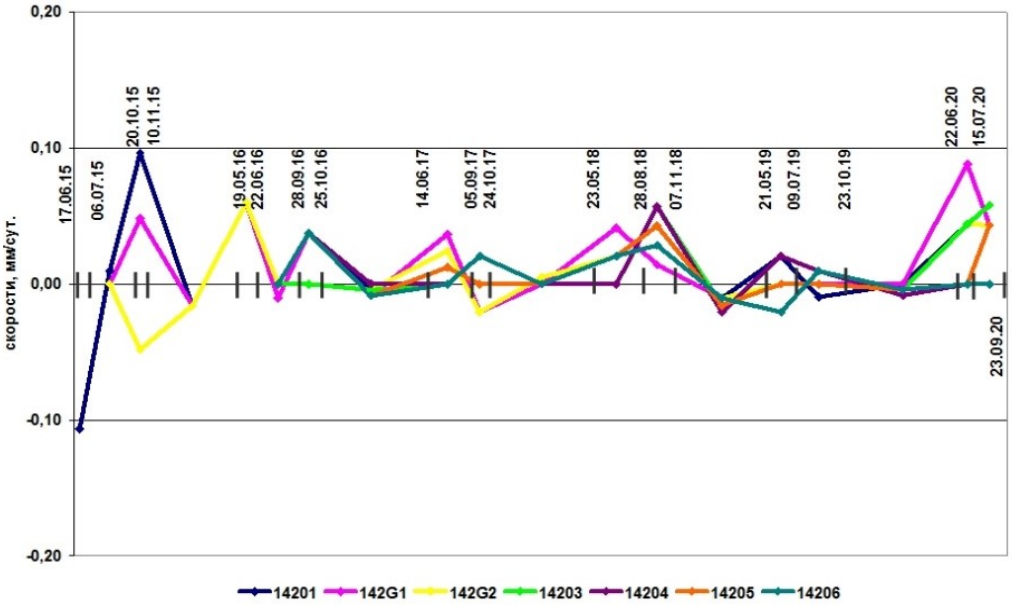


Рис. 2.13. Скорости вертикальных смещений пунктов гор. +142 м, мм/сут

Гор. +136 и +130 м (восток, в непосредственной близости от РДКК)

На рис. 2.14 представлены величины вертикальных смещений пунктов от базисного цикла (17.06.2015 г.), а на рис. 2.15 — графики скоростей их смещений.

Из данных, приведенных на рис. 2.14, следует, что в 2020 г. смещения (поднятия и оседания) пунктов наблюдений от предыдущего цикла находятся в пределах точности измерений (–2÷1) мм. На дату последних измерений относительно

базисного цикла зафиксировано поднятие в пределах (3÷6 мм). При этом диапазон изменения скоростей смещений пунктов в 2020 г. (рис. 2.15) составляет: 17 цикл — 0,0 мм/сут; 18 цикл — (–0,1÷0,0) мм/сут; 196 цикл — 0,0 мм/сут.

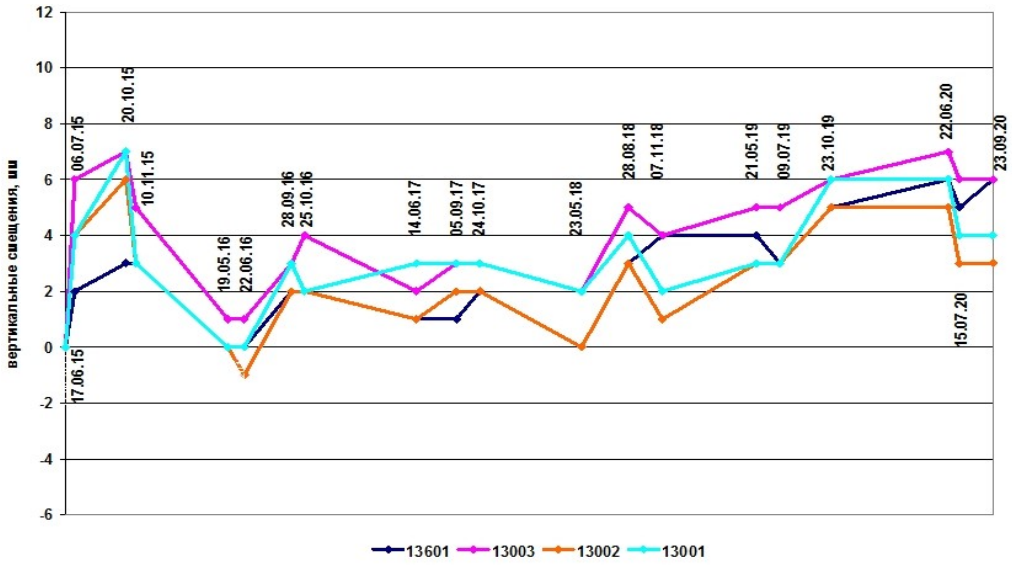


Рис. 2.14. Вертикальные смещения пунктов гор. +136 и +130 м относительно исходного (№ 14202)

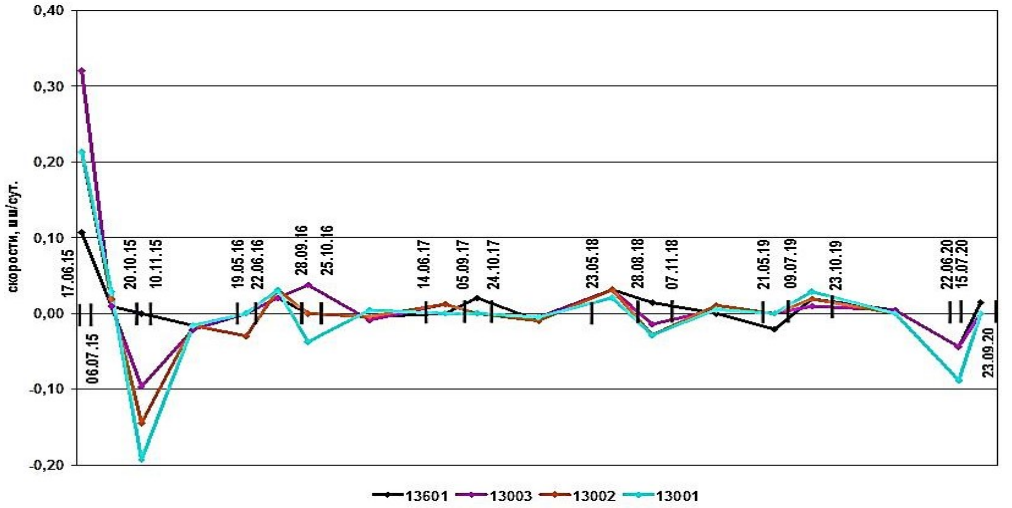


Рис. 2.15. Скорости вертикальных смещений пунктов гор. +136 и +130 м, мм/сут

Гор. +118 м (восток, ниже РДКК)

На рис. 2.16 показаны величины вертикальных смещений пунктов наблюдений от базисного цикла (17.06.2015 г.), а на рис. 2.17 — графики скоростей их смещений.

Из данных, показанных на рис. 2.16, следует, что величины смещений (поднятия и оседания) пунктов наблюдений от предыдущего цикла в 2020 г. изменяются в диапазоне (–3÷1) мм, т. е. находятся в пределах точности измерений. На дату последних измерений относительно базисного цикла зафиксировано поднятие в пределах (1÷7) мм.

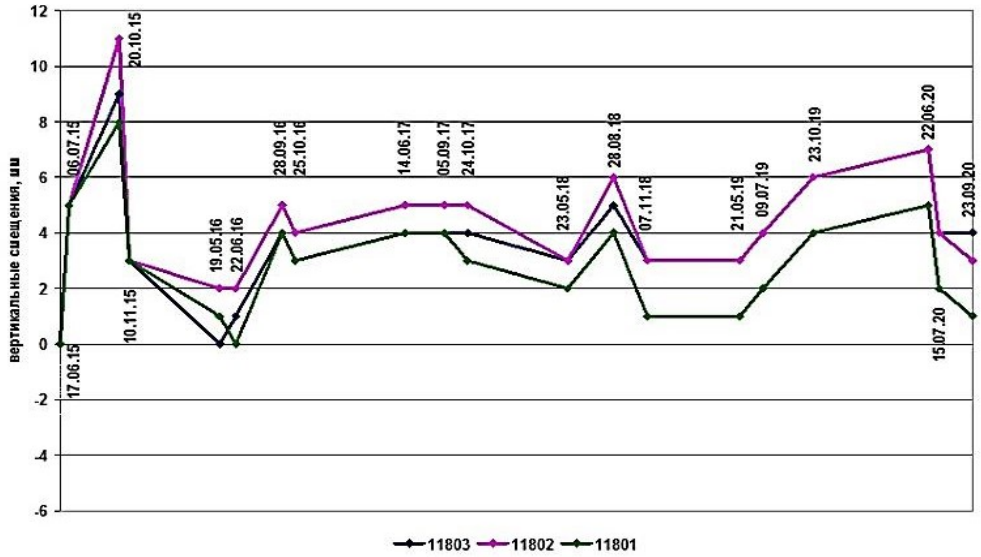


Рис. 2.16. Вертикальные смещения пунктов наблюдений гор. +118 м относительно исходного (№ 14202)

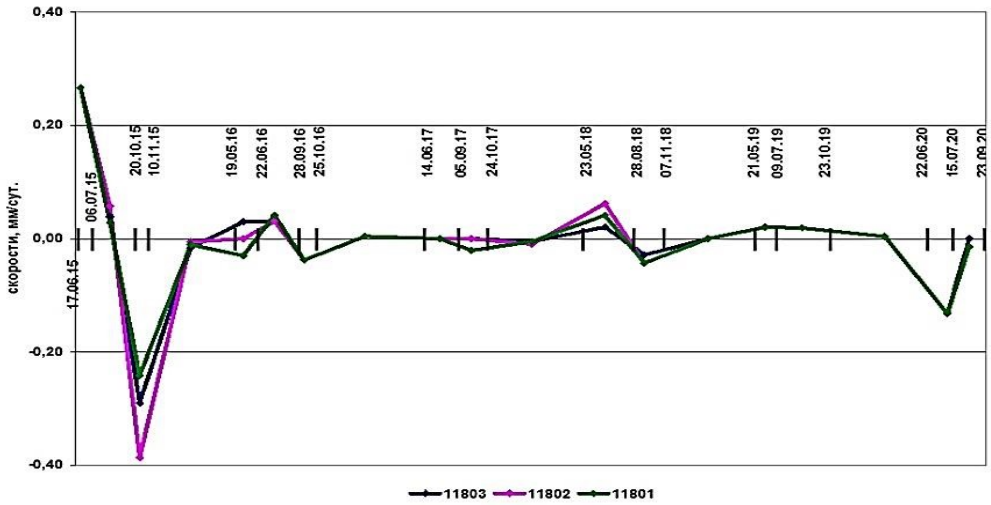


Рис. 2.17. Скорости вертикальных смещений пунктов гор.+118 м, мм/сут

Скорость смещений пунктов на этом горизонте (рис. 2.18) в 2020 г. составляет: 17 цикл — 0,0 мм/сут; 18 цикл — –0,1 мм/сут; 19 цикл — 0,0 мм/сут.

Гор. +94 м (восток)

На рис. 2.18 показаны величины вертикальных смещений пунктов наблюдений от базисного цикла (14.06.2017 г.), а на рис. 2.19 — графики скоростей их смещений.

Из данных, приведенных на рис. 2.18, следует, что в 2020 г. смещения (поднятия и оседания) пунктов наблюдений от предыдущего цикла составляют (–1÷+7) мм. Исключение в 17 цикле составляет репер № 9407. Его поднятие составило +22 мм. Вероятной причиной такого резкого изменения высоты является воздействие

льда на оголовок репера. В следующих циклах (18 и 19) его состояние стабилизировалось, зафиксированы оседания 1 и 2 мм соответственно, что находится в пределах точности измерений. На дату последних измерений, относительно базисного цикла, зафиксировано изменение в пределах (–1÷7 мм), для репера № 9407 — +22 мм.

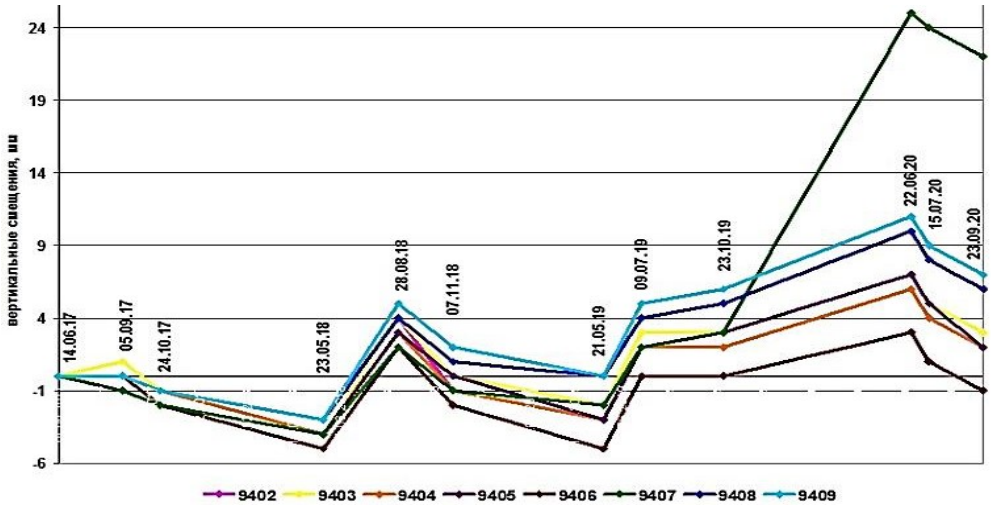


Рис. 2.18. Вертикальные смещения пунктов наблюдений гор. +94 м относительно исходного (№ 14202)

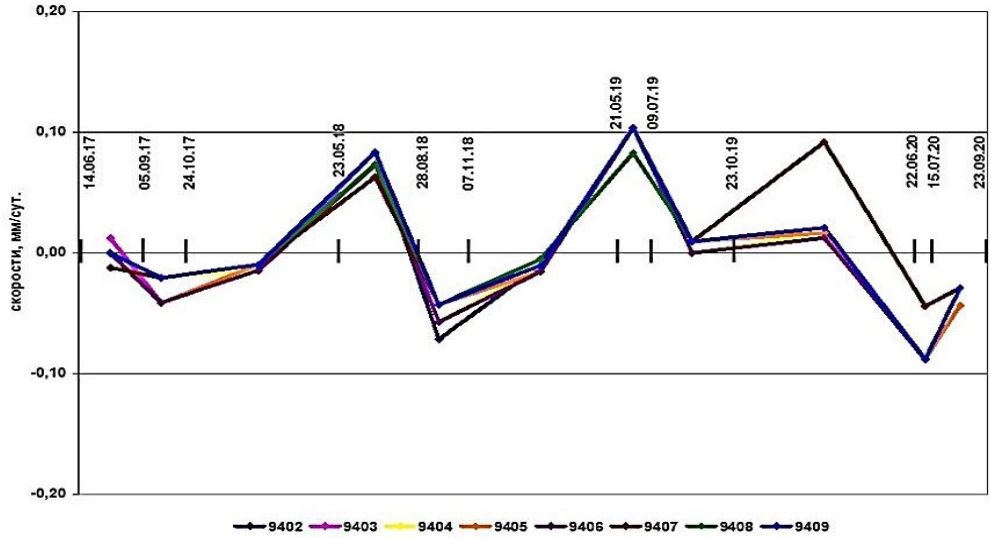


Рис. 2.19. Скорости вертикальных смещений пунктов гор. +94 м, мм/сут

Диапазон изменения скоростей смещений пунктов (рис. 2.19) за рассматриваемый период составляет: 17 цикл — (0,0÷0,1) мм/сут; 18 цикл — (–0,1÷0,0) мм/сут; 19 цикл — 0,0 мм/сут.

Таким образом, результаты выполненных измерений показали, что величины смещений пунктов наблюдений колеблются для гор. +142, +136, +130, +118, +94 м в диапазоне (–3÷+5) мм, т. е. практически в пределах точности измерений.

Колебания скоростей смещений находятся в пределах (–0,1÷+0,1) мм/сут, что свидетельствует о достаточно равномерном смещении и деформировании всего контролируемого участка борта.

Судя по незначительному разбросу скоростей деформирования массива на контролируемом участке (практически в пределах точности измерений), полученные данные позволяют сделать вывод о том, что геомеханическая ситуация на 23.09.2020 г. оставалась достаточно стабильной.

Однако наблюдения на заложенных пунктах необходимо продолжать, поскольку непосредственно под РДКК (в отм. +118÷+40 м) располагается потенциально неустойчивый участок массива, смещения которого нельзя исключить при дальнейшем ведении горных работ, особенно в период сезонных водопритоков.

2.2.2. Результаты анализа данных радарной системы мониторинга устойчивости борта карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК»

Механизм развития деформаций и разрушений пород в массивах иерархично-блочной структуры применительно к условиям контроля устойчивости бортов и уступов карьеров обусловливает иерархичную структуру комплексной системы мониторинга, в частности, разделения ее на региональный и локальный уровни.

На региональном уровне мониторинг целесообразно выполнять с использованием методов космической геодезии (GPS-технологий) и светодальномерных измерений по специально оборудованным фундаментальным пунктам геодинамических полигонов.

Для локального мониторинга наиболее эффективным методом в настоящее время является применение наземных интерферометрических радаров.

В 2014 г. на борту карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК» был установлен радар IBIS FM производства компании IDS (Италия). На сегодняшний день радарная система мониторинга насчитывает уже 4 радара и покрывает практически все участки борта карьера.

Интерферометрический радарный мониторинг устойчивости бортов карьеров

В 2002 г. в Университете Квинсленда (Австралия) группа исследователей разработала сканирующую радиолокационную систему для мониторинга устойчивости бортов карьеров с использованием дифференциальной интерферометрии. На сегодняшний день радарные системы мониторинга являются одним из лучших методов локального мониторинга устойчивости уступов и бортов карьеров и разрезов.

Принцип проведения измерений радаром отличается от принципов, используемых в традиционном маркшейдерском оборудовании.

Измерения, выполняемые радаром, основаны на использовании эффекта наложения (интерференции) электромагнитных волн.

Радар является активным датчиком и посылает импульс с частотой 17,1–17,3 ГГц. Импульс взаимодействует с отражающей поверхностью, частично поглощается и частично отражается в сторону радара. Интерферометрический анализ позволяет получить данные о смещении объекта путем сравнения информации, собранной

в разное время, о сдвиге фаз отраженного от объекта сигнала (рис. 2.20). Величина смещения прямо пропорциональна величине разности фаз [17].

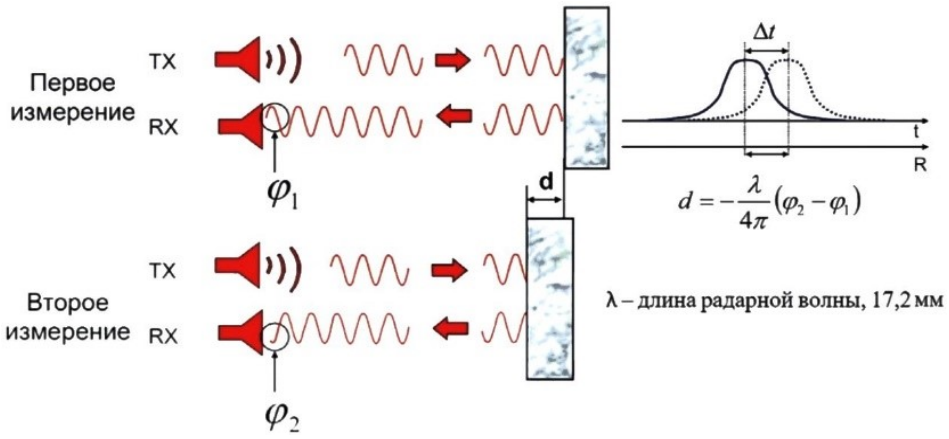


Рис. 2.20. Принцип работы радарной системы

Все существующие инструменты делятся на радары с реальной апертурой и синтезированной апертурой.

Во время каждого измерения отражение радарного сигнала принимается от каждого пикселя. Это отражение дает информацию об амплитуде сигнала и фазе. Чем меньше размер пикселя, наложенного на модель объекта, тем более детально можно наблюдать за массивом горных пород.

На рис. 2.20 φ1 и φ2 — величины фаз до смещения и после смещения соответственно, *d* — зафиксированное смещение.

Зачастую радары с синтезированной апертурой имеют размер пикселя меньше, чем радары с реальной апертурой и способны производить съемку с больших расстояний до объекта мониторинга.

Основным преимуществом радарного мониторинга устойчивости бортов карьеров является их способность проводить измерения 24 ч в сутки в любую погоду, невзирая на осадки (снег, дождь, град, туман) или плохую видимость в карьере, вызванную пылью, выхлопными газами и т. п. Программное обеспечение радара способно за короткое время проанализировать данные измерений и при необходимости выдать предупреждение об эвакуации персонала. Кроме того, заявленная производителями точность измерения (0,1 мм) является самой высокой среди всех остальных геодезических методов мониторинга.

Минусами является отсутствие инструктивных материалов для сотрудников предприятий по использованию данных систем.

С момента выпуска первого радара прошло больше 19 лет и на сегодняшний день радарные технологии активно применяются на многих зарубежных месторождениях. Например, на золотом руднике Geita (Танзания) [18], в карьере Palabora (Южная Африка) [19], в Siilinjärvi (Финляндия), Sadiola Gold mine (Мали) и Sunrise Dam Gold mine (Австралия) [20], Turtle Mountain (Канада) [21] и многие

др. Одно из самых крупных обрушений, произошедшее в Bingham-Canyon, было спрогнозировано при помощи интерферометрических радаров.

Применение радарной системы мониторинга в условиях карьера «Железный»

В 2014 г. АО «Ковдорский ГОК» стационарно установил на контуре карьера рудника «Железный» 2D-радар с синтезированной апертурой IBIS FM фирмы IDS в контейнерном исполнении [22–27]. Дальность действия — от 10 до 4000 м. Размер пикселя — 4,4 на 0,75 м (при удалении на 1000 м) и 8,8 на 0,75 м (при удалении на 2000 м). Рабочие температуры окружающей среды в контейнерном исполнении — от –50 до +55°.

После установке радара на контуре карьера при настройке системы оповещения персонала была поставлена задача определения критических параметров деформирования массива, при превышении значений которых неизбежно произойдет потеря устойчивости.

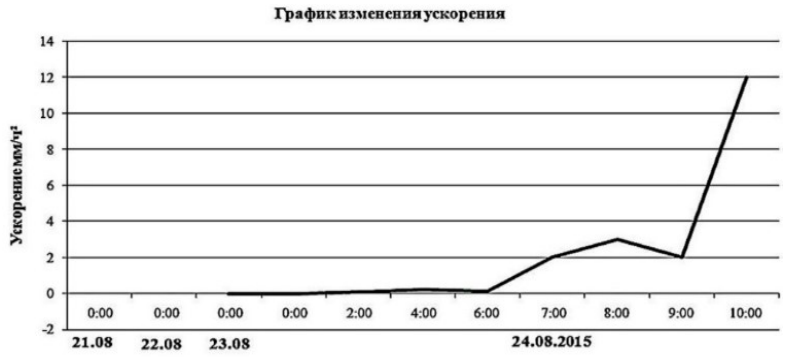
Для этого в период с 2014 по 2015 гг. собиралась и анализировалась информация об произошедших обрушениях различного масштабного уровня.

В этот период радар зафиксировал несколько незначительных обрушений от 200 до 500 м^3 и одно, относительно более крупное, размером 100 тыс. м^3, которое произошло 24 августа 2015 г. на восточном участке борта (гор. +70 м; –35 м) [13].

По величинам перемещений, предшествующим обрушениям, рассчитывались значения скоростей и ускорений, строились соответствующие графики. В качестве примера на рис. 2.21 приведены графики скоростей и ускорений смещений для обрушения, произошедшего 24 августа 2015 г.



а



б

Рис. 2.21. Графики изменений скорости (*а*) и ускорения (*б*) смещений во времени (обрушение 24 августа 2015 г.)

По данным, приведенным на рис. 2.21, видно, что резкое увеличение значений ускорения и скорости произошло около 7 ч 24 августа. Ускорение увеличилось с 0,13 до 2 мм/ч², а скорость — от 1 до 3 мм/ч. После этого скорость развития процесса продолжала возрастать до момента обрушения, которое наступило через 4 ч.

Сопоставляя данные об обрушении 24 августа 2015 г., зафиксированные радаром IBIS FM, с другими случаями потери устойчивости был сделан вывод о том, что в качестве основного параметра деформирования необходимо выбрать скорость смещения массива.

Также было определено, что для выявления и дальнейшего наблюдения за деформациями целесообразно выставить 3 пороговых значения по скорости смещений (1, 2 и 3 мм/ч), причем скорость 3 мм/ч можно было предварительно считать критическим параметром деформирования массива, после превышения которого происходит обрушение.

После определения предварительной критической скорости деформирования ее достоверность необходимо было проверить на других обрушениях, которые произошли в условиях Ковдорского месторождения.

За период с октября 2018 г. по ноябрь 2019 г. было зафиксировано 5 случаев потери устойчивости участков борта карьера: из них 3 случая представляют собой локальные обрушения в массиве скальных пород; 2 обрушения представляют собой оползни, произошедшие в грунтовом массиве. Практически все случаи потери устойчивости имели объем 100 м^3 и менее.

Для уточнения критических значений скоростей перемещений были проанализированы наиболее характерные обрушения различного масштабного уровня в условиях скальных массивов горных пород [28].

Первый случай произошел 08 октября 2018 г. Процесс деформирования от начала и до момента потери устойчивости составил приблизительно 21 ч. Предельное зафиксированное смещение области составило 20 мм. На рис. 2.22 приведен график скорости развития процесса деформирования во времени с отмеченными предварительными критическими значениями по скорости.

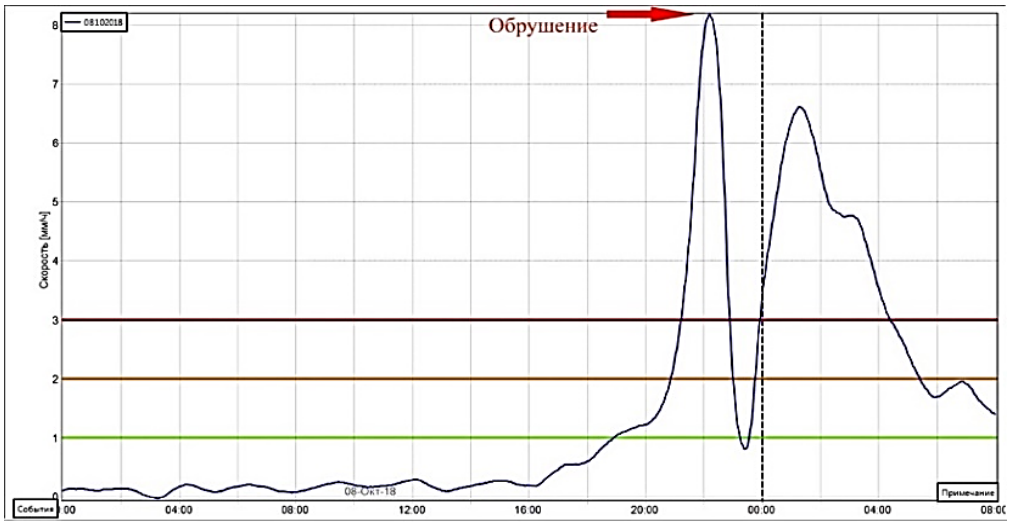


Рис. 2.22. График скорости смещения массива 08.10.2018 с выставленными предельными значениями

Обрушение произошло около 1 ч. после превышения установленной критической скорости 3 мм/ч.

Второй случай произошел 16 октября 2018 г. Процесс деформирования, до момента обрушения, составил приблизительно 30 ч. Предельное зафиксированное смещение области составило 42 мм. На рис. 2.23 приведен график скорости развития процесса деформирования во времени с отмеченными предельными значениями по скорости. Предупреждение сработало около 9 ч утра, т. е. за 3 ч до обрушения, произошедшего в 12 ч.

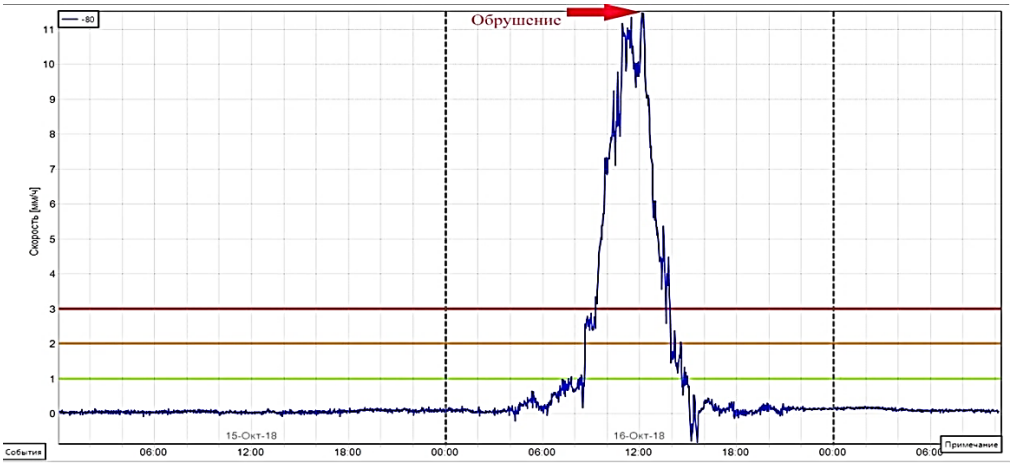


Рис. 2.23. График скорости смещения массива 16.10.2018 г. с выставленными предельными значениями

Третье обрушение произошло 17 октября 2018 г. (рис. 2.24). Процесс деформирования и последующего разрушения происходил в массиве слабых и дезинтегрированных пород. Предельное смещение составило 350 мм. Процесс деформирования, до момента основного обрушения, составил приблизительно 24 ч.

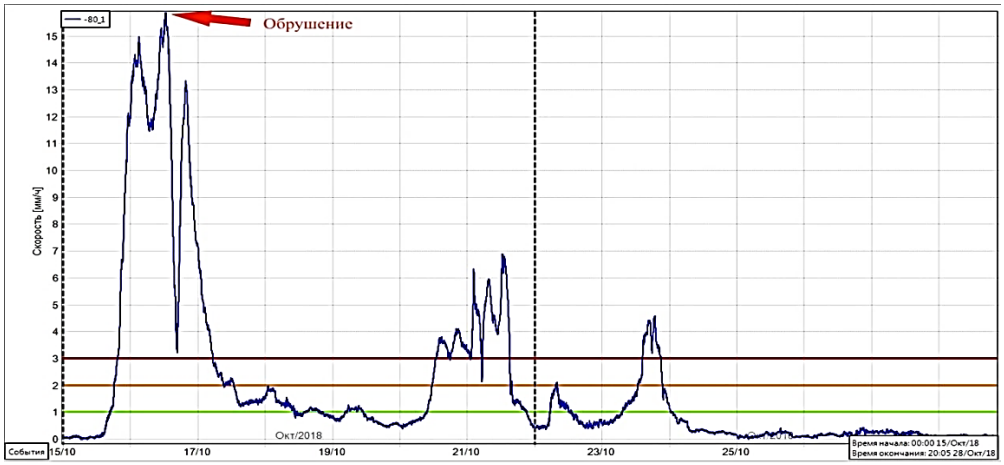


Рис. 2.24. График скорости смещения массива 17.10.2018 г. с выставленными предельными значениями

Время от превышения предельной скорости и до момента основного обрушения составило приблизительно 20 ч. На графике рис. 2.24 также видно,

что процесс деформирования продолжался еще 10 дней после обрушения и на этом участке наблюдались незначительные осыпи.

Из приведенных выше графиков скорости видно, что во всех случаях после превышения критической скорости в 3 мм/ч через определенные моменты времени происходит обрушение участка массива. На сегодняшний день не было случаев, когда смещающийся участок массива при превышении скорости в 3 мм/ч не обрушался бы, а замедлял скорость своего движения. Однако из данных графиков также видно, что процесс деформирования разделен на этапы, которые характеризуются своими скоростями.

На рис. 2.25 и 2.26 показаны графики скорости смещения массива для обрушений, которые произошли 08.10.2018 г. и 16.10.2018 г. с этапами развития процессов деформирования.

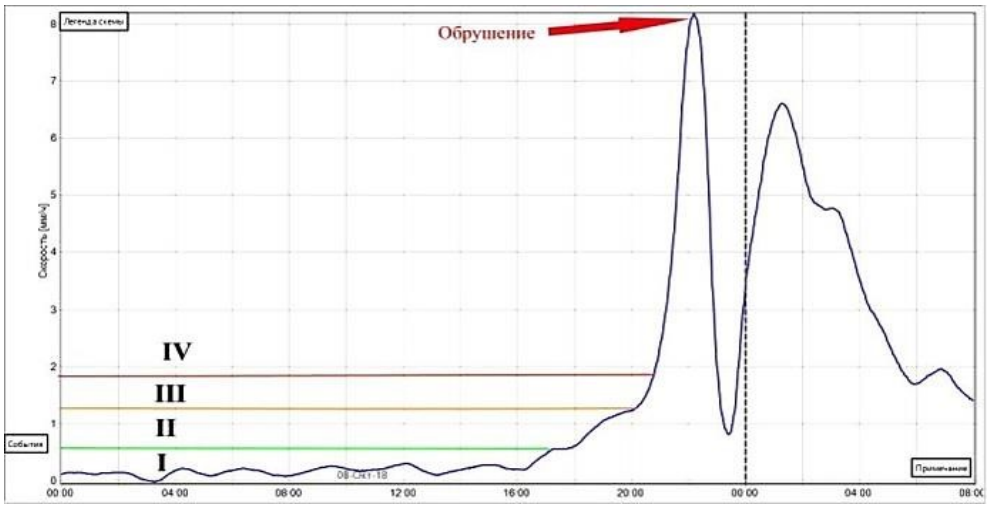


Рис. 2.25. График скорости смещения массива 08.10.2018 г. с этапами деформирования



Рис. 2.26. График скорости смещения массива 16.10.2018 г. с этапами деформирования

Первый этап характеризуется увеличением скорости до 0,5 мм/ч и дальнейшим развитием процесса деформирования с постоянной скоростью. Второй

этап — увеличение скорости от 0,5 до 1,3 мм/ч. На третьем этапе скорость возрастает до 1,8 мм/ч. Четвертый этап характеризуется резким увеличением скорости и заканчивается в момент обрушения.

На другом графике также выделяется 4 этапа. Первый этап характеризуется увеличением скорости до 0,8 мм/ч. На втором этапе происходит сначала снижение скорости практически до 0, а после этого заметное увеличение до 1,5 мм/ч. На третьем этапе скорость также уменьшается до 1,1 мм/ч, а затем, практически мгновенно, увеличивается до 2 мм/ч. На четвертом этапе скорость продолжает увеличиваться до момента обрушения.

Учитывая данные о случаях потери устойчивости, произошедших 8 и 16 октября 2018 г., было определено, что значение критической скорости 3 мм/ч является достоверным, однако при настройке системы оповещения целесообразнее выставлять критическую скорость смещения массива — 2 мм/ч. Это позволит раньше предупредить оператора об опасности и даст больше времени на эвакуацию рабочего персонала.

2.2.3. Оценка состояния породного массива бортов карьера по параметрам сейсмической эмиссии на основе данных системы микросейсмического мониторинга рудника «Железный» Ковдорского ГОКа

Микросейсмический мониторинг прибортового массива в настоящее время применяется на целом ряде карьеров в целях своевременного выявления процессов внутри породного массива, влияющих на устойчивость бортов. Микросейсмический мониторинг в карьерах, как правило, организуется на основе сейсмических сетей из сейсмодатчиков, установленных в скважинах различной глубины, пробуренных в бортах карьера. Практика эксплуатации таких систем показывает, что срок их эксплуатации зачастую ограничен проводимыми на бортах карьера горными работами.

Ниже обсуждаются различные аспекты создания сейсмической сети на основе глубоких наклонных скважин с устьями, вынесенными за пределы конечного контура карьера. Такая организация сейсмосети обеспечивает возможность ее длительной эксплуатации вне зависимости от проводимых на бортах карьера горных работ. Работы проведены в карьере рудника «Железный» Ковдорского ГОКа.

Техническая реализация сейсмосети системы мониторинга

Сооружение глубоких наклонных скважин для установки сейсмодатчиков является наиболее технически сложной и дорогостоящей частью работ по созданию сейсмосети. Исходя из имеющихся ресурсов было принято решение ограничиться минимальным количеством скважин, достаточным для создания сейсмосети, охватывающей регистрацией значительную часть борта карьера, кроме того, из тех же соображений был выбран минимальный диаметр скважин, достаточный для размещения сейсмодатчиков — HQ (96 мм).

Всего пробурено 4 скважины с устьями, вынесенными за границы конечного контура карьера. Каждая скважина оснащалась тремя трехкомпонентными датчиками, расположенными на расстояниях 100, 400 и 700 м от устья. Параметры скважин приведены в табл. 2.3. На рис. 2.27, 2.28 показано пространственное расположение сейсмодатчиков в карьере и внешний вид ящика с оборудованием.

Таблица 2.3

Параметры скважин для установки сейсмических датчиков

№	№ скв.	*x*	*y*	*z*	Азимут	Угол, град.	Глубина, м	Диаметр
1	SRK_001	–1225	–419	212	278	55	1020	HQ (96 мм)
2	SRK_002	–2783	60	259	120	58	1040	
3	SRK_003	–1365	330	232	240	55	1040	
4	SRK_004	–1430	–1269	271	308	55	1100	

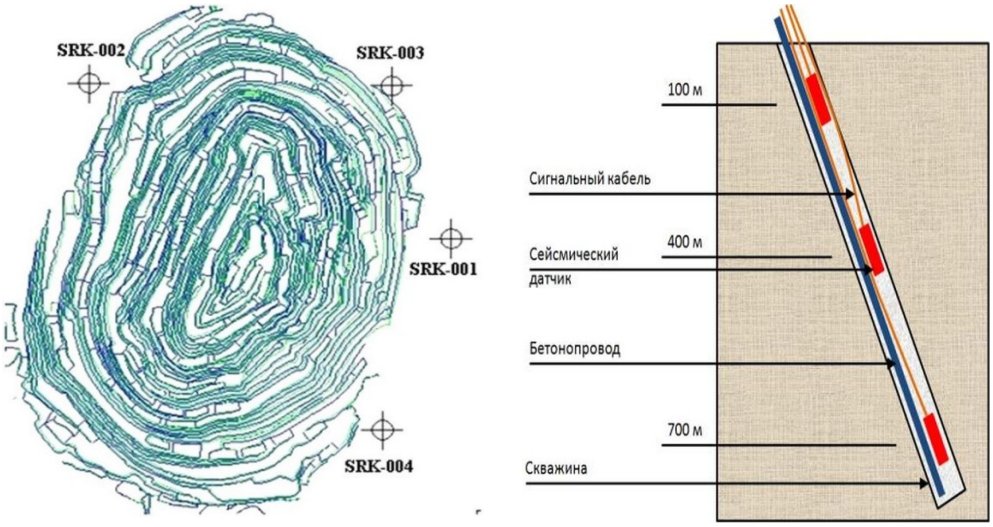


Рис. 2.27. Расположение скважин с сейсмодатчиками на плане карьера и схема расположения датчиков в скважинах

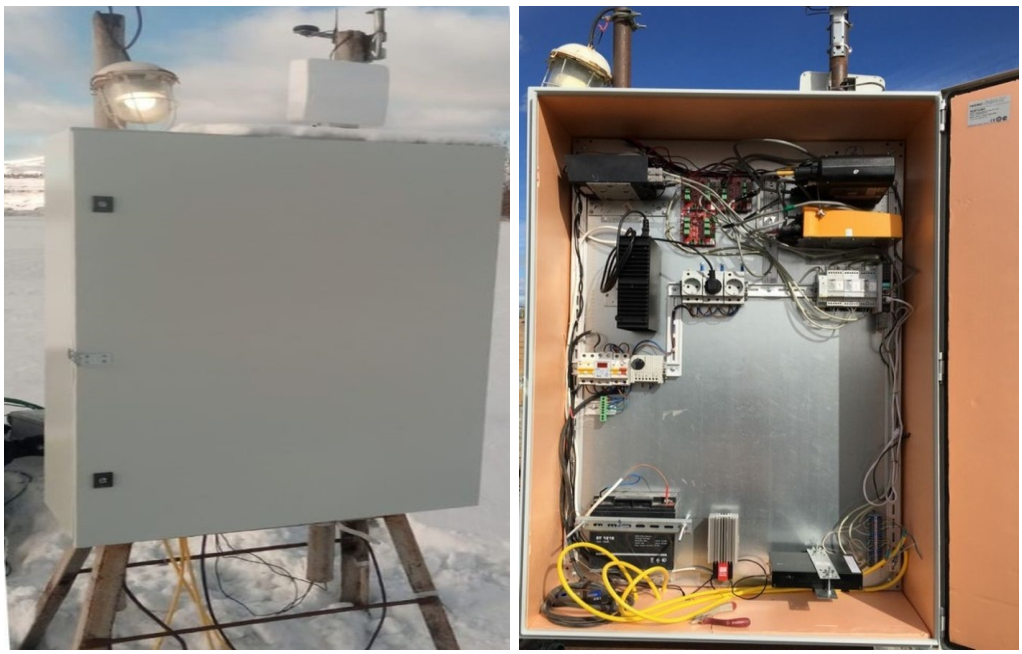


Рис. 2.28. Пункт удаленной сейсмической регистрации на уступах карьера

Аппаратура сейсмической сети. Сейсмические датчики

Диаметр скважин накладывал ограничения на геометрические размеры используемых в сети сейсмодатчиков, вследствие чего для установки были выбраны скважинные геофоны 3G28 производства Института горной сейсмологии (IMS). Данный тип сейсмических датчиков имеет следующие характеристики: собственная частота — 28 Гц; диапазон — 8,5–2000 Гц; чувствительность — 13,5 В/м/с; сопротивление катушки — 1500 Ом.

Сигналы от сейсмических датчиков выводятся через сейсмические кабели. Физические параметры кабелей: диаметр — 10 мм, масса — 90 кг/км.

Вблизи устьев каждой скважины на поверхности размещаются пункты удаленной сейсмической регистрации в шкафах, защищенные по стандарту IP56 (рис. 2.29).

Пункты удаленной сейсмической регистрации

Сбор сейсмической информации выполняется на основе разработанного пункта удаленной сейсмической регистрации, реализующего прием и передачу информации от датчиков одной скважины на удаленный пункт сбора и обработки сейсмической информации. Пункты расположены в карьере на поверхности, вблизи от устьев скважин, в которых установлены сейсмодатчики.

Каждый пункт регистрации включает в себя следующее основное оборудование:

— сейсморегистратор производства IMS (2 шт.). Назначение: оцифровка аналоговых сигналов от сейсмодатчиков (до 12 сейсмических каналов), выделение полезных сигналов, передача их в обрабатывающий центр;

— GPS-модуль. Назначение: точная привязка к мировому времени;

— сервер последовательного порта Moxa NPort IA-5250;

— GSM-маршрутизатор Teleofis GTX-300-S. Назначение: связь сейсморегистраторов с обрабатывающим центром через интернет.

На рис. 2.29 приведена полная функциональная схема пункта удаленной регистрации.

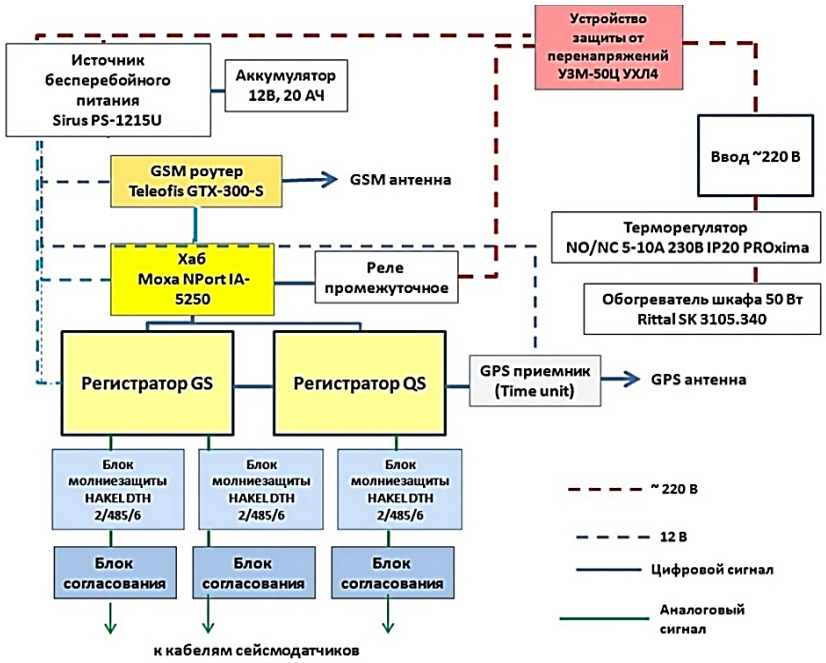


Рис. 2.29. Функциональная схема пункта удаленной сейсмической регистрации

Оборудование пункта объединено в локальную сеть пункта.

Регистратор GS оснащен интерфейсом Ethernet и подключен к GSM-маршрутизатору напрямую. Регистратор QS работает в связке с GPS-модулем точного времени. Он оснащен только последовательным портом. Для организации его связи с ПО RTS через IP-сеть используется сервер последовательного порта Moxa NPort (один последовательный порт) и специальное ПО на сервере реального времени.

Второй последовательный порт Moxa NPort в связке с промежуточным реле используется для контроля наличия и качества внешнего питания. Специальная служба, запущенная на сервере данных, с заданной периодичностью подключается к серверу Moxa NPort и выполняет запись данных с последующей попыткой чтения. Промежуточное реле при наличии питания 220 В замыкает контакты Rx и Tx последовательного порта, и чтение проходит успешно. При пропадании питания контакты размыкаются и чтение завершается с ошибкой. Служба сравнивает текущий результат с предыдущим и при изменении отправляет оповещении по электронной почте.

Сервер последовательного порта Moxa NPort также подключен к GSM-маршрутизатору.

Связь через мобильный интернет и работу VPN обеспечивает GSM-маршрутизатор.

Общая схема организации сейсмического мониторинга

Информационная система сейсмического мониторинга включает в себя:

— удаленные пункты регистрации;

— сервер реального времени (Real Time Server — RTS);

— сервер данных;

— рабочее место геофизика;

— рабочее место оператора.

Логическим центром системы является *сервер RTS*. Его задача — координация работы пунктов регистрации, сбор и объединение данных, собранных пунктами. *Сервер RTS* размещен в Горном институте КНЦ РАН. Связь аппаратуры пунктов с сервером осуществляется через мобильный интернет, для чего на каждом пункте установлен GSM-маршрутизатор. *Сервер данных* служит для хранения и первичной обработки собранных данных. *Рабочее место геофизика* обеспечивает возможности анализа собранной информации, оценки состояния системы и оперативного управления процессом мониторинга. *Рабочее место оператора* предназначено для оперативного управления процессом мониторинга. Таких рабочих мест также может быть несколько, в том числе и удаленных.

С точки зрения информационного обмена система сейсмического мониторинга состоит из нескольких независимых локальных IP-сетей, связанных между собой через глобальную сеть Интернет посредством виртуальной частной сети. Схема информационного обмена системы мониторинга приведена на рис. 2.30.

Сервер реального времени и сервер данных составляют ядро системы. Они подключены к локальной вычислительной сети Горного института. К этой же сети подключены рабочие места геофизика/оператора, расположенные в институте.

Аппаратура каждого пункта регистрации объединена в отдельную локальную сеть с собственным диапазоном IP-адресов.

Информационная связь пунктов регистрации и удаленных рабочих мест с ядром системы, а также связь локальных рабочих мест с пунктами регистрации обеспечивается посредством виртуальной частной сети (Virtual Private Network — VPN). Эту сеть,

включая установку необходимых IP-маршрутов, поддерживает сервер OpenVPN, в настоящее время установленный на сервере реального времени, имеющем статический IP-адрес.

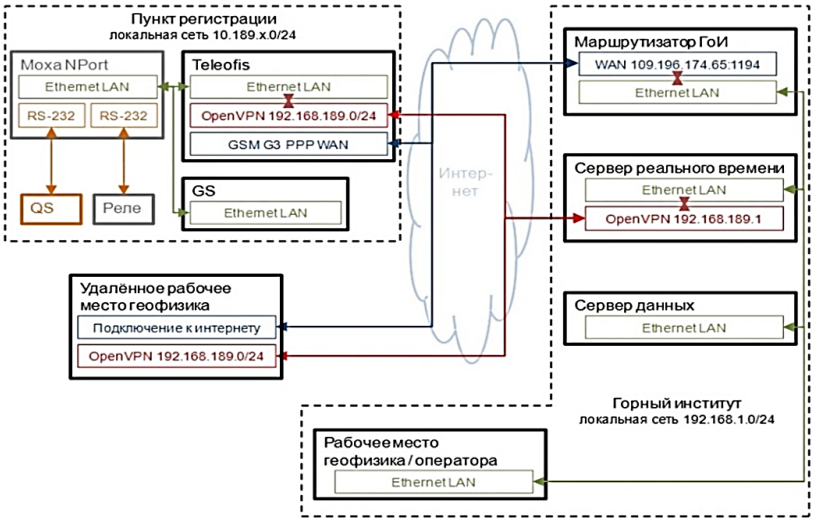


Рис. 2.30. Схема информационного обмена системы мониторинга

Транспортной инфраструктурой для организации VPN-сети служит интернет. Удаленные клиенты OpenVPN поддерживают VPN-канал путем установки соединения с сервером OpenVPN, слушающий TCP-порт, который отображен на внешний WAN-интерфейс маршрутизатора Горного института.

Для пунктов регистрации используется VPN-клиент, встроенный в GSM-маршрутизатор Teleofis и обеспечивающий создание VPN-канала через мобильный интернет. На удаленные рабочие места устанавливается программный клиент OpenVPN.

Метрологические характеристики системы

Метрологические характеристики системы, а именно: энергетический порог регистрации, точность определения координат очагов и расчета механизмов разрушения пород в очагах определяются конфигурацией сети, т. е. количеством датчиков и их пространственным расположением в зоне контроля системы.

Для количественного определения пороговых значений величины сейсмособытий, регистрируемых системой, необходимо знать зависимость между амплитудой скорости смещения породы в точке регистрации сейсмособытия, расстоянием до гипоцентра сейсмического события и его энергии. Мы искали ее путем подбора по экспериментальным данным постоянных коэффициентов A, B, C в эмпирической формуле:

$$\log(Am) = A*\log(E) + B*\log(R) + C, \qquad (2.1)$$

где Am — амплитуда скорости смещения породы в точке регистрации сейсмособытия, мм/сек; R — расстояние до гипоцентра сейсмособытия, м; E — энергия сейсмособытия, Дж.

Для определения коэффициентов A, B и C в уравнении (2.1) для конкретных физико-механических свойств массива пород карьера «Железный» был выполнен

замер пиковых значений скоростей на сейсмограммах 281 сейсмических события, зарегистрированных сейсмической системой в диапазоне энергий 1–105 Дж, записанных сейсмодатчиками на расстояниях 50–2000 м.

Результаты замеров были обработаны методами регрессионного анализа средствами встроенного пакета анализа данных MS Excel. В результате расчетов получились следующие значения коэффициентов множественной линейной регрессии:

$$A = 0{,}414,$$
$$B = -1{,}675,$$
$$C = -1{,}717.$$

Для сейсмической сети выполнены расчеты ее метрологических характеристик. Рассчитывались распределения в пространстве ожидаемых погрешностей координат источников и минимальной энергии регистрируемых сейсмических событий. Расчет проводился для узлов регулярной прямоугольной сетки с заданным шагом. Учитывались координаты пунктов регистрации, уровень сейсмического шума по месту установки сейсмодатчиков и эмпирические зависимости затухания сейсмических сигналов с расстоянием до источника.

Ниже в графическом виде приведены расчетные погрешности в определении координат очагов для данной конфигурации сейсмической сети (рис. 2.31, 2.32).

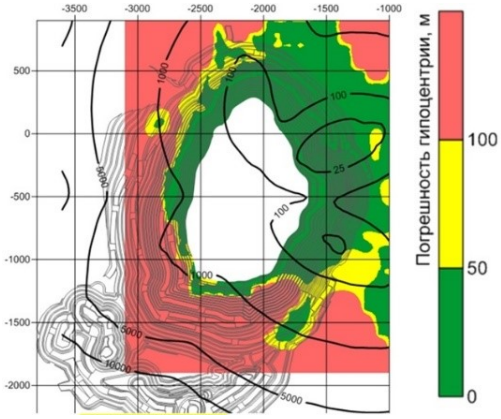


Рис. 2.31. Распределение метрологических характеристик системы мониторинга в плоскости *XY* на отметке *Z* = 0 м

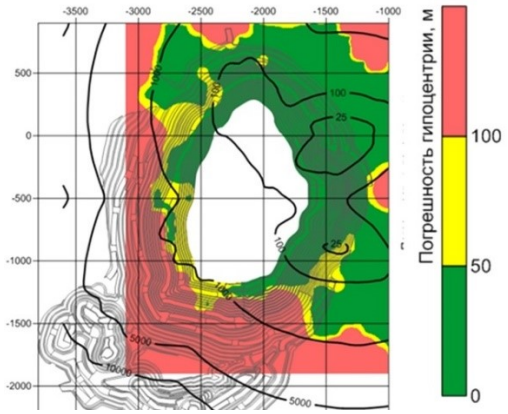


Рис. 2.32. Распределение метрологических характеристик системы мониторинга в плоскости *XY* на отметке *Z* = –300 м

Из представленных на рис. 2.31, 2.32 данных видно, что сейсмическая сеть на верхних и средних горизонтах обеспечивает приемлемое качество регистрации событий с энергетическим порогом 1 кДж на всем Восточном и Северном участках борта на большой глубине прибортового массива. На глубоких горизонтах (>300 м) качество регистрации ухудшается, но влияние процессов перестройки состояния массива в придонной части на устойчивость бортов невелико.

На рис. 2.33 представлено распределение регистрируемых системой сейсмических событий по энергиям. Максимум распределения лежит в области 102–103 Дж, что, по-видимому, следует принять за нижнюю границу уверенной регистрации системы по всему полю сейсмического контроля.

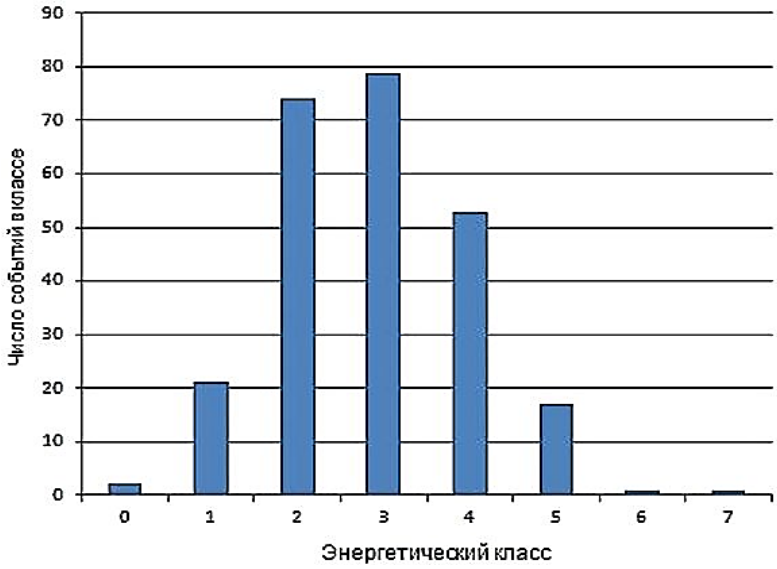


Рис. 2.33. Распределение событий по энергетическим классам

Оценка состояния прибортового массива по параметрам сейсмической эмиссии

Системой сейсмического мониторинга рудника «Железный» (Ковдорский ГОК) за период 2019–2021 гг. зафиксировано более 600 естественных событий, обусловленных процессами трещинообразования в прибортовом массиве пород. Из них 109 — в 2019 г., 251 — в 2020 г., остальные 260 событий — в 2021 г. Пространственное распределение сейсмических событий, зарегистрированных за период 2019–2021 гг. год на руднике «Железный», представлено на рис. 2.30–2.31.

С энергией более 105 Дж произошло 28 сейсмических событий (рис. 2.34), большинство из которых произошли под дном карьера на глубинах от 10 до 70 м. Наиболее мощное из них произошло 30.12.2020 г. в районе нижних берм северо-западной части борта карьера на глубине 54 м от поверхности. Его энергия составила 4,5·107 Дж. Расчетная длина трещины в очаге — 45 м.

На рис. 2.35 представлено в плане пространственное распределение очагов сейсмических событий, зарегистрированных в 2019 г. в прибортовом массиве карьера. Распределение отражено на плане карьера с нанесенными структурно-геологическими нарушениями [29].

В пространственном распределении сейсмических событий в 2019 г. выделяются 2 сейсмоактивные зоны:

1) зона под дном карьера в нижней части юго-западного участка борта. Ее сейсмоактивность определяется перестройкой НДС породного массива в результате углубления карьера по мере развития горных работ;

2) зона концентрации сейсмических событий с небольшими энергиями в нижней части северо-восточного участка борта.

Зона, приуроченная ко дну карьера, на устойчивость бортов не оказывает влияния.

Вид сверху

Вид с направления юг – север

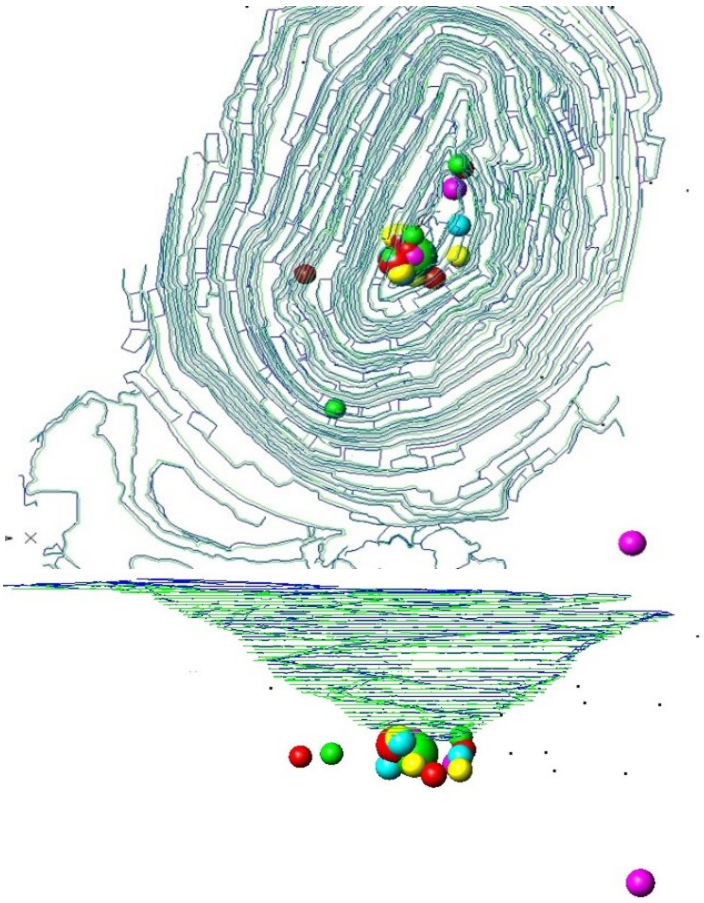
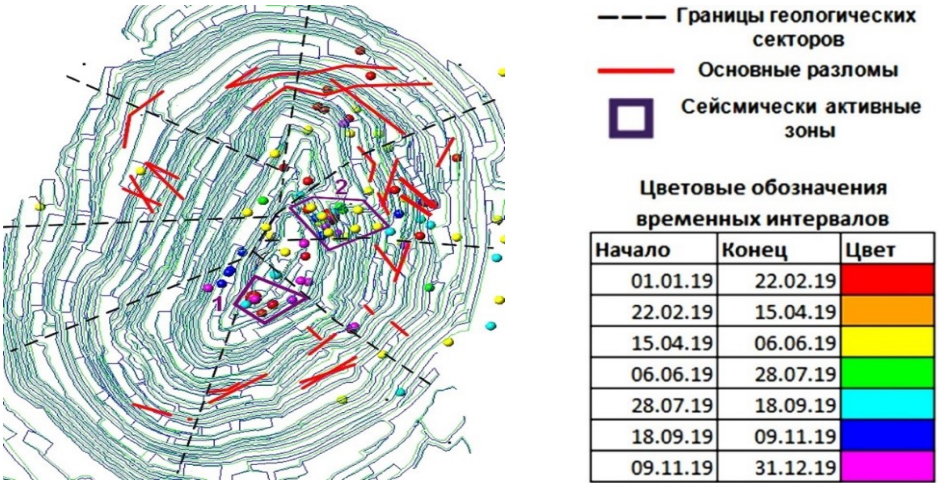


Рис. 2.34. Пространственное распределение сейсмических событий с энергией > 1*105 Дж, зарегистрированных в прибортовом массиве карьера в 2019–2021 гг. Размер значков событий пропорционален энергетическому классу

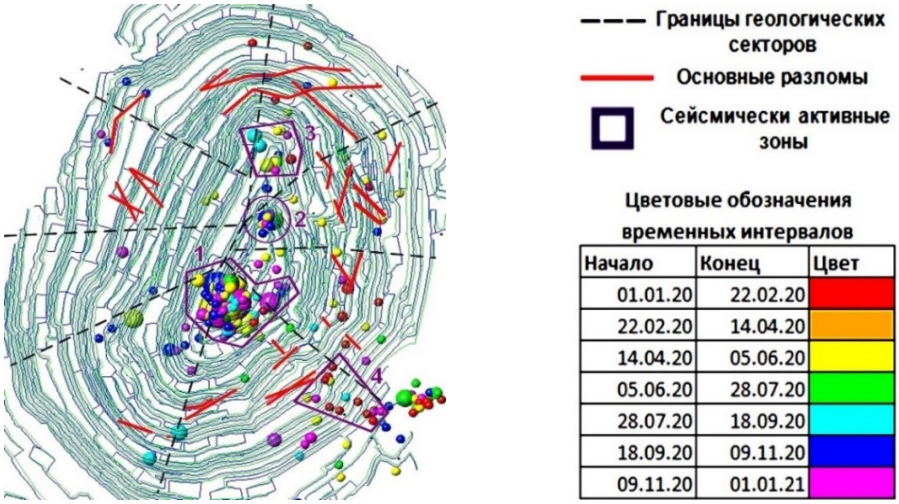


Цветовые обозначения временных интервалов

Начало	Конец	Цвет
01.01.19	22.02.19	
22.02.19	15.04.19	
15.04.19	06.06.19	
06.06.19	28.07.19	
28.07.19	18.09.19	
18.09.19	09.11.19	
09.11.19	31.12.19	

Рис. 2.35. Пространственное распределение сейсмических событий, зарегистрированных в прибортовом массиве карьера в 2019 г. Размер значков событий пропорционален энергетическому классу. Цвет значков определяется временным интервалом регистрации события

На рис. 2.36 представлено в плане пространственное распределение очагов сейсмических событий, зарегистрированных в прибортовом массиве карьера в 2020 г. Распределение отражено на плане карьера с нанесенными структурно-геологическими нарушениями. Очаги находились на глубине от 10 до 50 м от свободной поверхности и визуально не определялись.



Начало	Конец	Цвет
01.01.20	22.02.20	
22.02.20	14.04.20	
14.04.20	05.06.20	
05.06.20	28.07.20	
28.07.20	18.09.20	
18.09.20	09.11.20	
09.11.20	01.01.21	

Рис. 2.36. Пространственное распределение сейсмических событий, зарегистрированных в прибортовом массиве карьера в 2020 г. Размер значков событий пропорционален энергетическому классу. Цвет значков определяется временным интервалом регистрации события

В пространственном распределении сейсмических событий в 2020 г. выделяются 4 сейсмоактивные зоны:

1) зона под дном карьера в нижней части юго-западного участка борта. Ее сейсмоактивность определяется перестройкой НДС породного массива в результате углубления карьера по мере развития горных работ;

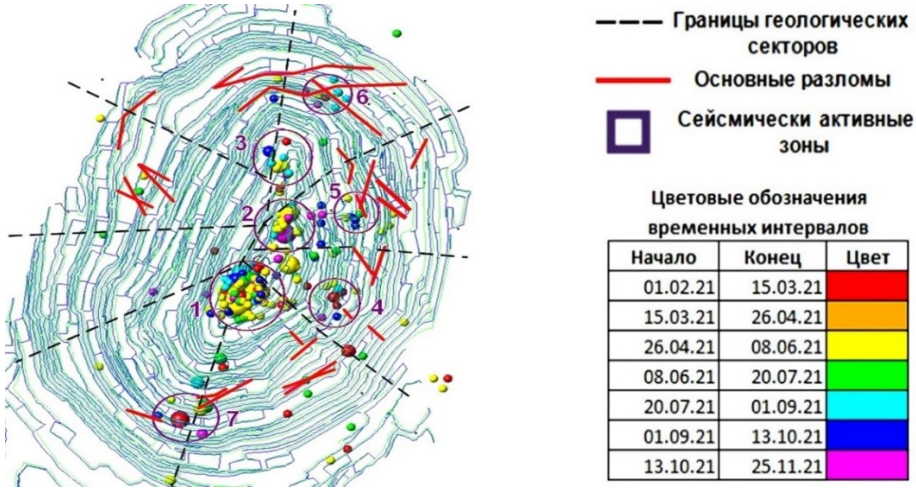
2) зона концентрации сейсмических событий под северной частью дна;

3) зона концентрации сейсмических событий под северной частью дна;

4) зона концентрации сейсмических событий под юго-западным участком борта.

Сейсмические события, концентрирующиеся в районе средних горизонтов бортов, являются потенциально опасными, что необходимо учитывать при дальнейшем планировании горных работ в карьере.

На рис. 2.37 представлено в плане пространственное распределение очагов сейсмических событий, зарегистрированных в 2021 г. в прибортовом массиве карьера. Распределение отражено на плане карьера с нанесенными структурно-геологическими нарушениями. Очаги находились на глубине от 10 до 50 м от свободной поверхности и визуально не определялись.



Начало	Конец	Цвет
01.02.21	15.03.21	
15.03.21	26.04.21	
26.04.21	08.06.21	
08.06.21	20.07.21	
20.07.21	01.09.21	
01.09.21	13.10.21	
13.10.21	25.11.21	

Рис. 2.37. Пространственное распределение сейсмических событий, зарегистрированных в прибортовом массиве карьера в 2021 г. Размер значков событий пропорционален энергетическому классу. Цвет значков определяется временным интервалом регистрации события

В пространственном распределении сейсмических событий в 2021 г. можно выделить 7 сейсмоактивных зон:

1) значительная часть событий расположена в нижней части юго-западного участка борта под дном карьера. Сейсмоактивность зоны определяется перестройкой НДС породного массива в результате углубления карьера по мере развития горных работ;

2) зона концентрации сейсмических событий под северной частью дна;

3) зона под нижними горизонтами северного участка борта;

4) зона под нижними горизонтами юго-восточного участка борта;

5) зона под нижними горизонтами восточного участка борта;

6) зона в средней части северо-северо-восточного участка борта.

7) зона под средними горизонтами юго-западного участка борта. События в данной зоне находятся рядом с зоной влияния геологических разломов и могут быть связаны с активизацией этих геологических структур в процессе формирования контура карьера. Есть основания предполагать, что сейсмические события в этой зоне и события в зоне 1 являются следствием единого масштабного процесса перестройки НДС массива в этом районе.

С точки зрения оценки влияния выявленных сейсмоактивных зон на устойчивость бортов карьера можно отметить, что зоны 1, 2, приуроченные ко дну карьера, на устойчивость бортов не оказывают влияния. Зоны, приуроченные к средним горизонтам бортов, являются потенциально опасными, что необходимо учитывать при дальнейшем планировании горных работ в карьере. Наиболее опасной зоной является зона 7.

Для всего периода наблюдений характерна повышенная сейсмоактивность в районе дна карьера. На восточном борту карьера длительное время фиксируются слабые сейсмические события. В 2021 г. выявлена новая сейсмоактивная зона

в северной, северо-западной частях борта карьера, которая может быть связана с активизацией геологических структур в этом районе.

Таким образом, система микросейсмического мониторинга прибортового массива карьера на основе сейсмических датчиков в глубоких скважинах за конечным контуром карьера обеспечивает выявление и отслеживание зон активного трещинообразования в прибортовом массиве карьера, дающее основание для оценки потенциальной опасности для устойчивости бортов карьера.

2.2.4. Геодезический мониторинг района размещения Кольской АЭС

Основанием для проведения работ Горного института КНЦ РАН в районе Кольской АЭС явился ряд публикаций о наличии палеосейсмодеформаций в районе озер Бабинская и Экостровская Имандра (рис. 2.38).

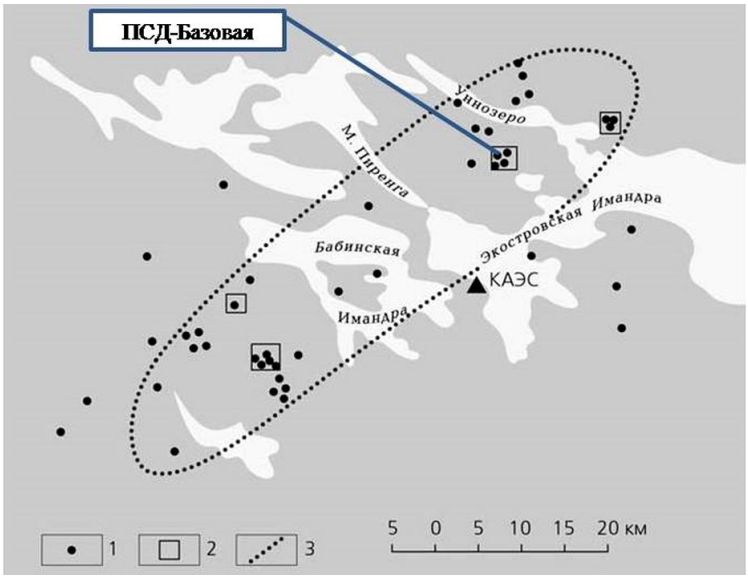


Рис. 2.38. Схема распространения палеосейсмодеформаций в районе озер Бабинская и Экостровская Имандра: *1* — палеосейсмодеформации, выделенные по материалам дешифрирования аэрофотоснимков; *2* — участки проведения полевых работ; *3* — граница распространения сейсмодеформаций; треугольник — местоположение Кольской атомной станции; ПСД-базовая — участок детальных исследований 2011 г. [30–33]

Авторами публикаций с наибольшей детальностью был исследован и описан наиболее крупный из выявленных объектов типа ПСД (палеосейсмодислокаций) — сейсмотектоническое ущелье в кристаллических породах вблизи северного побережья оз. Экостровская Имандра, на удалении 6–8 км от Кольской АЭС, получившее название «ПСД-базовая» [31–34].

Авторы подчеркивают, что соотношение различных форм рельефа и четвертичных отложений разного генезиса и возраста на объекте и вокруг него позволило им сделать вывод об образовании самого ущелья (первичного разрыва) после освобождения этой

территории от последнего ледникового покрова или на последних стадиях делегации (около 10–11 тыс. лет назад).

За пределами собственно ущелья на прилежащих оглаженных ледником субгоризонтальных площадках также были выделены группы сейсмотектонических нарушений (выколы, выбросы), которые, по мнению авторов, группируются по тем же направлениям. Это, в итоге, позволило предположить о наличии трех разновозрастных импульсов сильных сейсмических воздействий на данной территории в поздне- и послеледниковое время.

В связи с этим в 2015 г. было принято решение организовать геодинамический полигон и заложить геодезические пункты для наблюдений за современными движениями земной коры на дислокации «Базовая».

В результате проведенных рекогносцировочных работ была разработана общая схема геодинамического полигона, которая включала три профиля (по западному и восточному берегам дислокации «Базовая» и центральный — по дну ущелья).

Анализ результатов геодезических наблюдений, выполненных за период с 2015 по 2018 гг. [35], показал спокойную геодинамическую обстановку и стабильное состояние западного и восточного берегов дислокации.

Поскольку недалеко от заложенного геодинамического полигона находятся также другие ПСД различного возраста, заложения и направления, в 2017 г. геодинамический полигон был расширен и геодезические наблюдения за современными движениями земной коры были проведены на большей территории в окрестности дислокации «Базовая» (рис. 2.39). Работы на данном полигоне продолжаются и в настоящее время.

Также в период с 2016 по 2018 гг. проводились наблюдения за вертикальными и горизонтальными движениями земной коры на полигоне непосредственно на площадке Кольской АЭС [36].

Наблюдения на пунктах полигонов выполнялись с периодичностью 2 раза в год — в мае – июне и сентябре – октябре.

Современные движения земной коры на контролируемой территории определялись по изменению координат наблюдательных пунктов геодинамического полигона с использованием методов спутниковой геодезии для определения смещений в плане, также использовалось высокоточное нивелирование для определения смещений по высоте.

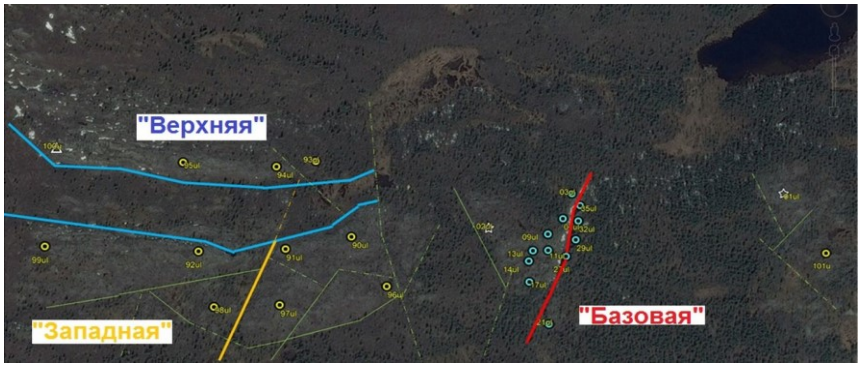


Рис. 2.39. Общая схема расширенного полигона и дислокаций на снимке из космоса. Цветом обозначены границы дислокаций: синим — Верхней, желтым — Западной, красным — Базовой

На рис. 2.40 представлены совмещенные графики перемещений рабочих пунктов относительно опорных пунктов 01UL и 02UL за период 2018–2020 гг. На графике видно, что перемещения большинства рабочих пунктов участка «Базисная» относительно

опорных пунктов являются разнонаправленными, имеют небольшие величины (в пределах 10 мм) и находятся в пределах точности применяемой технологии спутниковых измерений.

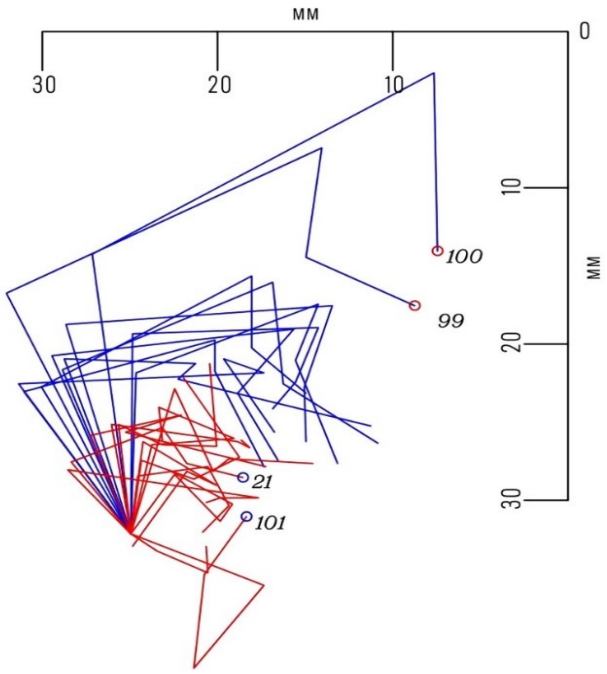


Рис. 2.40. Совмещенные графики перемещений отдельных рабочих пунктов полигона. Синим цветом обозначены перемещения по дислокации «Верхняя», красным — по дислокации «Базовая»

Перемещения рабочих пунктов участка полигона дислокации «Верхняя» и «Западная» относительно опорных пунктов отличаются большими амплитудами по сравнению с перемещениями пунктов дислокации «Базисная», но с более выраженным согласным направлением. Амплитуда колебаний находится в пределах 15 мм, колебания в отдельных циклах не превышают 3–5 мм.

На рис. 2.41 приведены сводные результаты вертикальных смещений пунктов полигона.

Оттенками оранжевого цвета представлены смещения по результатам нивелирования летних циклов, оттенками синего — зимних.

Анализ данных рис. 2.41 показывает, что вертикальные смещения практически всех пунктов полигона, расположенных на бортах дислокации «Базовая», а также в окрестностях дислокаций «Верхняя» и «Западная», во всех циклах измерений находятся в пределах 1–2 мм, т. е. не превышают пределы точности измерений.

Скорости движения для пунктов западной и восточной ветвей дислокации «Базовая», вычисленные по 10 циклам измерений, близки к нулю. Скорости движения для пунктов дислокации «Верхняя» и «Западная», вычисленные по 4 циклам измерений, чуть выше, но также находятся на низком уровне (рис. 2.42).

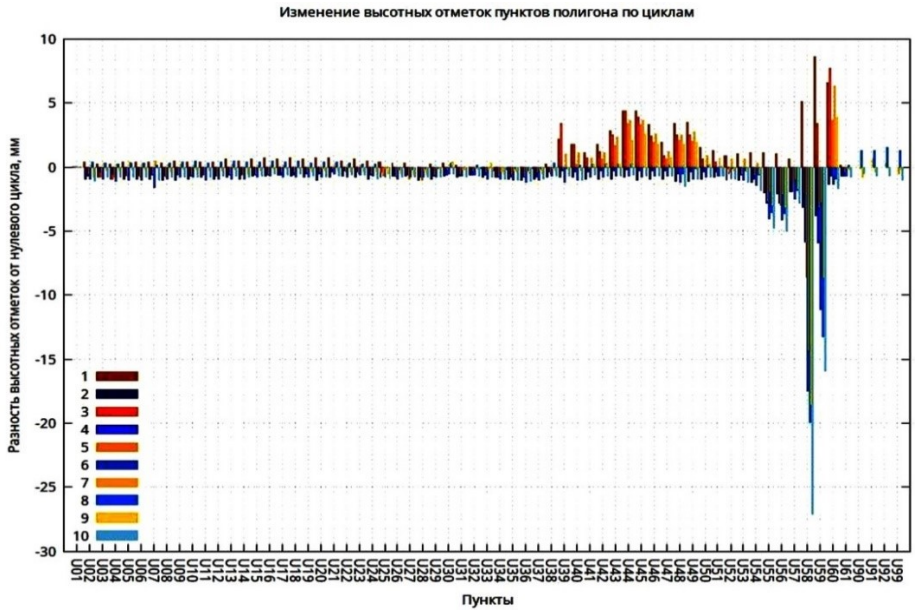


Рис. 2.41. Вертикальные смещения пунктов полигона

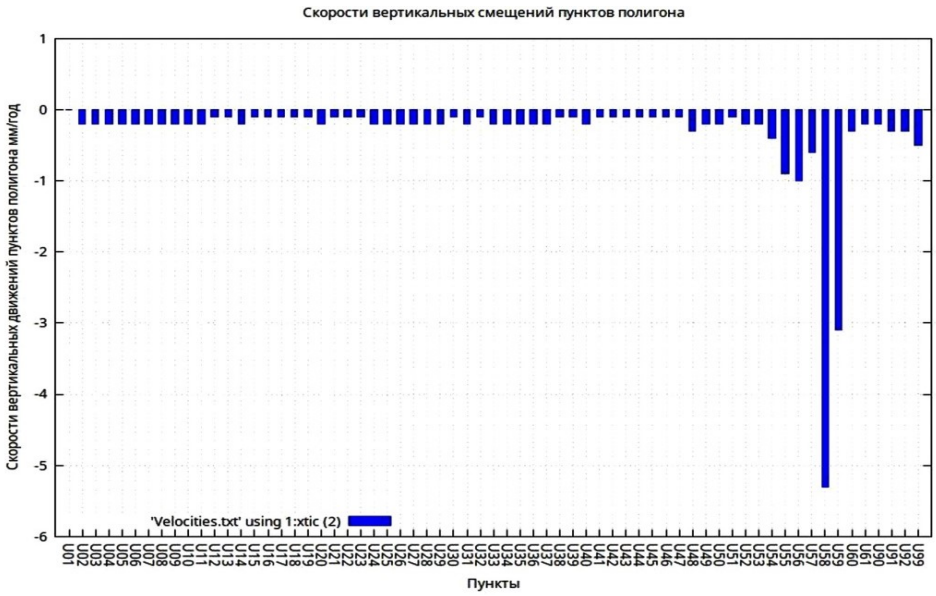


Рис. 2.42. Скорости вертикальных смещения пунктов полигона по 10 циклам измерений (с 2015 г.) для пунктов 02UL–60UL и по 4 циклам (с 2017 г.), для пунктов 90UL, 91 UL, 92 UL, 99 UL

Для пунктов профиля «Дно ущелья» (39UL–60UL) вертикальные подвижки существенно превышают точность измерений, что объясняется отсутствием прочных связей с массивом пород у крупных скальных обломков, слагающих дно ущелья.

Вместе с тем у пунктов профиля «Дно ущелья» не выявлено явных тенденций к согласному поднятию или опусканию, отмечаются только сезонные разнонаправленные вертикальные перемещения у отдельных крупных блоков

(весной — поднятие, осенью — опускание), что, по-видимому, связано с мерзлотными явлениями.

2.2.5. Наклономерно-деформометрический комплекс на Кировском руднике АО «Апатит»

Деформационные процессы в скальных породах происходят медленно, имеют циклический характер и могут продолжаться длительное время. Поэтому для выявления их закономерностей необходимо использовать высокочувствительные и стабильные во времени системы наблюдений. Как показывает опыт изучения таких процессов в целях контроля состояния горных выработок и других сооружений этим условиям в наибольшей степени соответствует наклономерно-деформометрический комплекс, многолетний положительный опыт использования которого накоплен в сейсмологии. Для контроля за процессами деформирования и прогноза разрушений в массиве под влиянием горных работ в 2010 г. такой комплекс был установлен на гор. –24 м Юкспорского крыла Кировского рудника, включающий в себя подземный пункт регистрации и наземный пункт сбора, накопления и обработки данных

Архитектура комплекса

В состав подземного пункта входят датчики деформометров (ДКК-3) и наклономеров (НК), регистратор информации Regin-3F-6k и элементы, обеспечивающие бесперебойное питание системы [37].

Датчики, входящие в состав комплекса, выполнены с учетом жестких требований в обеспечении долговременной стабильности при высокой точности измерения перемещений, изготовлены по оригинальной схеме, а наклономер защищен авторским свидетельством. Высокая стабильность датчиков обеспечивается за счет использования кварцевого стекла в качестве конструкционного материала для создания чувствительных элементов.

Технические характеристики приборов:

деформометр ДКК-3:

линейный диапазон измерений	+/–0,2 мм;
вариаций перемещений	
нелинейность в диапазоне +/–0,2 мм	менее 1 %;
предельное разрешение	0,005 мкм;
измерительного тракта	
база измерения	3,3 м;

наклономер НК:

линейный диапазон	+/–10 уг. мин;
измеряемых углов наклона	
нелинейность статической	1 %;
характеристики, не более	
нелинейность в диапазоне	5 %;
+/–60 уг. мин, не более	
предельное разрешение датчика	0,005 уг. сек

Съем информации с датчиков осуществляется с помощью высокочувствительных емкостных дифференциальных преобразователей механических перемещений в изменения частоты выходного сигнала.

Регистратор информации Regin-3F-6k предназначен для сбора, оцифровки, долговременного хранения и передачи в компьютер информации от датчиков с преобразователями линейных перемещений в частоту. Регистратор выполняет следующие функции:

— прием из ПК задания на регистрацию;

— формирование интервалов времени, через которые производится регистрация информации;

— управление датчиками (включение питания и переключение реле датчиков);

— прием, предварительная обработка и запись в ЗУ информации, поступающей с датчиков;

— передача накопленной информации в ПК.

Технические характеристики модуля регистрации:

количество одновременно подключенных датчиков	6 шт.;
измеряемая частота сигналов, поступающих с датчиков (F1 и F2)	не более 10 МГц;
время измерения частоты F1 и F2	1 сек;
амплитуда измеряемых сигналов	от 70 мв до 1 В;
емкость счетчика для измерения частот F1 и F2	24 дв. разряда;
погрешность хода часов реального времени (при температуре +22 С°)	±1сек за сут;
скорость обмена информацией с компьютером	12,8 КБод/сек;
расстояние между МР и МСК	не более 2 км;
расстояние между МСК и ПК	не более 2 м;
напряжение питания МР и МСК	+12±2 В;
потребляемый ток в режиме ожидания	менее 500 мкА;
потребляемый ток в режиме обмена с ПК	менее 80 мА;
максимальный потребляемый ток при переходе из режима ожидания в режим измерения (кратковременно в течении 1 сек)	менее 300 мА;
потребляемый ток в режиме измерения	менее 100 мА

Подземный пункт размещен в забое одиночной горной выработки протяженностью 90 м на горизонте –24 м Юкспорского крыла Кировского рудника.

С целью минимизации теплового и шумового воздействия на чувствительные элементы датчиков подземный пункт изолирован от остальной части подводящей к полигону выработки и квершлага ЗВС двумя железобетонными перемычками.

На стенке забоя выработки смонтированы два деформометра ДКК-3, сориентированные по сторонам света — восток – запад (далее — ДКК В-З) и юг – север (ДКК Ю-С) (рис. 2.43). На постаменте, жестко связанным со скальным

массивом, установлен ДКК-Z, контролирующий смещения в вертикальной плоскости и наклономеры, установленные с ориентировкой осей по направлению запад – восток (НК З-В) и север – юг (НК С-Ю).

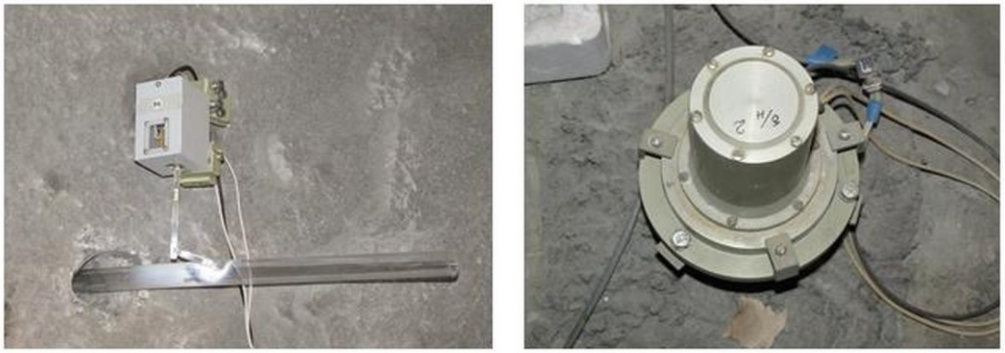


Рис. 2.43. Кварцевые деформометр ДКК-3 (слева) и наклономер НК (справа)

Регистратор информации Regin-3F-6k размещен в этом же забое в непосредственной близости от датчиков (длина сигнальных кабелей не превышает 5 м). Обмен информацией между регистратором информации Regin-3F-6k и наземным пунктом сбора и обработки данных организован посредством удаленного доступа. В процессе обмена информацией решаются следующие задачи:

— установка параметров работы регистратора;

— запуск/остановка работы регистратора;

— контроль состояния регистратора;

— считывание накапливаемой в регистраторе информации.

Обмен информацией осуществляется через интернет с использованием существующей инфраструктуры вычислительной сети АО «Апатит». От регистратора до поверхности информация передается по стандарту «токовая петля 20 мА» сигнальным кабелем, проложенным по стенкам выработок, где она преобразуется в соответствии с интерфейсом TCP/IP с помощью преобразователей интерфейсов T232-CL20 BS V4 (токовая петля — RS-232) и ADAM-4571L (RS-232 — Ethernet).

Такая организация обмена позволила решить следующие задачи:

— обеспечить получение информации от установленной аппаратуры в реальном времени;

— осуществлять оперативный контроль состояния и управление работой приборов;

— существенно снизить затраты на оборудование, эксплуатационные расходы и повысить надежность за счет отказа от специализированных линий связи;

— улучшить условия работы точной геофизической аппаратуры за счет сокращения объема работ, требующих присутствия персонала рядом с комплексом.

На рис. 2.44 приведена структурная схема геодинамического полигона.

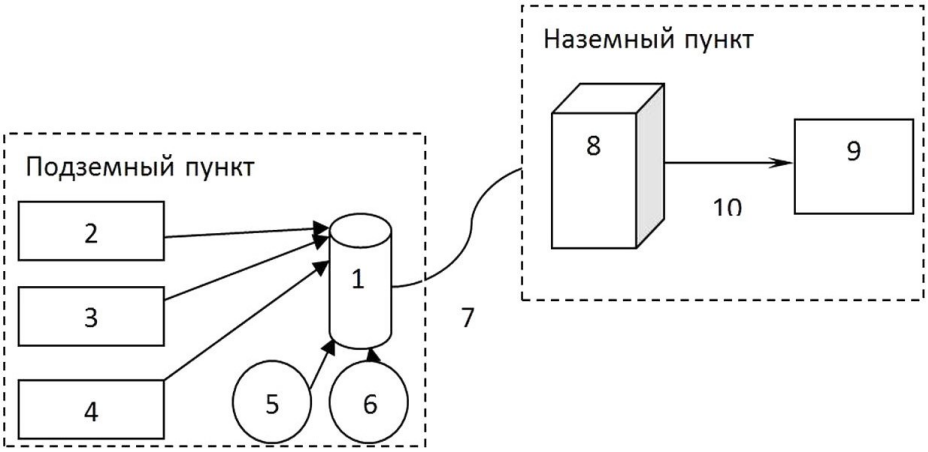


Рис. 2.44. Структурная схема организации геодинамического полигона регистрации деформаций и наклонов: *1* — регистратор информации Regin-3F-6k; *2–4* — кварцевые деформометры ДКК-3; *5*, *6* — кварцевые наклономеры НК; *7* — линия связи подземного и наземного пунктов; *8* — коммутационный блок на поверхности рядом с западным вспомогательным стволом ЗВС; *9* — пункт сбора и обработки данных, организованный в ГоИ КНЦ РАН; *10* — удаленный доступ, осуществляемый по каналу Ethernet

Пункт сбора и обработки информации

Пункт сбора и обработки информации от комплекса оборудован в здании Горного института на основе системы автоматизации геофизического мониторинга. База данных системы функционирует на выделенном компьютере под СУБД MS SQL Sever, что обеспечивает контролируемый доступ к результатам регистрации всех заинтересованных пользователей. Программное обеспечение подсистемы автоматизации сбора данных в реальном времени включает поддержку регистраторов типа Regin-3F-6k.

В качестве специализированного клиентского приложения для обработки данных, поступающих с комплекса, используется проект Geomon.adp, выполняемый в среде MS Access. Это приложение обеспечивает визуализацию временных рядов данных, кроме того, обеспечивает предварительную обработку данных, включающую устранение заведомо ложных сигналов, связанных со сбоями в работе аппаратуры.

Результаты контроля деформаций наклономерно-деформометрическим комплексом

Информация с комплекса поступает с июля 2010 г. Этот период включает в себя момент реализации техногенного землетрясения с магнитудой 3,5 21 октября 2010 г. в 12 ч 10 мин по московскому времени, гипоцентр которого находился в пределах Кукисвумчоррского крыла Кировского рудника примерно на горизонте +16 м (360 м от поверхности) на некотором удалении от очистных работ. Выделившаяся энергия составила порядка 7·109 Дж. Размер зоны подготовки землетрясения составил несколько километров, т. е. включал в себя всю промышленную зону рудника и значительную часть продуктивной толщи Хибинского массива. В результате этого события в ряде подземных выработок

произошло раскрытие трещин, отслоения бетонной и набрызг-бетонной крепи, обрушение породы. Каких-либо значимых признаков этого землетрясения на поверхности не выявлено.

По результатам зарегистрированных комплексом деформаций визуально выделяются 3 характерных временных этапа (рис. 2.45):

— от начала регистрации до 06.10.2010 г., когда зафиксировано непрерывное медленное изменение наклона в плоскости север – юг (НК З-В) при относительно малых изменениях в показаниях остальных приборов;

— с 06.10.2010 по 21.10.2010 гг. (этап подготовки и реализации техногенного землетрясения), наблюдается резкое изменение показаний всех приборов, за исключением ДКК С-Ю, причем наклон в плоскости север – юг сменил знак приращения, а ДКК З-В показывал рост отрицательных деформаций (сжатие);

— с 21.10.2010 по 31.10.2010 гг. (афтершоковый), отражающий уменьшение скоростей наклонов при продолжающемся росте деформаций сжатия в направлении восток – запад.

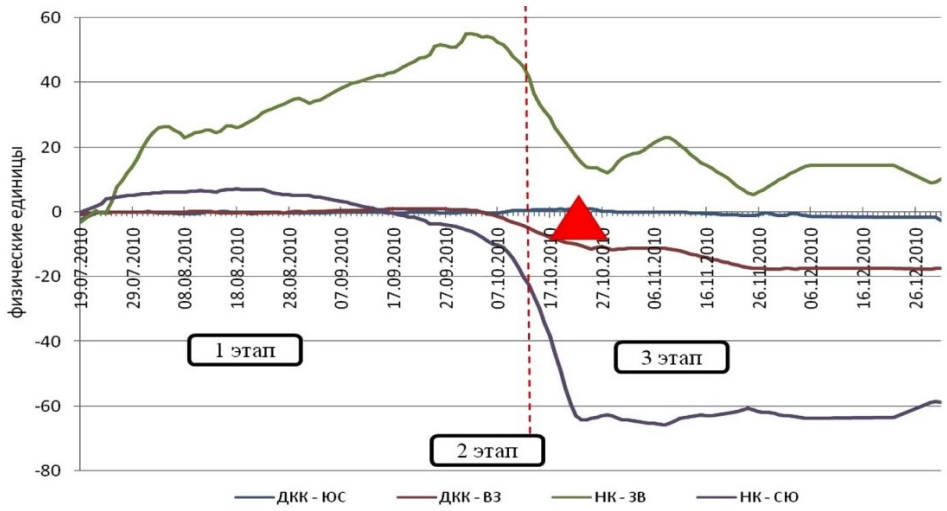


Рис. 2.45. Данные деформационно-наклономерного комплекса в период подготовки и реализации техногенного землетрясения 21.10.2010 г.: 1 этап — период стабильности (22.07.2010–06.10.2010); 2 этап — подготовка землетрясения (06.10.2010–21.10.2010); 3 этап — афтершоковый период (с 21.10.2010); _ _ _ — момент начала развития устойчивых предвестников готовящегося сильного сейсмического события; ▲ — техногенное землетрясение 21.10.2012

Полученные результаты достаточно отчетливо отражают различные стадии подготовки и реализации техногенного землетрясения и позволяют четко определить начало заключительной стадии подготовки — недельного интервала, предшествующего реализации землетрясения (вертикальный красный пунктир на рис. 2.46).

После реализации землетрясения прослеживается уменьшение скоростей наклонов при продолжающемся росте деформаций сжатия в направлении восток – запад.

В течение 2019–2021 гг. (рис. 2.47) геодинамический режим геологической среды характеризуется устойчивым трендом к сжатию по вертикальной

компоненте и разгрузкой в направлении юг – север. При этом наблюдаются колебательный наклон среды с общим направлением на северо-запад в сторону мощного Саамского разлома [38] (рис. 2.53). Наблюдаемые периоды резких изменений скорости деформации в апреле – мае 2020 г. и в сентябре – октябре 2021 г. связаны с воздействием проводимых работ в непосредственной близости от регистрирующей аппаратуры комплекса.

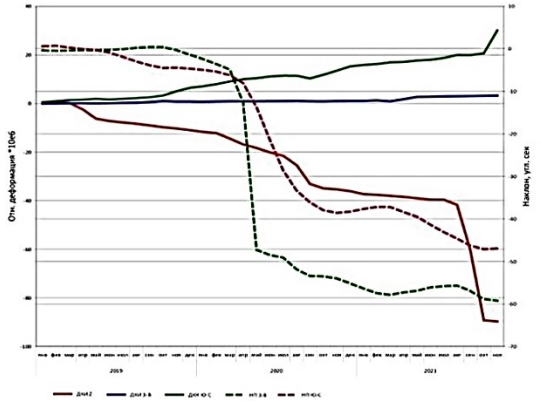


Рис. 2.46. Данные деформационно-наклономерного комплекса с января 2019 г. по ноябрь 2021 г.

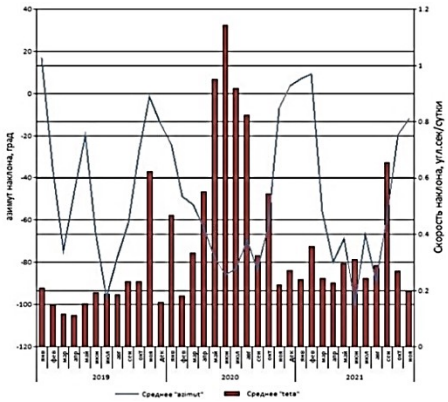


Рис. 2.47. Наклон деформационно-наклономерного комплекса с января 2019 г. по ноябрь 2021 г.

Таким образом, по результатам наблюдений деформационно-наклономерным комплексом установлено, что он достаточно четко реагирует на изменения напряженно-деформированного состояния массива пород в процессе подготовки и реализации мощного динамического события, что позволяет выявлять средне- и краткосрочные предвестники готовящихся техногенных землетрясений. Поэтому есть основания полагать, что организация сети деформационно-наклономерных станций в сочетании с другими методами контроля позволит прогнозировать опасные геодинамические явления в природно-техногенных и горнотехнических системах. Однако для обоснования такой возможности необходимо расширение системы наблюдений и набор достаточно убедительной статистики.

2.3. Развитие методик комплексной оценки состояния геологической среды по данным локальных методов

2.3.1. Развитие подходов к оценке динамики изменения упругих характеристик массива пород в борту карьера

Важным элементом системы прогноза и оценки состояния массива горных пород выступают методы инструментального контроля, которые позволяют определять и квалифицировать уровень реальной опасности, а также выполнять мониторинг геомеханического состояния массива на основе контроля изменения физических свойств среды. В настоящее время для контроля устойчивости бортов карьеров широко применяются геофизические методы и различные варианты дистанционных методов (геодезия, радарная съемка и др.). При этом предметом

исследования дистанционных методов является, как правило, поверхность борта карьера и его участков (групп уступов) с целью выявления опасных смещений (деформаций) [12]. Геофизические методы, в свою очередь, позволяют следить за изменениями геомеханического состояния глубинного массива пород [39]. В совокупности геофизические и дистанционные методы позволяют составить цельную взаимодополняющую динамику изменений как поверхности карьера, так и законтурного массива пород.

Целью данной работы является отражение опыта применения сейсмического метода для контроля геомеханического состояния законтурного массива пород карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК», который в настоящее время претерпевает интенсивное развитие, связанное с углубкой и разноской борта, что требует постоянного контроля устойчивости элементов открытой геотехнологии [40].

В связи с принятием принципиального решения о формировании карьерной выемки с высотой борта порядка 900 м, важность организации системы мониторинга устойчивости приобрела особую значимость [41]. Поэтому развитие подсистем мониторинга устойчивости как на региональном, так и на локальном уровнях активно ведется, начиная с 2000-х гг. [42]. Наиболее эффективными с точки зрения получения информации о физических свойствах пород, слагающих борт карьера, представляются геофизические методы контроля. Горный институт КНЦ РАН совместно с АО «Ковдорский ГОК» обладает многолетним опытом применения сейсмического метода для выполнения прогноза и оценки геомеханического состояния законтурного массива пород как на уровне борта в целом, так и его участков, а также групп уступов и отдельных уступов. Система микросейсмического мониторинга функционирует в карьере «Железный» с 2007 г. и решает главным образом задачу выявления предвестников развития деформаций в законтурном массиве пород карьера «Железный» с последующим выделением и детальным изучением потенциально неблагоприятных участков с точки зрения устойчивости борта [43].

На этапах формирования и эксплуатации уступов, поставленных в конечное положение с применением щадящих технологий взрывания, важным представляется периодический инструментальный контроль геологической среды на потенциально неустойчивых участках борта. Сейсмический метод позволяет определить структуру массива, выявить высокопрочные и ослабленные участки не только на контуре выработки, но и в глубине массива. Таким образом, с целью оперативного получения динамических упругих характеристик приконтурного массива пород на участках борта, актуальных с точки зрения устойчивости, выполняются периодические сейсмические измерения в вариантах профилирования [44] и томографии [45].

Для оценки сохранности массива применяется методика сейсмического профилирования на продольных преломленных волнах (рис. 2.48). Методика работ аналогична наземной, классической схеме расстановки приемников и источников сейсмических сигналов, за небольшой разницей — изучается горизонтальная плоскость от контура карьера вглубь массива. Возбуждение сейсмических сигналов осуществляется около каждого приемника.

Такая методика позволяет получить достаточное количество данных, с помощью которых можно адекватно отразить структуру массива пород. Вдоль уступа на высоте 1,5 м с шагом 8–10 м устанавливались 24 датчика.

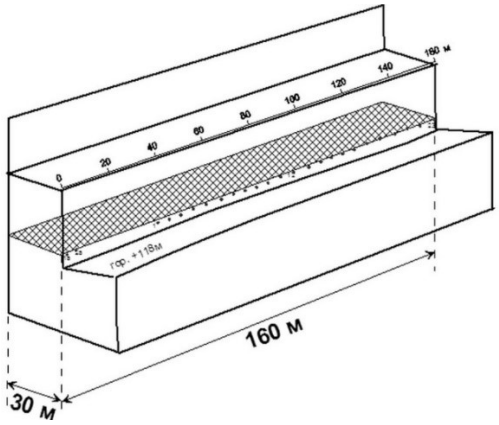


Рис. 2.48. Схема проведения сейсмического профилирования: • • — источники и приемники сейсмосигналов; — плоскость исследования

В варианте профилирования возбуждение и прием упругих колебаний осуществляется вдоль общего профиля. Таким образом, глубина зоны контроля в плоскости от контура уступа порядка 30 м. С 2006 г. на протяжении 5 лет функционировал наблюдательный полигон на западном участке борта карьера «Железный». В результате ежегодных исследований установлено влияние двух основных факторов на распределение скорости продольной волны в прибортовом массиве пород — техногенный (горные работы) и экзогенный (вариации водопритока). Влияние экзогенного фактора сводится в основном к вариациям водопритоков в пределах контролируемого участка [46, 47].

Как показала практика, воздействие техногенного фактора в виде буровзрывных работ на распределение упругих скоростей в массиве пород имеет необратимый характер и определяет глубину нарушенной зоны от поверхности откоса уступа. Это подтверждается подобными исследованиями, выполненными на восточном и южном участках борта.

Для получения качественной сравнительной оценки геомеханического состояния проведен статистический анализ полученных данных. В качестве статистического анализа на рис. 2.49 показано графическое представление распределения значений случайной величины скорости продольной волны V_p на полигонах северо-западного, восточного и южного участков борта карьера «Железный».

Видно, что на северо-западном участке гистограмма имеет ярко выраженную бимодальную форму (рис. 2.49 *а*). Имеются два пика значений V_p с интервалами величин 3,1÷3,9 и 5,1÷5,7 км/сек, соответствующие разным крупным блокам пород, причем низкоскоростных блоков больше. Также видно, что в интервале значений V_p 1,7÷3,0 км/сек график плавно нарастает.

На восточном участке распределение также имеет бимодальную форму, но имеет сильную положительную асимметричность (рис. 2.49 *б*). В левой части гистограммы выделяются породы, характеризующиеся скоростями V_p 1,7–2,4 км/сек. В центральной части гистограммы — породы со скоростями

3,0–5,1 км/сек. Таким образом, центральная часть гистограммы на рис. 2.49 *б* имеет график распределения ближе к статистически нормальному, что свидетельствует об относительно умеренной трещиноватости пород. В свою очередь, сравнение статистических характеристик распределения скоростей продольной волны указывает на бóльшую сохранность приконтурного массива пород западного участка борта. Параметры, представленные в табл. 2.4, за исключением эксцесса, показывают, что распределение случайной величины V_p на западном участке борта (ЗБ) более статистически нормально, чем на восточном (ВБ).

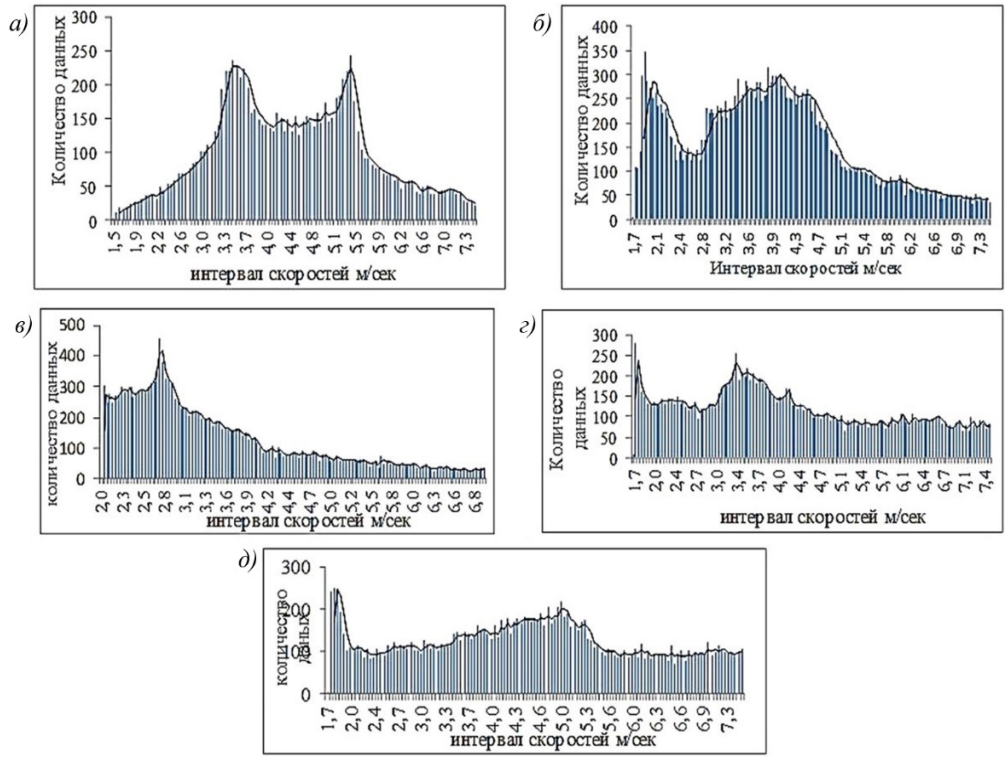


Рис. 2.49. Распределение случайной величины V_p на северо-западном (*а*), восточном (*б, в*) и южном (*г, д*) участках борта

Таблица 2.4

Статистические параметры распределение случайной величины V_p

Параметры	ЗБ	ВБ (отм. –20 м)	ВБ (отм. –140 м)
Среднее	4,42	3,9	3,5
Дисперсия выборки	1,58	1,8	1,4
Эксцесс	–0,51	–0,3	0,25
Асимметричность	0,188	0,46	1,03

Кроме того, график распределения случайной величины V_p, измеренной в пределах восточного участка борта на профиле ниже на 120 м, сильно смещен влево от центрального момента и имеет островерхий вид (рис. 2.49 *в*),

на что указывают ассиметричность (1,03) и эксцесс 0,25 (табл. 2.4). Как видно на рис. 2.49 *в*, в интервал пониженных величин V_p 2,0–3,8 км/сек попадает большинство значений V_p. Данная совокупность признаков указывает на сравнительно большую представительность низкоскоростных значений V_p в массиве анализируемых данных восточного участка, чем западного участка борта. Это свидетельствует о более значимом преобладании нарушенных пород в приконтурной области восточного участка борта, их неоднородном распределении вдоль профиля и, как следствие, меньшей устойчивости относительно западного участка в пределах зоны контроля.

Более однородным представляется распределение V_p на профилях южного участка борта (рис. 2.49 *г*, *д*), которые расположены друг под другом на отм. +94 и +70 м. Данный участок литологически однороден, что отражено на структуре гистограмм на рис. 2.49 *г*, *д* и в табл. 2.5. Видно, что все статистические параметры практически совпадают, за исключением асимметричности, по которой видно, что на отм. +94 больше низкоскоростных пород, чем на отм +70 м.

Таблица 2.5

Статистические параметры распределение случайной величины V_p

Параметры	ЮБ +94 м	ЮБ +70 м
Среднее	4,19	4,44
Дисперсия выборки	2,56	2,54
Эксцесс	–0,928	–0,931
Асимметричность	0,36	0,064

Также на обеих гистограммах имеется пик значений в интервале 1,7÷2 км/сек, приуроченный к трещиноватым породам на контуре выработки.

Таким образом, представленные результаты измерения сейсмическим методом в варианте профилирования иллюстрируют менее благоприятное геомеханическое состояние приконтурного массива пород в восточном участке борта в пределах зоны контроля вследствие техногенного воздействия и в целом отражают эффективность применения в качестве экспресс-метода оценки техногенной нарушенности приконтурного массива пород вследствие ведущихся в карьере взрывных работ.

Для периодического контроля ответственных участков массива пород в борту карьера привлечен более точный томографический вариант сейсмического метода, работающий на прямых волнах и позволяющий, помимо продольных упругих волн, как при профилировании вдоль уступа, записывать поперечные волны.

Рассматривая всю совокупность упругих характеристик вместе целесообразно больше внимания уделять распределению поперечных волн (V_s) и коэффициенту Пуассона (ν). Скоростная картина на продольных волнах имеет сильную изменчивость из-за влияния обводненности массива, тогда как величины скорости поперечных волн качественно отражают структуру массива пород, а коэффициент Пуассона показывает уровень сплошности геологической среды. Тем самым можно делать вывод о его естественной трещиноватости или степени нарушенности вследствие влияния взрывных работ.

При этом по опыту применения на участках борта карьера «Железный» зона контроля по протяженности вдоль поверхности борта может составлять

200÷300 м в длину и 100÷120 м в высоту. В таком случае геофизический полигон состоит из профилей возбуждения и приема упругих колебаний (рис. 2.50), обозначенных на рис. 2.51 и 2.52 кривыми зеленого и красного цвета соответственно. Данная схема измерений в карьере «Железный» применялась на восточном и южном участках борта.

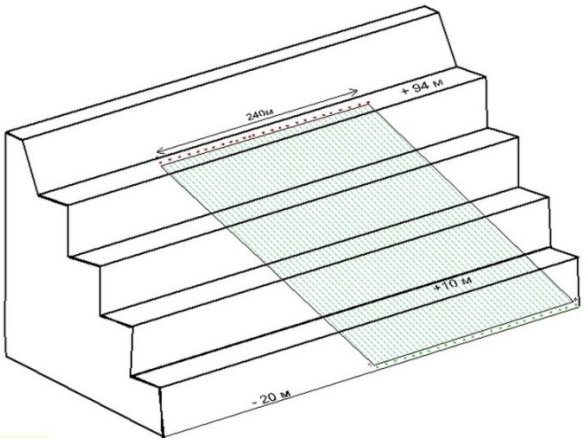


Рис. 2.50. Схема проведения сейсмотомографических измерений

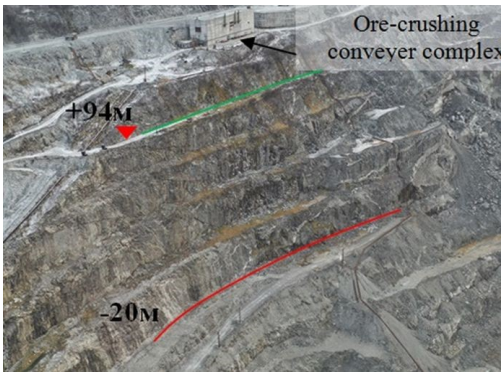


Рис. 2.51. Геофизический полигон на восточном участке борта



Рис. 2.52. Геофизический полигон на южном участке борта

Необходимость выполнения периодического мониторинга устойчивости восточного участка борта особенно актуализировалась после обрушения группы уступов, произошедшей в августе 2015 г. [14] в непосредственной близости к зданию рудно-дробильного конвейерного комплекса (РДКК) (рис. 2.51). В результате выполнения периодических исследований методом сейсмической томографии, а также аналитических оценок устойчивости были сделаны выводы об относительно менее устойчивом состоянии данного участка борта [48].

Актуальность мониторинга южного участка борта обозначилась осенью 2020 г. после произошедшего обрушения группы уступов вследствие влияния разрывных нарушений в сочетании с взрывными работами, которые существенно способствуют раскрытию трещин (рис. 2.52). Данные исследования выполнялись при участии

финских специалистов-геологов в рамках проекта HazArctic, одной из основных задач которого является исследования в области устойчивости бортов карьеров.

В результате выполнения сейсмотомографических исследований получены упругие характеристики геомеханического состояния прибортового массива пород в пределах геофизического полигона, прилегающего к участку обрушения. Как указывалось ранее, наилучшим образом отражает уровень сплошности (дискретности) геологической среды именно коэффициент Пуассона (ν). Выборка достаточно представительная — около 20 тыс. значений. Оценка относительной устойчивости восточного (ВБ) и южного (ЮБ) участков борта проведена с помощью статистического метода, результаты которой представлены в табл. 2.6. Видно, что среднее значение ν на ЮБ ниже, а дисперсия указывает на более резкие границы нарушенных пород ВБ.

Таблица 2.6

Статистические параметры распределение случайной величины ν

Параметры	ВБ	ЮБ
Среднее	0,385	0,346
Эксцесс	1,213	0,331
Асимметричность	–1,340	–1,050
Дисперсия выборки	0,001	0,008

Распределение значительно отличается от статистически нормального. Эксцесс показывает, что случайная величина ν на южном участке статистически имеет более нормальное распределение. По значению асимметричности видно, что на восточном участке значений ν с высокими показателями значительно больше. Об этом свидетельствует и статистический сравнительный анализ распределения ν на ВБ и ЮБ, приведенный на рис. 2.53, указывающий на смещение обоих графиков в сторону высоких значений ν, но достаточно высоким и широким по диапазону значений (0,3÷0,45) градиентом распределения ν описывается именно прибортовой массив ВБ.

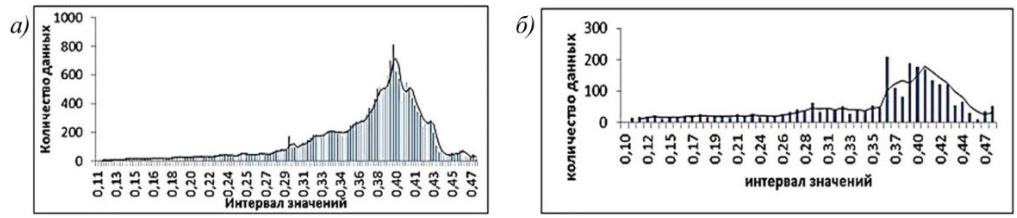


Рис. 2.53. Распределение случайной величины ν на ВБ (*а*) и ЮБ (*б*)

Таким образом, приведенные статистические параметры результатов исследований сейсмическим методом в вариантах профилирования и томографии свидетельствуют, что прибортовой массив восточного участка борта карьера «Железный» в пределах зоны контроля представляется менее устойчивым относительно других участков борта. В целом же геофизические методы

и сейсмический метод в различных вариациях, в частности, составляют основу многоуровневого геомеханического мониторинга законтурного массива пород в борту карьера «Железный» и могут быть применимы на других месторождениях, отрабатываемых открытым способом, в подобных горно-геологических условиях.

2.3.2. Комплексный подход к оценке устойчивости борта глубокого карьера с использованием локальных методов исследований

Как показывает отечественный и зарубежный опыт формирования глубоких карьеров, в процессе отработки месторождения исключительно важным требованием для непрерывного функционирования всего производственного цикла является обеспечение безопасности открытых горных работ, напрямую зависящее от степени устойчивости отдельных уступов и участков борта [49, 50]. Применительно к карьеру «Железный» АО «Ковдорский ГОК», отрабатывающему Ковдорское бадделеит-апатит-магнетитовое месторождение, горнотехническая ситуация отличается особенностями, связанными со значительными размерами карьерной выемки и ее глубиной, превышающей 500 м [51].

Прибортовой массив карьера «Железный» сложен различными типами скальных пород, отличающимися по своим механическим свойствам. В законтурном массиве пород карьера залегают крупные структурные нарушения, влияющие на устойчивость отдельных уступов и участков борта [52]. Вся совокупность влияющих на устойчивость уступов и борта в целом, факторов состоит из природной и технологической составляющих. К основным природным факторам, относятся:

— физические свойства горных пород, слагающих прибортовой массив карьера и их изменения во времени под влиянием природных условий;

— структурная нарушенность прибортового массива пород;

— гидрогеологический режим;

— НДС массива пород.

На устойчивость элементов открытой геотехнологии существенное влияние оказывает технологический фактор, а именно — способ ведения буровзрывных работ при постановке уступов на конечный контур и размер зоны техногенной трещиноватости.

Вышеперечисленные природные и техногенные факторы являются определяющими для оценки степени устойчивости элементов открытой геотехнологии, в особенности при разработке месторождений полезных ископаемых глубокими карьерами в массивах скальных пород, и должны подлежать контролю комплексом методов. Таким образом, целью данной работы является отражение результатов комплексных исследований последних лет, направленных на визуальную, экспериментальную и аналитическую оценку устойчивости борта карьера «Железный» и его конструктивных элементов.

Ранее при оценке устойчивости элементов открытой геотехнологии НДС традиционно принималось соответствующим гравитационному виду, определяемому только собственным весом вмещающих пород. Последними исследованиями как Горного института КНЦ РАН, так и других организаций установлено, что в прибортовых массивах пород, сложенных преимущественно

прочными скальными породами, при формировании контура карьера с сохранением законтурного массива пород параметры поля напряжений часто определяются не только собственным весом, но и тектонической составляющей, нередко превышающей гравитационную компоненту напряжений в несколько раз [53–55]. В связи с этим вопросу определения параметров НДС массива пород и его учета при оценке устойчивости борта карьера уделялось особое внимание.

Результаты исследования и анализ

До 2013 г. исследованиями напряженного состояния массива пород с целью инструментальной оценки устойчивости борта карьера «Железный» был охвачен весь его контур на горизонтах выше высотной отм. ±0 м. Исследования выполнялись методом разгрузки в варианте торцевых измерений [56], положительный опыт использования которого описан в работе [57]. В результате обобщения большого объема исследований стало возможным районирование карьерного поля по уровню действующих напряжений для участка прибортового массива выше абсолютной высотной отм. ±0 м (рис. 2.54 *а* (область в пределах штриховых линий)), т. е. до глубины от поверхности первоначального рельефа ориентировочно 300 м.

На рис. 2.54 *а* зеленым цветом отображены стабильные зоны прибортового массива пород с точки зрения действующих напряжений, желтым — менее стабильные, а красным — нестабильные [58]. Под стабильными зонами понимаются зоны в массиве пород, в пределах которых действуют умеренно сжимающие напряжения ($\sigma_{действ.} = 0{,}1 \div 0{,}4 \bullet \sigma_{сж.}$) и отсутствует действие растягивающих.

В дальнейшем при понижении горных работ ниже абсолютной отм. ±0 м выполняются исследования напряженного состояния по мере формирования участков борта карьера на более глубоких горизонтах. Результаты изучения напряженного состояния на глубинных горизонтах инженерно-геологических секторов (ИГС) №№ I и II, расположенных на северном участке борта карьера свидетельствуют о положительном влиянии горизонтальных тектонических напряжений ($\sigma_{действ.}$) на устойчивость в исследуемой зоне. Среднее значение максимальной компоненты действующих в законтурном массиве пород напряжений σ_{max} здесь составляет 22 МПа, минимальной σ_{min} — (8) МПа (рис. 2.54 *а*), что в сравнении со средними величинами измеренных напряжений на положительных отметках ($\sigma_{max} = 20$ МПа, $\sigma_{min} = 6$ МПа) несколько выше.

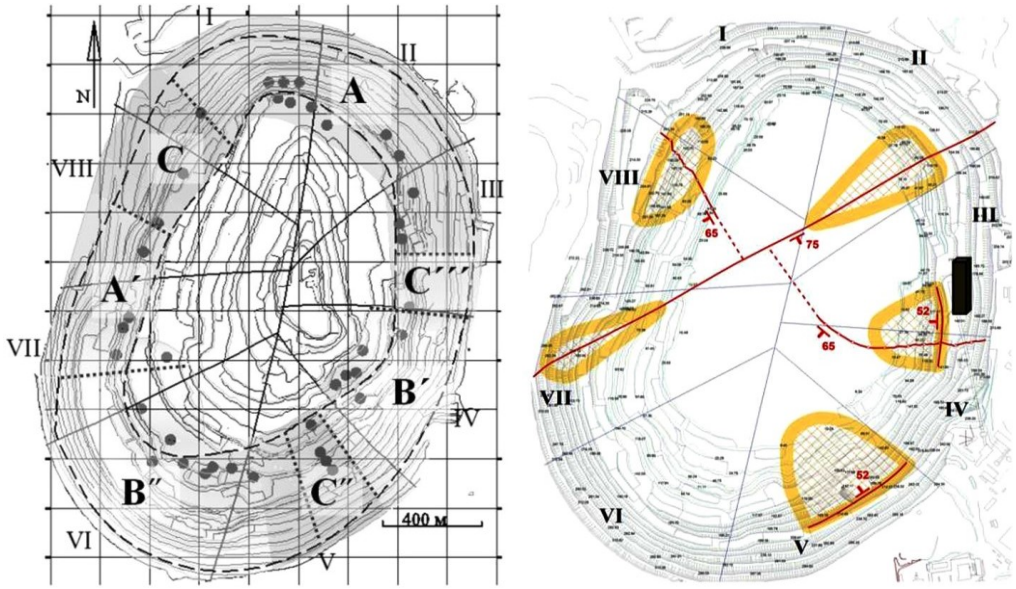
Устойчивость западного и южного участков борта карьера в пределах ИГС №№ V–VIII на глубинных горизонтах (ниже отм. ±0 м) представляется более неопределенной и требует дополнительных исследований.

Единичные определения уровня действующих напряжений, выполненные в пределах южного и западного участков борта карьера, указывают на отсутствие действия растягивающих напряжений σ_{min} и на стабильно высокие значения действующих сжимающих напряжений σ_{max} в отличие от вышележащих горизонтов, где отмечено действие растягивающих напряжений ($\sigma_{min} = (-1) \div 7$ МПа).

Тенденция на увеличение значений σ_{max} с глубиной также прослеживается в пределах восточного участка борта карьера (ИГС №№ III и IV) ниже гор. ±0 м, где

зафиксированы более высокие величины действующих напряжений по сравнению с абсолютными отметками выше горизонта ±0 м. Здесь средние значения σ_{max} и σ_{min} составляют порядка 24 и 15 МПа соответственно, в то время как на положительных отметках восточного участка борта средние значения σ_{max} и σ_{min} составляют 14 и 7 МПа соответственно. Устойчивому состоянию массива пород данных участков в целом способствует отсутствие на глубинах ниже абсолютной отм. ±0 м геолого-структурных неоднородностей высокого ранга, подсекающих борт карьера.

Полученные результаты определения параметров действующих напряжений не противоречат влиянию разрывных нарушений на геомеханическое состояние и выявленным ранее зонам распространения деформаций в массиве пород карьера «Железный» (рис. 2.54 *б*). При этом, как видно на рис. 2.54 *б*, со стороны восточного и юго-восточного участков борта карьера на границе ИГС №№ III и IV устойчивость борта карьера снижается в пределах зон разрывных нарушений, подсекающих карьерную выемку.



а *б*

Рис. 2.54. Районирование массива пород в окрестности карьера «Железный»: *а* — с точки зрения уровня действующих напряжений; ● — наблюдательная станция; ▭ — местоположение геофизического полигона; *б* — с точки зрения расположения главных разрывных нарушений (красные кривые) и зон распространения деформаций (желтые контуры)[1], ▬ — здание РДКК; ⊥ — углы падения разрывных нарушений; I–VIII — ИГС

С учетом имеющихся планов по увеличению площади карьера и его углублению периодическое получение данных о геомеханическом состоянии законтурного

[1] Данные Службы мониторинга устойчивости уступов Геологического управления АО «Ковдорский ГОК».

массива пород, в том числе исследование распределения действующих напряжений, является необходимым условием для разработки мероприятий, обеспечивающих безопасность ведения открытых горных работ.

Относительная устойчивость уступов в пределах северного участка и глубинных горизонтов борта карьера в целом подтверждается исследованиями комплексом скважинных локальных инструментальных методов, направленных на оценку размеров зоны техногенной нарушенности. Данный параметр определялся в период с 2000 по 2018 гг. на участках борта карьера, имеющих различные конструктивные параметры при постановке в конечное положение. Исследования выполнялись в пределах участков, где применялась технология щадящего взрывания при формировании конечного контура [59].

Таким образом, нарушенность приконтурного массива пород находится в пределах 3 м на большей части контура карьера и отражает качество буровзрывных работ с учетом физико-механических свойств и геомеханического состояния различных участков борта на момент времени проведения исследований. При этом природные факторы (зоны трещиноватости, подсекающие участки борта карьера), которые показаны на схеме районирования на рис. 2.54 *б*, негативно сказываются на устойчивости отдельных участков борта карьера.

Геолого-структурные неоднородности (зоны сближенных трещин, локальные разломы), подсекающие восточный участок борта, являются предметом комплексных исследований последних лет. Так, при участии Геологического института КНЦ РАН выполнен среднесрочный прогноз на ближайшие 5 лет по возможному расширению площади реализованной в августе 2015 г. деформации за счет прорастания техногенных трещин в сторону группы уступов, находящихся непосредственно под зданием РДКК в пределах абсолютных отметок +70÷–20м [60]. Данные визуальных наблюдений подтверждаются результатами периодических наблюдений сейсмическим методом в варианте томографии, выполненных в пределах геофизического полигона на отметках +94÷+10 м ниже здания РДКК в период с 2014 по 2016 гг. (рис. 2.55 *а*) [58]. С целью получения упругих характеристик приконтурного массива пород выполнено 6 циклов измерений в разные времена года, что связано с необходимостью учета, во-первых, влияния обводненности, зависящего от уровня подземных вод, и, во-вторых, процессов выветривания. В результате анализа скоростей распространения продольных и поперечных волн на некоторых участках в зоне контроля выявлен рост величин коэффициента Пуассона, что характеризует степень ослабления структурных связей и повышение трещиноватости в массиве пород. Местоположение геофизического полигона в плане и сопоставление с результатами районирования карьера рудника «Железный» с точки зрения уровня действующих напряжений указывают на неблагоприятное геомеханическое состояние данного участка борта (рис. 2.54 *а*, 2.55 *б*).

Помимо натурных исследований, была выполнена аналитическая оценка геомеханического состояния борта карьера «Железный» с использованием программного комплекса SVSlope, по результатам которой разработана

схема районирования карьерного поля по величине коэффициента запаса устойчивости (рис. 2.56).

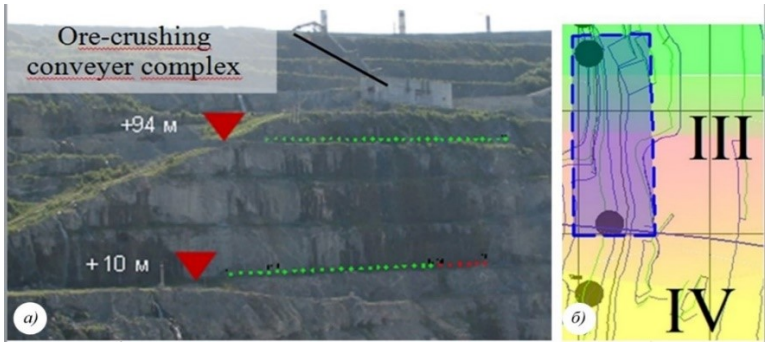


Рис. 2.55. Геофизический полигон на восточном участке борта карьера «Железный»: *а* — фотомонтаж исследуемого участка массива пород; *б* — совмещение фрагмента плана горных работ с областью геофизического полигона; ▭ — местоположение геофизического полигона; III и IV — ИГС

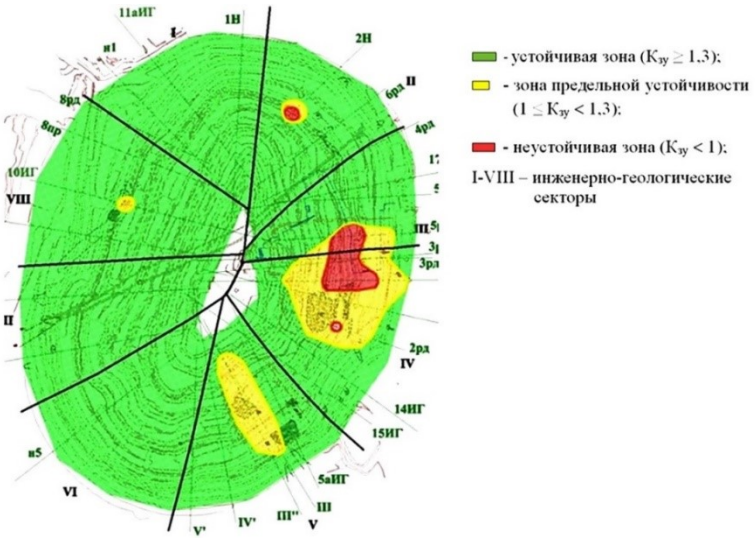


Рис. 2.56. Схема районирования по величине коэффициента запаса устойчивости борта карьера в целом

Данный программный продукт широко применяется как в зарубежной, так и в отечественной практике [61. 62]. При оценке коэффициентов запаса устойчивости учитывали следующие факторы: сцепление, угол внутреннего трения, коэффициент структурного ослабления, выявленные поверхности ослабления, уровень грунтовых вод. Для каждой расчетной схемы разреза проводили поиск потенциальной поверхности ослабления как в автоматическом, так и в ручном режиме в случае наличия поверхностей ослабления. По нанесенным на план карьера разрезам выделяли зоны с различной устойчивостью участков борта карьера. Полученные разрезы были

нанесены на план, где методом интерполяции были определены зоны с различной устойчивостью. Устойчивые зоны с коэффициентами запаса устойчивости $К_{з.у.} \geq 1{,}3$ обозначены зеленым цветом. Зоны предельной устойчивости ($1 \leq К_{з.у.} < 1{,}3$) — желтым цветом. Неустойчивые зоны ($К_{з.у.} < 1$) — красным. Также результаты аналитического анализа принципиально не противоречат и качественно соответствуют расположению главных разрывных нарушений и выявленным ранее зонам распространения деформаций в массиве пород карьера «Железный».

2.4. Развитие методов контроля устойчивости откосов уступов, бортов карьеров и отвалов на основе построения объемных моделей и оценки уровня геомеханического риска

2.4.1. Развитие методов контроля устойчивости откосов уступов, бортов карьеров и отвалов на основе построения объемных моделей и оценки уровня геомеханического риска

В соответствие с перечнем методов и технических средств выявления зон локальных нарушений устойчивости (табл. 2.7), а также средств 3D-моделирования формируются основные методы контроля устойчивости откосов уступов, бортов карьеров и отвалов. В отличие от вышеприведенных средств и методов, объемное моделирование позволяет комплексно интегрировать все необходимые данные как по поверхностям (уступов, рельефа и т. п.), так и по внутреннему строению, что существенно повышает точность прогнозных построений (в отношении развития деформационных процессов).

Таблица 2.7

Ранжирование выделенных тектонических структур по этапам и степени активности

Структура/блок	Поздне- и пост-магматическая стадия	Мезозойское корообразование	Миоцен-плиоценовое корообразование	Голоценовое изостатическое воздымание
EGF	+++	?	?	?
RF	?	++	++	+++
Группы F и Ft	–	?	++	+++
R — радиальные	–	++	+++	++
ZMF	+	++	+++	++
Дайки, реактивированные с ЗС	+++	++	++	+++
C — концентр-ие	++	+	+	+
D — диагональные	++	–	+	?

Примечание. + — слабое участие элементов в этапе; ++ — заметное участие; +++ — интенсивное участие; ? — неясное участие.

Развитие методов контроля устойчивости откосов уступов, бортов карьеров и отвалов на основе построения объемных моделей достигается за счет периодического сопоставительного обследования/документации с применением высокоточных методов (табл. 2.7). В зависимости от набора и комплекта применяемого оборудования и методов выбирается масштаб исследований и решаемых задач. Так, 3D-модели на основе материалов космо- и аэрофотосъемки позволяют решать задачи регионального уровня (рис. 2.57), а применение результатов съемки

с помощью БПЛА и/или лидаров (сканеров) предоставляют материал для крупномасштабных и детальных моделей (рис. 2.58).

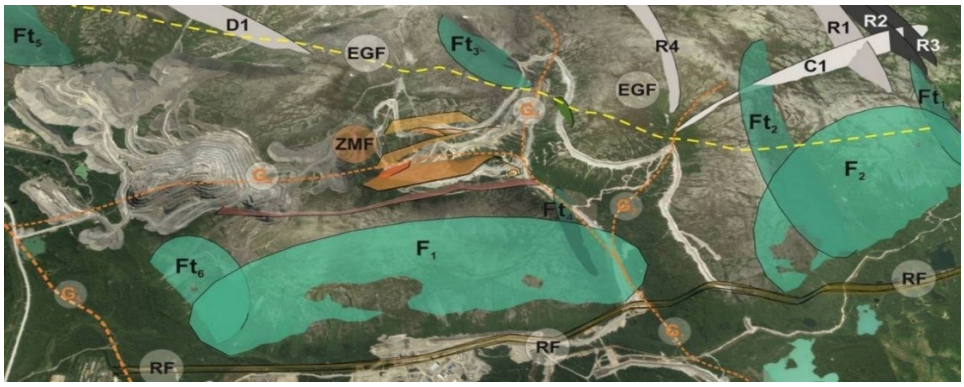


Рис. 2.57. Схема геодинамического районирования восточной части Хибинского массива (район карьеров «Ньоркпакх» и «Олений Ручей»): RF — Ring Fault (внешний кольцевой разлом); группа F — Fault (сбросы/псевдосбросы); группа Ft — Transverse Fault (поперечные сбросы); EGF — южная граница Эвеслогчоррской группы разломов/зоны смятия; ZMF — зона Главного разлома; группа R — радиальные разломы; D — диагональные разломы; C — концентрические разломы; группа G — границы блоков, дешифрированные по орогидрографической сети



а



б

Рис. 2.58. 3D-фотомодели по материалам детальных обследований: *а* — обнаружение признаков начала развития деформаций (появление трещин отрыва и прорастание сколовых трещин); *б* — произошедшая спустя 2 месяца деформация (обрушение), рудник «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК»

Комплексирование разномасштабных методов 3D-моделирования в отношении открытых горных выработок и естественного рельефа позволяет эффективно и быстро выполнить геодинамическое районирование с ранжированием геометризованных элементов по опасности (рис. 2.57).

Изучение и ранжирование выделенных структур (рис. 2.57) с точки зрения времени образования и периода «геодинамической активности» позволило их ранжировать (табл. 2.7).

Как видно из табл. 2.7 наибольший вклад в современную геодинамику Хибин вносят структуры Главного разлома, поперечные и продольные сбросы и реактивированные дайки различного состава.

Детальные 3D-модели (рис. 2.58) позволяют геометризовать основные опасные/потенциально опасные структуры/факторы и организовать мониторинг опасных геологических процессов за счет выполнения периодических повторных обследований.

Таким образом, исходя из перечня задач и масштабности осуществляемого контроля/мониторинга, формируется и комплексируется перечень методов/технических средств получения исходной информации, ее обработки и 3D-геометризации/визуализации, включая специализированное ПО. Это дает технологическую базу для разработки обоснованных и точных прогнозов развития деформационных процессов/контроля устойчивости откосов уступов.

2.4.2. Оценка устойчивости борта карьера при плоском и объемном вариантах расчета

Для безопасного ведения открытых горных работ одним из необходимых условий является обеспечение устойчивого состояния борта карьера. В настоящее время даже в процессе проектирования новых карьеров глубина их превышает 500 м, а глубина действующих уже достигает отметок 800 м и более [63, 64]. Увеличение проектной глубины карьеров связано с тем, что бортовое содержание полезного компонента при больших глубинах изменяется в меньшую сторону, а без увеличения углов откосов борта добиться рентабельности на таких месторождениях очень сложно. Определение устойчивых углов откосов влияет прежде всего на безопасность ведения горных работ.

Основным действующим документом для определения устойчивых параметров бортов и уступов карьеров на территории Российской Федерации являются федеральные нормы и правила (ФНИП) в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» (далее — «Правила») [65]. Данными «Правилами» в п. 37 раздела V предлагается выполнять оценку устойчивости бортов, уступов, откосов производить на основе детерминированного и (или) вероятностного подхода методами: предельного равновесия; численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород; вариационным. Классическим и наиболее востребованным является метод предельного равновесия (детерминированный подход), где критерием устойчивости значится коэффициент запаса устойчивости (КЗУ): отношение удерживающих и сдвигающих сил на сформировавшейся поверхности скольжения.

В соответствии с табл. 2 Приложения 3 «Правил», основными для оценки устойчивости бортов карьеров на различных этапах проектирования

методами являются методы, основанные на теории предельного равновесия. В п. 10 Приложения 3 «Правил» указано, что «при расчете устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов, в том числе с учётом воздействия сейсмических сил и нагрузок от горного оборудования, с использованием теории предельного равновесия, применяют методы алгебраического или векторного сложения сил (многоугольника сил), а также методы, удовлетворяющие трем уравнениям равновесия (сил и моментов)». Таким образом, «Правила» разрешают использовать методы расчета КЗУ, удовлетворяющие трем уравнениям равновесия, в основе которых используется теория предельного равновесия, к которым, в частности, относятся: метод Янбу (Janbu 1968); метод Спенсера (Spencer 1967); метод Моргенштерна – Прайса (Morgenstern, Price 1965); метод Сармы (Сарма 1973).

На сегодняшний день создание детальной цифровой модели отработки месторождения является неотъемлемой частью при оценке эффективности добычи. Наряду с этим развиваются и программные продукты для оценки устойчивости элементов открытой геотехнологии, способные включать в себя множество влияющих факторов. При этом цифровые технологии позволяют легко и быстро переносить контуры технологической модели карьера из одного программного продукта в другой, тем самым сводя к минимуму пространственные геометрические ошибки. Наличие цифровой модели карьера упрощает создание расчетных схем и наполнение их исходными данными.

В качестве объекта исследования принят карьер, отрабатывающий одно из месторождений Хибинской группы, находящееся в Арктической зоне РФ. При формировании борта карьера с пологими углами отработка данного месторождения будет являться не эффективной, поэтому возможность применения на данном объекте крутых углов откосов борта является важнейшей исследовательской задачей.

Методика

Для оценки устойчивости борта карьера данного месторождения использовались лицензионные программные комплексы Slide 3 и SVOFFICE 2009 (пакет SVSlope), которые представляют собой программы для решения задач по оценке устойчивости откосов, формируемых в различных условиях. Помимо компьютерных комплексов, расчет устойчивости выполнен ручным способом с использованием схем и формул, приведенных в «Правилах» [65].

Оценка устойчивости борта карьера во всех случаях выполнена методом предельного равновесия. Расчет устойчивости выполняется путем сравнения удерживающих и сдвигающих сил по критической поверхности скольжения, которая может представлять собой как круглоцилиндрическую, так и сложную поверхность. Для определения местоположения поверхности скольжения, находящейся в предельном равновесии откоса, в программах применяется метод последовательных приближений путем проведения многократных расчетов.

По «Правилам» расчет выполняется в соответствии с одной из предложенных схем. Коэффициент запаса устойчивости может определяться в том числе и с учетом внешних нагрузок (сосредоточенные, распределенные силы), анкеров (преднатяжение и сцепление по корню), сейсмичности, грунтовых вод, а также с учетом сложного геологического строения скального и грунтового массива: непараллельное расположение слоев, включения в форме линз, выход геологических

слоев на поверхность и описание разломов геологическим слоем малой мощности со сниженными значениями физико-механических свойств. Программные комплексы имеют огромный потенциал в области оценки устойчивости откосов бортов карьеров и широко применяются как в российской, так и мировой практике [66–71].

Для создания объемной модели массива пород месторождения, включающего в себя карьерную выемку, применена горно-геологическая информационная система (ГГИС) Mineframe разработки Горного института КНЦ РАН [72]. Модель массива пород месторождения включает в себя следующие горно-геологические и горнотехнические элементы: дневная поверхность, рудные и вмещающие породы, зоны структурных неоднородностей, карьерная выемка. Критерий устойчивости борта карьера принят в соответствии с табл. 1 «Правил» [65]: КЗУ ≥ 1,3.

Расчетные значения физико-механических свойств пород

При формировании схем оценки устойчивости борта карьера основные литологические разности были объединены, как показано в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Усредненные показатели физико-механических свойств горных пород участка месторождения, принятые для расчета устойчивости борта карьера

Наименование породы	Плотность, т/м^3	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, °
Уртиты	2,78	0,894	36
Ювиты	2,70	0,944	38
Руды	3,02	0,711	38
Луявриты	2,77	0,783	35
Рисчорриты	2,69	0,951	37
Мальиниты	2,69	0,951	37
Зона обрушения и рыхлых отложений	2,20	0,045	37
Разломы	2,00	0,022	25,5

По сложности гидрогеологических условий район месторождения относятся к III группе «Классификации запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод» [73]. Уровень грунтовых вод принят в соответствии с имеющимися данными [74].

Результаты оценки устойчивости борта карьера

Предварительные расчеты устойчивости выполнены в объемной (3D) постановке в упрощенном варианте. За основу принят 3D-контур карьера с учетом вмещающих пород и рудного тела. В качестве вмещающих пород приняты рисчорриты во всем пространстве прибортового массива.

Расчет устойчивости выполнен в программном комплексе Slide3 по методу Моргенштерна – Прайса [75], удовлетворяющим трем уравнениям равновесия [76]. Данный метод успешно применяется для расчетов устойчивости откосов бортов карьеров в мировой практике [69–71, 77–79]. Вид поверхности ослабления — сферическая.

Результаты оценки устойчивости программным комплексом Slide3 по методу Моргенштерна – Прайса представлены на рис. 2.59.

В результате проведенных расчетов видно, что зоны с наименьшим коэффициентом запаса устойчивости расположены на северо-западном (КЗУ = 1,6) и северо-восточном (КЗУ = 1,3) участках борта карьера. Обе зоны имеют простирание по всей высоте

участка борта. Зона, расположенная со стороны северо-западного участка борта карьера, имеет вогнутую форму в горизонтальной плоскости, контур борта карьера в вертикальной плоскости практически прямой. Зона со стороны северо-восточного участка борта имеет выпуклую в плане форму контура карьера в горизонтальной плоскости. Наименьшее значение КЗУ борта карьера составляет 1,3.

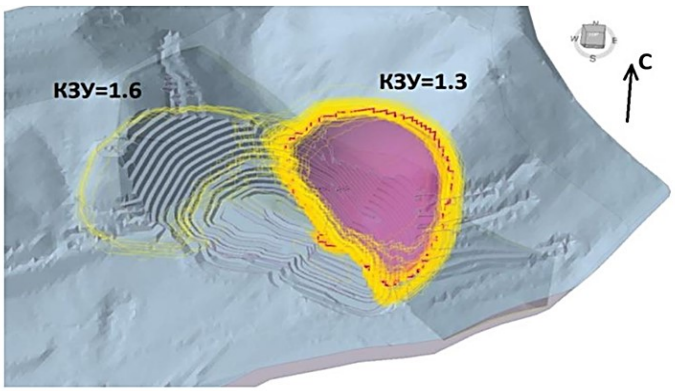


Рис. 2.59. Результаты оценки коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) в объемной (3D) постановке: КЗУ = 1,6 — для северо-западного участка борта; КЗУ = 1,3 — для северо-восточного участка борта; — контуры выхода сферических поверхностей ослабления, по которым определены значения КЗУ

Для того, чтобы выполнить более достоверный анализ всей области карьера необходимо провести оценку устойчивости по различным профилям (в плоской постановке), более детально наполненными необходимыми геологическими, структурными, гидрогеологическими и другими данными.

В результате анализа проектного положения карьера было определено местоположение 9 профилей для оценки устойчивости его борта. Каждый профиль был сформирован перпендикулярно участку борта карьера, устойчивость которого оценивалась.

По графическим данным для каждого профиля построена расчетная схема, в соответствии с которой выполнялся автоматический поиск наиболее опасной круглоцилиндрической и линейно-ломаной поверхностей ослаблений. В случае наличия в прибортовом массиве разломных зон или зон трещиноватости, расчетная схема корректировалась с учетом имеющихся особенностей геологического строения.

Расчет устойчивости выполнен в плоской постановке (2D), как и в случае с объемной постановкой (3D), выполнен по методу Моргенштерна – Прайса в программном комплексе SVOFFICE 2009 (пакет SVSlope).

На рис. 2.60 изображен план конечного контура карьера с нанесенными положениями профилей расчетных схем.

Пример расчетной схемы для профиля 1 приведен на рис. 2.61. Оценка устойчивости по остальным профилям выполнена аналогичным образом.

Результаты оценки устойчивости борта карьера обобщены в табл. 2.9.

В первой строке табл. 2.9 указан номер расчетного профиля. Во второй и третьей строках — значения коэффициента запаса устойчивости по наиболее критической, найденной в автоматическом режиме круглоцилиндрической КЗУ(кцп)

и линейно-ломаной КЗУ(лл) поверхностям ослаблений. В четвертой — коэффициент запаса устойчивости КЗУ(р) по разломам, где в скобках указан номер разлома.

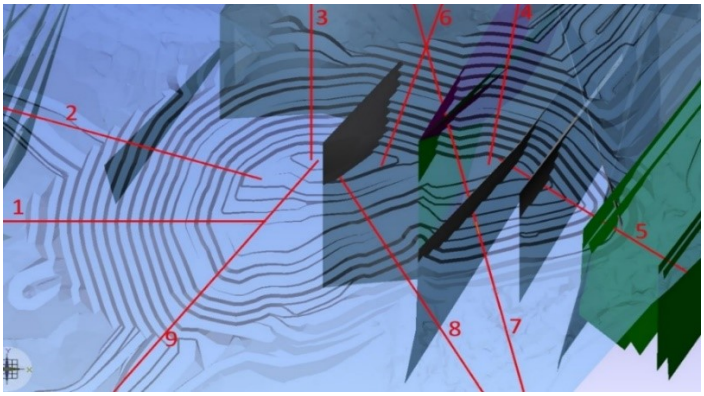


Рис. 2.60. Положение расчетных профилей на объемной модели карьера месторождения: —— — расчетные профили; ▰ — разломные зоны

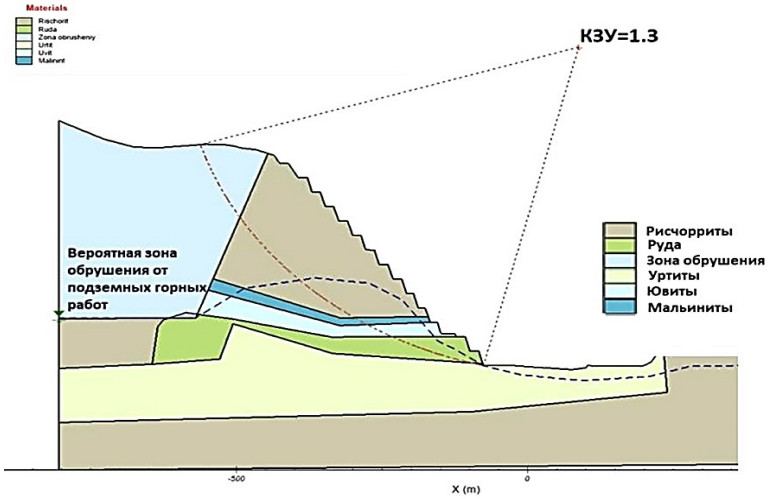


Рис. 2.61. Расчетная схема профиля 1: ----- — уровень грунтовых вод; ---- — положение наиболее критической поверхности ослабления

Таблица 2.9

Значения коэффициентов запаса устойчивости по расчетным профилям

№ профиля	1	2	3	4	5	6	7 (Юг)	7 (С)	8	9
КЗУ(кцп)	1,3	1,4	1,6	1,3	2,6	1,3	2,4		2,3	1,9
КЗУ(лл)	1,3	1,5	1,7	1,3	2,5	1,3	2,4		2,3	1,9
КЗУ(р)		1,7 (4_7) 1,9 (4_6)		1,5 (5_40) 1,4 (5_41)	1,7 (морена)	1,3 (5_53)	1,5 (морена)	1,5 (5_39)		

Примечание. КЗУ(кцп) — коэффициент запаса устойчивости по круглоцилиндрической поверхности ослабления; КЗУ(лл) — коэффициент запаса устойчивости по линейно-ломаной поверхности ослабления; КЗУ(р) — коэффициент запаса устойчивости по поверхности разлома; (морена) — коэффициент запаса устойчивости в морене; (Юг, С) — южная и северная части профиля.

В соответствии с табл. 1 Приложения 4 «Правил» [65] нормативное значение коэффициента запаса устойчивости борта для массива скальных горных пород — 1,3. Из табл. 2.9 видно, что КЗУ по всем профилям (вторая, третья, четвертая строки)

больше или равен 1,3, что свидетельствует об устойчивом состоянии борта карьера. При этом необходимо отметить, что по профилю 2 возможна локальная самозаоткоска близкорасположенных к разломам уступов.

Отметим, что полученные значения КЗУ по северо-восточному участку борта (профиля 4 и 6) в результате расчетов в плоской постановке с применением программного комплекса SVOffice 2009 (пакет SVSlope) соответствуют результатам, полученным в объемной постановке при расчетах в Slide3. Однако по северо-западному участку борта значения КЗУ в плоской постановке ниже, чем в объемной, что связано с вогнутой формой поверхности участка борта в горизонтальном направлении.

Оценка устойчивости борта карьера по ФНИП в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов»

Ввиду того, что в «Правилах» применение современных программных комплексов по оценке устойчивости откосов не утверждено, то необходимым является проведение расчетов в соответствии с действующими «Правилами» [61].

Оценка устойчивости борта карьера была выполнена в соответствии с Приложением 3 «Правил» по ранее выделенному профилю 1 (рис. 2.62).

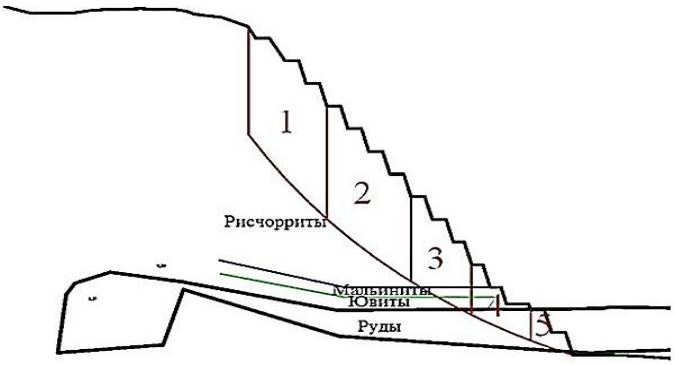


Рис. 2.62. Расчетная схема по профилю 1 в соответствии с «Правилами» [61]: *1–5* — расчетные блоки, — границы литологических разностей

Для построения потенциальной плоскости ослабления определена длина вертикальной трещины отрыва *H*90 и ширина призмы обрушения *a* и по формулам:

$$H_{90} = \frac{2C}{\gamma} ctg\left(45^\circ \quad \right), \tag{2.2}$$

$$a = \frac{2H\left[1 - ctg\alpha\left(\frac{\alpha+\varphi}{2}\right)\right] - 2H_{90}}{ctg\varepsilon + tg\left(\frac{\alpha+\varphi}{2}\right)}, \tag{2.3}$$

где H — высота откоса, м; α — угол откоса, град; φ — угол внутреннего трения, град; ε — угол наибольшего главного напряжения $\varepsilon = 45° - \varphi/2$, град; γ — объемный вес пород в массиве, т/м^3; С — расчетная величина сцепления пород, т/м^2.

В качестве исходных данных были приняты следующие параметры:

— высота борта карьера $H \approx 356$ м;

— угол откоса борта карьера $\alpha \approx 52°$;

— угол внутреннего трения $\varphi \approx 37$ град;

— сцепление $C \approx 951$ т/м^2;

— плотность пород $\gamma \approx 2{,}69$ г/см^3.

Высота вертикальной трещины отрыва H90 в соответствии с исходными данными по формуле (2.2) составляет примерно 141 м. Ширина призмы обрушения по формуле (2.3) имеет отрицательное значение, поэтому за конечную точку ширины призмы обрушения примем верхнюю бровку первого уступа.

Далее производим построение потенциальной поверхности скольжения и разделим призму возможного обрушения на несколько блоков для расчета КЗУ методом алгебраического сложения сил в соответствии с п. 11 Приложения 3 «Правил». Полученная расчетная схема представлена на рис. 2.62.

Затем находим вес каждого блока (P_i) по формуле:

$$P_i = S_i \gamma, \tag{2.4}$$

где S_i — площадь расчетного блока (определяется графически), м^2; γ — объемный вес, т/м^3.

Нормальную (N) и тангенциальную (T) составляющую веса каждого блока находим по формулам:

$$N_i = P_i \cdot \cos\beta, \tag{2.5}$$

$$T_i = P_i \sin\beta, \tag{2.6}$$

где β — угол наклона подсекающей поверхности для каждого блока, град.

Полученные в результате расчетов по формулам (2.4–2.6) значения, а также другие необходимые параметры расчетных блоков приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Параметры выделенных блоков для профиля 1

№	Вес блока на потенциальную поверхность ослабления, P_i, т	Угол наклона участка подсекающей поверхности, β, град	Нормальная составляющая веса блока, N_i, т	Тангенциальная составляющая веса блока, T_i, т	Длина участка по потенциальной поверхности ослабления, l, м	Сцепление, С, т/м^2
1	5130	52	37164	22880	140	95
2	8722	43	36274	26529	126	95
3	10172	32	18600	15774	79	95
4	11536	29	8948	7826	74	71
5	5460	23	3872	3564	51	71

Необходимо отметить, что участки потенциальной поверхности ослабления блоков 1–2 попадают в зону рисчорритов, 3 — малинитов и ювитов, 4 и 5 — руды, в связи с чем сцепление по ним принято в соответствии с табл. 2.10.

Ввиду отсутствия негативного воздействия гидрогеологического фактора, сейсмической активности, а также отсутствия зданий и сооружения в данной области, расчет КЗУ участка борта карьера выполнен по скорректированной формуле [61]:

$$КЗУ = \frac{C \times \sum_{i=1}^{n} l_i + tg\varphi \times \sum_{i=1}^{n} N_i}{C \times \sum_{i=1}^{n} T_i}. \tag{2.7}$$

При подстановке в формулу (2.7) параметров выделенных блоков из табл. 2.10 КЗУ по профилю 1 составляет ≈1,4, что свидетельствует об устойчивом состоянии данного участка борта карьера.

Оценка устойчивости по ФНИП в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» дает немного завышенные (на 8 %) нежели в программном комплексе SVOffice 2009 (пакет SVSlope) значения КЗУ, что можно считать погрешностью при выполнении расчетов.

2.5. Разработка методических основ комплексной системы геомеханического мониторинга геологической среды ГТС

Интенсификация открытых горных работ и связанное с этой тенденцией расширение и углубление границ карьерной выемки делают необходимым решение вопросов, связанных с обеспечением безопасности производства и сохранения устойчивости как бортов карьеров и отвалов, так и основных промышленных объектов, находящихся в пределах промплощадки и горного отвода предприятия. Основной целью организации системы мониторинга устойчивости объектов горно-обогатительного комбината (далее — комбината) и прилегающей к нему территории предполагается обеспечение безопасного непрерывного производственного цикла предприятия, для чего на первоначальном этапе важным представляется именно обоснованное составление перечня объектов, подлежащих включению в общую интегрированную схему мониторинга.

Постановка задачи

Структуру комплексной системы геомеханического мониторинга геологической среды ГТС представим на примере АО «Ковдорский ГОК» — ведущего горнодобывающего предприятия в составе управляющей компании АО «МХК “Еврохим”». Главным сырьевым ресурсом предприятия является месторождение магнетитовых и апатитовых руд, отрабатываемое открытым способом рудником «Железный», начиная с 1960-х гг. Перспективная концепция развития Ковдорского ГОКа основана на продлении сроков открытых горных работ за счет углубления карьера и увеличения площади открытых горных работ [42].

В результате интенсивного ведения горных работ открытым способом и сопутствующей хозяйственной деятельности в пределах горного и земельного отводов образовалась крупная карьерная выемка глубиной более 500 м, отвальное и хвостовое хозяйства, были вовлечены в отработку дополнительные месторождения полезного ископаемого. Со временем встал вопрос об организации системы мониторинга геомеханического состояния данных объектов. Следует заметить, что отдельные элементы такой системы мониторинга действовали на комбинате и ранее, практически с самого начала его деятельности. Задачей современного

этапа являлась разработка комплексной системы мониторинга, что в настоящее время возможно на базе применения цифровых технологий. Такая задача была поставлена руководством предприятия.

Пример составления перечня объектов мониторинга в рамках начального этапа решения поставленной задачи

На начальной стадии решения поставленной задачи был сформирован перечень из четырех групп объектов комбината, а именно:

— поверхности бортов карьеров и отвалов (I группа);

— гидротехнические сооружения (II группа);

— здания и сооружения (III группа);

— объекты на прилегающей территории (IV группа).

Каждая из групп объектов обладает своими особенностями, свойствами, критериями и другими характеристиками, на основе которых происходит их формирование и, соответственно, методическое сопровождение с целью обеспечения безопасной и бесперебойной эксплуатации объектов мониторинга в отдельности с последующим внедрением в общую интегрированную схему мониторинга.

Принимая во внимание ключевую и логичную взаимосвязь объектов I группы с остальными объектами мониторинга устойчивости, в данной работе предложена структура комплексной системы мониторинга применительно к элементам открытой геотехнологии, которые представлены в табл. 2.11.

Подобный перечень предложен и для объектов II, III и IV групп.

Таблица 2.11

Поверхности бортов карьеров и отвалов (I группа)

№ п/п	Объект	Элемент объекта	Местонахождение
1	Карьер «Железный»	Уступ	Горный отвод
2		Группа уступов	Горный отвод
3		Борт	Горный отвод
4	Карьер апатит-штаффелитовых руд (АШР)	Уступ	Горный отвод
5		Группа уступов	Горный отвод
6		Борт	Горный отвод
7	Техногенное месторождение	Уступ	Горный отвод
8		Борт	Горный отвод
9	Породный отвал № 1	Ярус	Земельный отвод
10		Породный отвал № 1	Земельный отвод
11	Породный отвал № 2	Ярус	Земельный отвод
12		Породный отвал № 2	Земельный отвод
13	Породный отвал № 3	Ярус	Земельный отвод
14		Породный отвал № 3	Земельный отвод

Организация системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия

Функционально система является одной из подсистем корпоративной ГИС [80], что и определяет схему ее организации, представленную на рис. 2.63.

Основу составляет платформа ГИС, поддерживающая трехмерные данные и работу с рельефом. Необходимым условием работы с пространственными данными в многопользовательской среде представляется разделение на серверную и пользовательскую части [81].

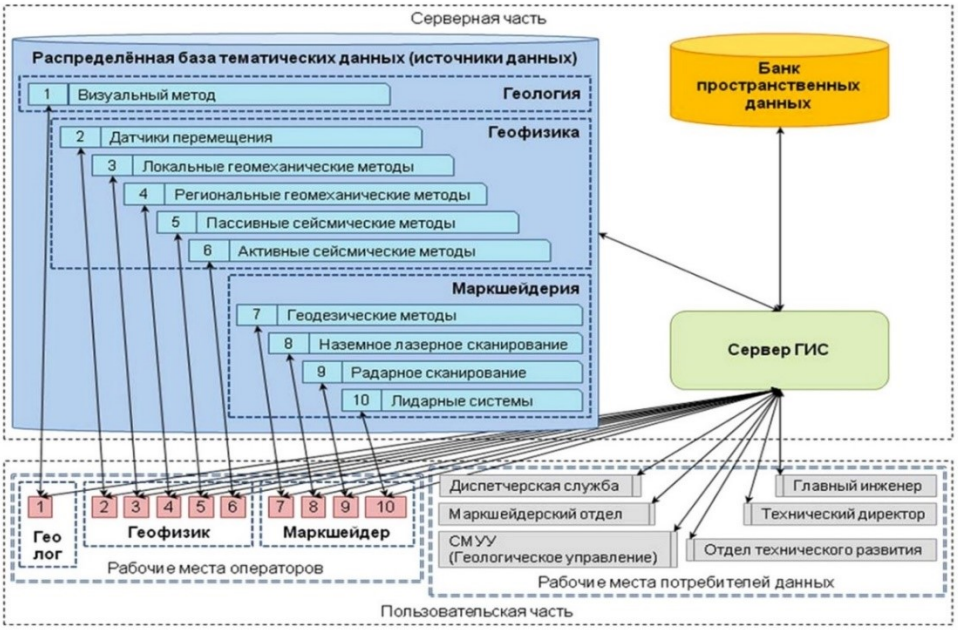


Рис. 2.63. Структурная схема организации системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия

Это полнофункциональная профессиональная ГИС, имеющая в своём составе:

— сервер ГИС, обеспечивающий доступ клиентов к пространственным данным;

— средства подготовки пространственных данных;

— средства разработки приложений;

— сервер приложений;

— средства построения Web-портала для удаленной работы.

С точки зрения возможностей расширения функционала и адаптации к условиям горнодобывающего предприятия наилучшим выбором представляется платформа ГГИС Mineframe [82–84], разработанная специалистами Горного института КНЦ РАН. Тесный контакт с разработчиками обеспечит оперативное внедрение необходимых расширений и внесение необходимых изменений в ядро платформы для наиболее точного и наглядного отображения информации. Кроме того, разработчикам хорошо знакомы горно-геологические условия Кольского полуострова и климатические особенности Крайнего Севера.

Программные средства ГГИС обеспечивают коллективный контролируемый доступ к базам данных объектов горной технологии, что позволяет формировать единое информационное пространство предприятия. Хранение информации, поступающей в ГГИС от источников данных единой наблюдательной сети мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия, предусматривает наличие средств доступа к базам данных геологических, геофизических и маркшейдерских наблюдений. К создаваемым объектам можно прикрепить произвольный набор как первичных документов (журналы наблюдений, акты и протоколы, фиксирующие опасные события), так и документированные результаты их обработки (интерпретация съемок и профилирование, выделение потенциально опасных зон, отчеты об исследованиях и пр.). Периодичность наблюдений, поступление новых данных об их состоянии и сопряженное с этим обновление соответствующих им моделей ГГИС в реальном времени позволяют

создавать цифровые двойники объектов мониторинга, являющиеся составной часть цифрового горного предприятия.

Подсистема мониторинга потенциально опасных объектов, являясь частью системы планирования и инженерного обеспечения ведения горных работ, входящей в ГГИС, должна содержать:

— средства мониторинга вовлеченного в отработку массива горных пород, подземных горных выработок и целиков, уступов и в целом бортов карьера, усреднительных и накопительных рудных складов, отвалов вскрышных пород, хвостохранилищ, зданий и сооружений;

— БД объектов мониторинга, сохраняющей данные об их состоянии на всех этапах жизненного цикла горного предприятия;

— средства моделирования и визуализации объектов мониторинга с использованием ассоциированной с ними информации;

— средства анализа данных о состоянии объектов мониторинга для формирования управляющих воздействий как реакции на критические события на таких объектах;

— связь с инструментами проектирования и планирования горных работ для обеспечения их актуализированной информацией о состоянии объектов мониторинга.

2.5.1. Развитие баз данных мониторинга геомеханического состояния объектов открытой геотехнологии и разработка прообраза программного интерфейса обмена данными между компонентами комплексной системы мониторинга геологической среды ГТС

Последовательность формирования комплексной БД объектов открытой геотехнологии с использованием цифрового подхода

Для реализации макетного варианта системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия на базе ГГИС Mineframe была сформирована БД Kovdor. Для ее создания потребовалось выполнить обновление структуры БД с объектами Ковдорского ГОКа, после чего проанализировать и оценить актуальность имеющихся в них объектов.

В проект были загружены космоснимки объектов и после сопоставления они были наложены на объекты для придания им реалистичного вида (рис. 2.64).

В результате была сформирована БД Kovdor, содержащая в себе четыре группы объектов: горный отвод, земельный отвод, хвостовое хозяйство, наблюдательные станции (рис. 2.65).

Группа «Горный отвод» содержит в себе три объекта и две группы объектов.

1. АШР (карьер по добыче апатит-штаффелитовых руд).
2. Карьер «Железный».
3. Техногенное месторождение.
4. Группа объектов «Уступы»:
   4.1 уступ +94;
   4.2 уступ +55.
5. Группа объектов «Группы уступов»:
   5.1 юг, юго-запад;
   5.2 север, северо-восток;
   5.3 восток, юго-восток;
   5.4 северо-запад.

В группе «Горный отвод» объект «Техногенное месторождение» представляет собой двухмерный объект, остальные объекты, содержащиеся в данной группе, являются трехмерными.

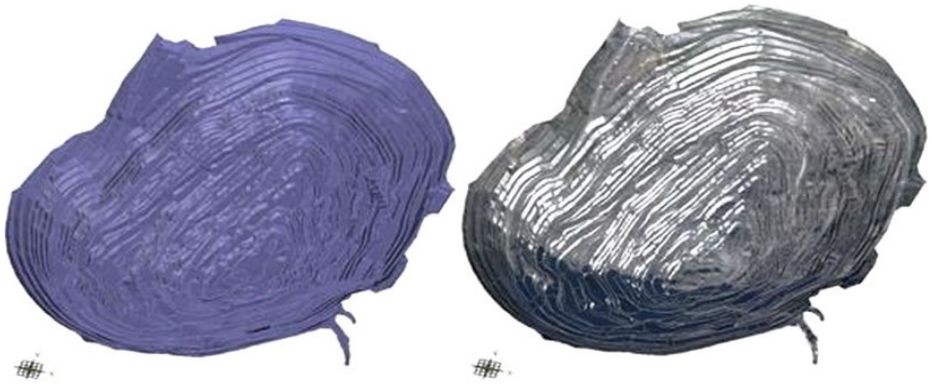


Рис. 2.64. Карьер «Железный»: слева — карьер без текстур; справа — карьер с текстурами

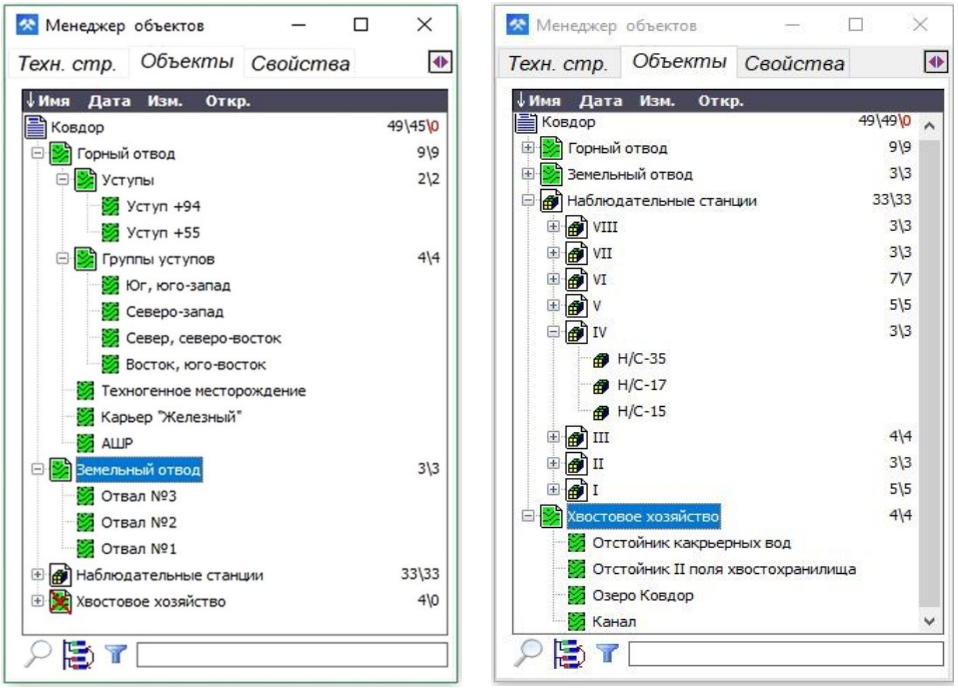


Рис. 2.65. Объекты БД Kovdor

Пример источника тематических данных

В качестве примера источника тематических данных (рис. 2.63) для включения в систему предложена БД изученности напряженно-деформированного состояния, сформированная по результатам многолетних натурных измерений на наблюдательных станциях методом разгрузки [58] и обновляемая по мере развития карьера и формирования заоткоски. Данные исследования выполняются при участии финских специалистов в рамках проекта HazArctic, одной из основных задач которого, являются исследования в области устойчивости бортов карьеров.

Для этого на объекте «Карьер “Железный”» были выделены четыре группы уступов (юг, юго-запад; север, северо-восток; восток, юго-восток; северо-запад),

после чего каждая группа была оконтурена и помещена в отдельный объект. Далее для каждого объекта были созданы и наложены текстуры, которые отображают напряженно-деформированное состояние на выделенных участках карьера (рис. 2.66).

Помимо групп уступов, в карьере «Железный» были оконтурены и вынесены в отдельные объекты два уступа «Уступ +94» и «Уступ +55».

Группа «Земельный отвод» содержит в себе три объекта: отвалы № 1–3. Все отвалы представлены в виде трехмерных моделей.

Группа «Наблюдательные станции» содержит в себе восемь подгрупп, каждая подгруппа соответствует расчетному участку в табл. разгрузки и содержит в себе наблюдательные станции, относящиеся к соответствующему расчетному участку. Наблюдательные станции представлены в виде трехмерных конусов, привязанных к поверхности карьера (рис. 2.67).

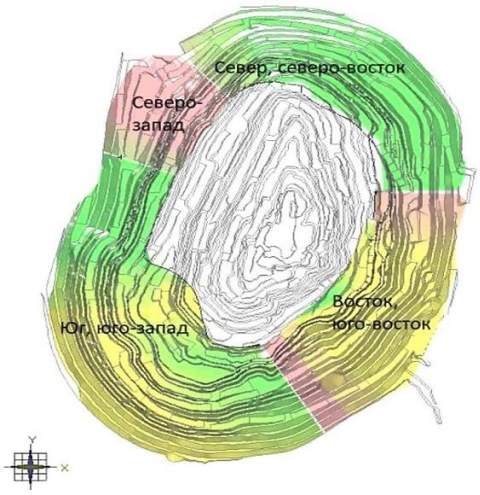


Рис. 2.66. Группы уступов карьера «Железный»



Рис. 2.67. Наблюдательные станции карьера «Железный»

Для быстрого отображения информации о методах мониторинга уступов, групп уступов и борта карьера к объектам БД были прикреплены документы с описанием методов мониторинга соответствующих объектов.

К объекту «Карьер «Железный»» были прикреплены девять файлов (источники тематических данных на рис. 2.63):

1) БД измерений методом разгрузки;
2) мониторинг с использованием беспилотных летательных аппаратов);
3) мониторинг с использованием датчиков перемещения);
4) данные микросейсмического мониторинга;
5) данные радарного сканирования;
6) данные измерений методами классической геодезии;
7) спутниковые оптические снимки;
8) спутниковые радарные снимки;
9) численные методы мониторинга.

К объектам «Юг, юго-запад», «Север, северо-восток», «Восток, юго-восток», «Северо-запад» прикреплены семь файлов, шесть из которых описывают методы мониторинга групп уступов карьера «Железный», а именно:

1) GPS-геодезия;

2) датчики перемещения (описание мониторинга с использованием датчиков перемещения);

3) МСТ (межскважинная сейсмическая томография);

4) НЛС (наземное лазерное сканирование);

5) сейсмический мониторинг массовых взрывов;

6) численные методы мониторинга.

Помимо файлов с описанием методов, был прикреплен файл с таблицей разгрузки, содержащий в себе данные по расчетным участкам, попавшим в выделенную область.

Объект «Север, северо-восток» содержит данные по I, II и III расчетным участкам, объект «Восток, юго-восток» содержит данные по III, IV и V расчетным участкам, объект «Юг, юго-запад» содержит данные по V, VI, VII и VIII расчетным участкам, объект «Северо-запад» содержит данные по I и VIII расчетным участкам.

К объектам «Уступ +55» и «Уступ +94» прикреплены шесть файлов, описывающих методы мониторинга уступов на карьере «Железный»:

1) визуальный метод;

2) МР (метод разгрузки);

3) МСТ (межскважинная сейсмическая томография);

4) нивелирование;

5) ТКС (телевизионный контроль скважин);

6) ультразвуковой метод.

Любой прикрепленный файл можно открыть, воспользовавшись списком документов данного объекта (рис. 2.68)

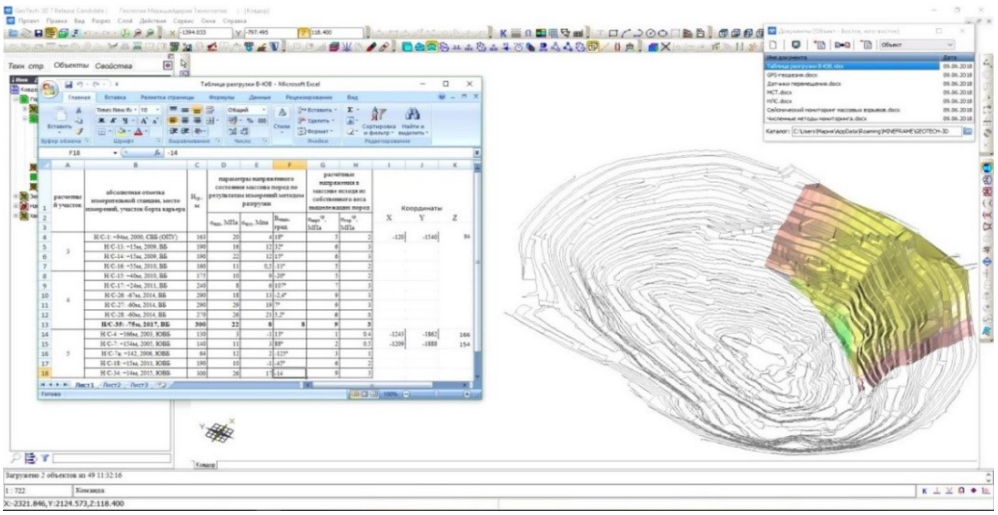


Рис. 2.68. Список документов и прикрепленный файл объекта «Восток, Юго-восток»

Списки документов объектов в дальнейшем могут быть пополнены любыми файлами.

БД Kovdor демонстрирует расположение в пространстве объектов Ковдорского ГОКа, местонахождение наблюдательных станций на трехмерной модели карьера, области НДС массива пород в борту карьера.

Данная БД в дальнейшем может пополняться объектами, отображающими параметры регистрации данных микросейсмического мониторинга, геодезии и другими объектами [85].

Разработка программного интерфейса обмена данными между компонентами комплексной системы геомеханического мониторинга геологической среды ГТС

Система геофизического контроля шахтных полей рудников на основе унифицированного интерфейса обмена данными между компонентами

Одним из непременных условий эффективного и безопасного производства горных работ является наличие у персонала горнодобывающего предприятия как можно более полных данных о геомеханическом состоянии породного массива. Геомеханическое состояние — это совокупность показателей, характеризующих деформируемость, прочность и устойчивость массива при определенном силовом воздействии, т. е. характеризующих уровень развития геомеханических процессов деформирования, перераспределения напряжений и разрушения. Определение геомеханического состояния породного массива базируется на комплексном использовании и анализе натурных наблюдений с одновременным привлечением методов моделирования и аналитических исследований на базе теоретических положений из основных разделов механики, математических и физических аналогий.

Подлежащая обработке геофизическая информация о породных массивах по форме представления достаточно однородна: это привязанные к месту — области трехмерного пространства — и времени поля и точечные данные. Однако тематически она разнородна по сути, что отражается в специфических и сильно различающихся внутренних форматах хранения. Необходимость комплексной интерпретации различных аспектов описания состояния породных массивов требует использования эффективных методов получения информации от разнообразных источников тематической информации в форме, обеспечивающей их совместное использование.

Система геофизического контроля шахтных полей рудников состоит из главной подсистемы комплексной обработки геофизических данных и ряда источников тематических данных (рис. 2.69).

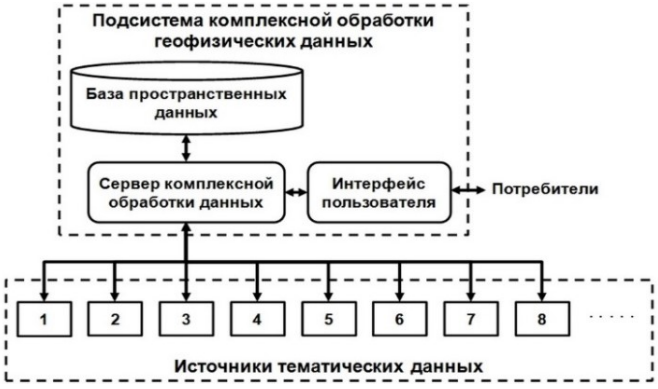


Рис. 2.69. Схема системы геофизического контроля шахтных полей рудников

Подсистема комплексной обработки данных включает в себя базу пространственных данных, сервер комплексной обработки данных и пользовательский интерфейс рабочих мест потребителей данных.

Потребителями данных являются все руководители и службы горного предприятия, отвечающие за планирование, организацию и безопасность ведения горных работ: главный инженер, технический директор, отдел технического развития, маркшейдерский отдел, диспетчерская служба, служба мониторинга состояния.

База пространственных данных содержит карты местности, данные о рельефе и трехмерные модели расположенных на местности зданий, сооружений и других объектов, подверженных влиянию проводимых горных работ.

Сервер комплексной обработки геофизических данных выполняет допустимый перечень запросов потребителя, на основании которых запрашивает данные у тематических источников, сопоставляет их и выдает результат обработки потребителю. Варианты обработки: совместная визуализация исходных данных, статистическая обработка с отображением результатов, выдача результатов работы экспертной системы с набором тематических данных.

Представляется целесообразным разрабатывать систему на платформе имеющейся ГИС, что позволит использовать имеющуюся базу пространственных данных. В силу специфики именно геофизических данных, это должна быть ГИС с полноценной поддержкой работы с тремя измерениями. В универсальных ГИС поддержка трехмерности ограничивается возможностью отображения трехмерных объектов на плоских картах, поэтому необходима специализированная ГГИС.

Источники тематических данных

Источники тематических данных, несмотря на существенные различия в характере данных и технической реализации, в самом общем виде имеют схожую структуру (рис. 2.70). Данные, с которыми работает источник, можно разделить на две категории. Тематические данные, которые являются основным содержанием, хранятся локально в собственной БД. Данные конфигурации, необходимые для работы источника, в свою очередь, также подразделяются на локальные, необходимые только данному источнику, и глобальные — общие для нескольких тематических источников. Локальные данные конфигурации хранятся в локальной БД. Для хранения глобальных данных конфигурации представляется логичным создать отдельный источник тематических данных.

Интерфейс ввода данных зависит от характера заносимой в базу информации и может включать в себя:

— приложение для ручного ввода данных оператором;

— управляемый оператором автоматизированный программно-аппаратный измерительный комплекс;

— полностью автоматический измерительный комплекс в совокупности с программной службой, обеспечивающей считывание данных с аппаратуры и запись их в базу.

Блок предварительной обработки данных обеспечивает контроль достоверности поступающих данных и их упаковку в формат тематической БД.

Блок анализа и преобразования данных представляют собой набор приложений, обеспечивающих обработку тематических данных, возможную вне связи с другими тематическими данными. Например, применительно к данным о наклонах

и деформациях это может быть определение направления и скорости перемещения/вращения блоков породы. Результат работы блока предоставляется потребителям данных.

На рис. 2.70 *а* приведена структура автономного источника тематических данных. Такой источник имеет два существенных недостатка:

— используемые источником конфигурационные данные могут быть не согласованы с конфигурационными данными других источников;

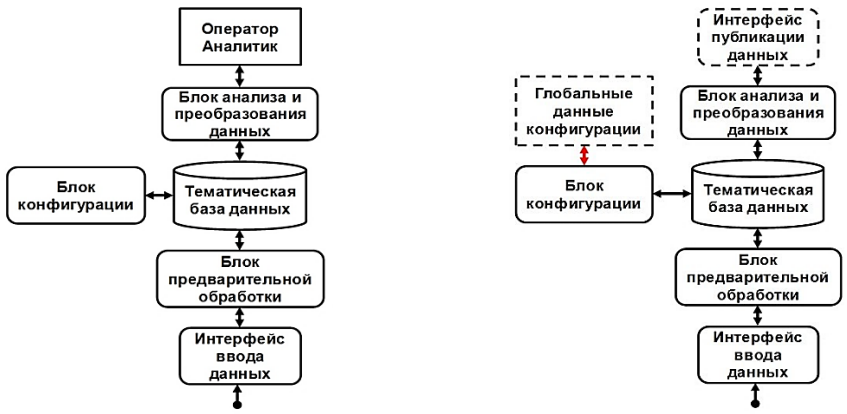
— анализ возможен только на основе данных, хранящихся в БД самого источника; при необходимости сопоставления с данными других источников необходимую информацию требуется импортировать.

Для включения источника тематических данных в состав системы комплексной обработки необходимо обеспечить:

— получение конфигурационных данных, в том числе из глобального источника — подсистемы комплексной обработки геофизических данных;

— интерфейс публикации данных в виде, непосредственно пригодном для цифровой обработки внешними потребителями.

Структура такого доработанного источника представлена на рис. 2.70.



а *б*

Рис. 2.70. Обобщенная структура источников тематических данных: *а* — автономный источник; *б* — источник в составе комплексной системы

Интерфейс публикации данных представляет собой программную надстройку над БД, обеспечивающую связь с подсистемой комплексной обработки геофизических данных. Он разрабатывается для каждого источника отдельно, исходя из особенностей вида наблюдений, структуры и способа хранения собираемой информации.

Основная сложность обеспечения доступа к информации, которая поставляется источниками тематических данных и/или системами накопления и анализа информации — хранение данных на различных узлах локальной (а возможно, и глобальной) сети и в различных форматах. При разработке приложений для анализа данных большой объем работы придется на написание процедур получения данных из множества источников, сведений о расположении которых, также необходимо прописывать в настройках приложения.

Команды разработчиков, имеющие большой опыт работы с распределенными базами данных (такие, как Open Geospatial Consortium), знают и используют два эффективных решения, позволяющих минимизировать трудозатраты.

Во-первых, используется первичная точка доступа — специализированная БД, где хранится перечень используемых источников данных. В этой же базе может храниться информация, общая для нескольких источников данных, например, каталог горных объектов и привязанных к ним систем координат. С точки зрения архитектуры она является одним из источников тематических данных. Ее отличие от других источников в том, что сетевое расположение такого «нулевого» источника заранее известно всем участникам обмена данными. Как вариант, необходимую информацию можно разместить в базе пространственных данных ГГИС, если система допускает такую возможность.

Второе решение — организация унифицированного интерфейса межпрограммного обмена данными. При таком подходе каждый источник данных принимает запросы от клиентского приложения и передает данные в едином формате одним способом, что существенно упрощает разработку клиентских приложений. Унифицированный интерфейс используется для обращения в том числе и к первичной точке доступа.

Такой подход требует существенных доработок тематических источников данных в части интерфейса публикации. В зависимости от выбранной реализации потребуется либо добавить в базы данных ряд специальных хранимых процедур и представлений, либо запустить рядом с каждым хранилищем специальное серверное приложение, выполняющее обработку внешних запросов и преобразование данных, либо то и другое. Но итогом этих доработок станет существенное упрощение процесса создания клиентских приложений.

В системе комплексной обработки геофизических данных первый метод используется для организации доступа к глобальным конфигурационным данным. Второй метод применяется для получения информации от различных источников тематических данных.

Основной вопрос унификации — стандартизация. Все участники (как держатели, так и потребители информации) должны выработать свой либо принять уже готовый стандарт межпрограммного обмена.

Стандартизации подлежат:

— транспортный протокол, по которому будут передаваться данные;

— базовый формат транспортного представления данных;

— перечень обязательных к поддержке клиентских запросов с детальным описанием структуры данных запроса и ответа;

— идентификация типов данных, поставляемых источниками.

Также необходимо стандартизировать идентификаторы объектов, описанных в глобальных общих справочниках.

Использование автоматически генерируемых СУБД внутренних идентификаторов нежелательно, поскольку механизмы контроля целостности данных в распределенной БД, состоящей из множества тематических баз данных, имеющих различное сетевое расположение и базирующихся на различных платформах СУБД, в общем случае не реализуемы.

Разработка компонентов и построение распределенной базы состоит из следующих этапов:

— разработка или принятие (с возможной адаптацией) готового стандарта интерфейса;

— разработка или адаптация серверных компонентов — хранимых процедур, представлений, библиотек для включения в сервер интерфейса;

— разработка или адаптация библиотек, включаемых в клиентское приложение;

— сборка серверной и клиентской частей.

Второй и третий пункты представляют собой значительный объем работы, к тому же с большой вероятностью, ориентированной на поддержку нескольких программных платформ. Поэтому необходима командная работа. То есть важна заинтересованность всех участников — как держателей, так и потребителей информации.

Выбор между принятием готового стандарта и разработкой собственного.

Готовый стандарт

Преимущества:

— нулевые затраты на разработку собственно стандарта;

— применение готового стандарта обеспечивает совместимость с готовыми и разрабатываемыми приложениями других разработчиков; если стандарт применяется широко (например, OGC Web Feature Services), то число таких приложений достаточно велико;

— наличие готовых наработок в виде программных библиотек, реализующих стандарт.

Недостатки:

— широко применяемый готовый стандарт избыточен в силу своей универсальности;

— как бы стандарт ни был универсален, есть вероятность выявить его несовместимость с выдвинутыми требованиями;

— детальное изучение стандарта может потребовать значительного времени;

— готовые библиотеки с большой вероятностью все равно придется адаптировать к используемой среде разработки и исполнения.

Разработка собственного стандарта

Преимущества:

— заведомо соответствует всем предъявляемым требованиям;

— неизбыточен за счет отказа от излишней универсальности;

— не требует больших затрат на изучение, поскольку применяется самими разработчиками стандарта.

Недостатки:

— требует времени, возможно, значительного, на разработку стандарта;

— требует значительного времени на разработку с нуля необходимых программных библиотек;

— не обеспечивает совместимости с готовыми и разрабатываемыми приложениями других разработчиков.

Определение состава глобальных общих справочников

Анализ структуры разрабатываемых баз данных выявил четыре категории объектов, претендующие на включение в состав глобальной базы, помимо перечня источников данных.

Все исходные данные и результаты измерений имеют привязку к времени и месту. Время достаточно легко приводится к выбранному в качестве стандарта часовому поясу, а с местом сложнее. Как правило, в исходных данных координаты точек привязки указаны в локальной рудничной системе координат. Поэтому для сопоставления данных на больших пространствах и для отображения информации в ГИС требуется перевод в региональную систему координат.

Таким образом, общая информация должна включать в себя иерархию горных объектов (регион – горный массив – месторождение – горизонт – выработка) и иерархию связанных с горными объектами систем координат (региональные – рудничные). Эта информация не зависит от характера данных, хранимых в тематических базах, и поэтому может быть без больших дополнительных затрат вынесена в глобальные справочники.

Еще одну категорию информации, общей для большинства (если не для всех) тематических баз данных, представляют сведения о расположении точек получения исходных данных. Это координаты измерительных станций (точек, где пробурены наблюдаемые скважины, взяты пробы пород либо установлены измерительные приборы) и скважин как относящихся к измерительным станциям, так и пробуренных отдельно.

Также существует категория наиболее общих справочных данных. К ней относится перечень типов горных пород (литотипов).

При проектировании тематических источников данных были рассмотрены стандарты представления и публикации данных, разработанные международным сообществом Open Ceospatial Consortium. Это большой пакет стандартов, включающий в себя языки описания Geography Markup Language, Geoscience Markup Language и Sensor Model Language. Входящие в пакет стандарты применяются достаточно широко и постоянно совершенствуются. В части обмена данными базовым стандартом является OGC Web Feature Services [86], включающий в себя поддержку Simple Object Access Protocol (SOAP, разработка сообщества World Wide Web Consortium).

Транспортный протокол: HTTP/HTTPS

Запрос клиента может быть передан в двух видах:

— запрос GET с передачей параметров в строке URL в соответствии со стандартом CGI;

— запрос POST с передачей параметров в теле запроса в одном из двух возможных форматов: строка параметров в соответствии со стандартом CGI либо документ XML.

Ответ сервера на запрос клиента представляет собой документ в формате XML.

Поскольку стандарт постоянно развивается, одновременно применяются реализации различных версий, не полностью совместимые между собой. Поэтому стандарт включает описания механизма идентификации используемой версии стандарта и разрешения конфликтов.

Преимущества:

— применение обеспечивает совместимость с готовыми и разрабатываемыми приложениями других разработчиков, причем число таких приложений достаточно велико;

— наличие готовых наработок в виде программных библиотек, реализующих стандарт.

Недостатки:

— стандарт избыточен в силу своей универсальности;

— есть вероятность выявить несовместимость стандарта с выдвинутыми требованиями;

— в силу универсальности и объемности детальное изучение стандарта потребует значительного времени;

— готовые библиотеки придется адаптировать к используемой среде разработки и исполнения.

Формат обмена данными собственной разработки [87] впервые применен в рамках работ по обустройству геодинамического полигона на объединенном Кировском руднике АО «Апатит». Первоначально он использовался как средство обмена данными между веб-интерфейсом настройки и управления и серверной частью системы сбора данных. С учетом опыта применения формат был пересмотрен и использован при реализации интерфейса публикации данных. Таким образом, геодинамический полигон уже на данный момент представляет собой готовый к использованию источник тематических данных.

Транспортный протокол: HTTP/HTTPS

Запрос клиента передается в виде документа XML в теле запроса POST.

Ответ сервера на запрос клиента представляет собой документ в формате XML.

Особенности:

— стандарт предусматривает не только чтение данных из базы-источника, но и запись данных, а также передачу управляющих воздействий;

— серверная часть представляет собой расширение веб-сервера acWeb и реализована на языке SP-Forth с дополнительными расширениями;

— клиентская часть представляет собой библиотеку JavaScript, выполняющуюся в среде веб-браузера.

Преимущества:

— заведомо соответствует всем предъявляемым требованиям;

— полная свобода расширения при расширении требований;

— неизбыточен за счет отказа от излишней универсальности;

— не требует больших затрат на изучение;

— наличие готовых наработок в виде программных библиотек, реализующих стандарт.

Недостатки:

— не обеспечивает совместимости с готовыми и разрабатываемыми приложениями других разработчиков;

— в силу ограниченного числа поддерживаемых платформ, требует значительного времени для портирования на другие платформы разработки и исполнения.

В настоящее время выполняется разработка тематических источников данных применительно к натурным наблюдениям на горнорудных объектах, а именно:

— данные геофизического мониторинга;

— контроль наклонов и деформаций;

— анализ керна;

— контроль разрушения скважин;

— ультразвуковое прозвучивание и профилирование;

— данные о сейсмической активности: пассивное наблюдение и активные воздействия (взрывы);

— результаты определения физико-механических свойств горных пород.

Таким образом, основные результаты, полученные в главе 2 в направлении инструментальной диагностики опасных зон в геологической среде ГТС и развитие системы геодинамического мониторинга, можно сформулировать следующим образом:

— предложен комплекс методов и технических средств выявления зон локальных нарушений устойчивости, который позволяет выполнять первичную диагностику геомеханического состояния горных пород, ориентируясь на геологические признаки;

— опыт проведения работ по мониторингу устойчивости борта крупного рудного карьера свидетельствует о том, что комплексная система мониторинга устойчивости бортов карьера, имеющая в своем составе в качестве важнейшего элемента интерферометрические радарные системы, является наиболее эффективным средством локального мониторинга устойчивости на сегодняшний день. С использованием радаров устойчивости бортов карьеров выявлены закономерности развития процесса деформирования и разрушения прибортового массива скальных пород Ковдорского месторождения, определены критические значения скорости смещения. Показано, что значение критической скорости 3 мм/ч является достоверным, однако при настройке системы оповещения целесообразнее выставлять критическую скорость смещения массива — 2 мм/ч. Это позволит раньше предупредить оператора об опасности и даст больше времени на эвакуацию рабочего персонала;

— полученные данные позволяют сделать вывод о том, что геомеханическая ситуация в пределах карьера «Железный» на настоящее время остается достаточно стабильной и эксплуатация карьера может осуществляться в штатном режиме при условии постоянного мониторинга устойчивости борта карьера. В то же время результаты натурных геофизических исследований и аналитических оценок свидетельствуют о наличии в законтурном массиве пород карьера «Железный» участков, находящихся в предельном состоянии, которые требуют особого внимания в плане геомеханического контроля и разработки мер обеспечения безопасности при ведении горных работ;

— разработаны методические основы комплексной системы геомеханического мониторинга геологической среды ГТС. Показано, что оценка устойчивости бортов карьеров, выполненная в объемной постановке, может более точно учитывать особенности прибортового массива при качественном наполнении модели исходными данными, позволяет более достоверно определить проблемные участки борта с точки зрения устойчивости. Решение объемных задач позволяет

более детально анализировать имеющийся участок с точки зрения наличия в нем различных структурных неоднородностей. Выполнение оценок устойчивости в объемной постановке в увязке с обоснованной структурой системы мониторинга позволяет контролировать устойчивость элементов подземной геотехнологии, добиваясь повышения безопасности работы предприятия;

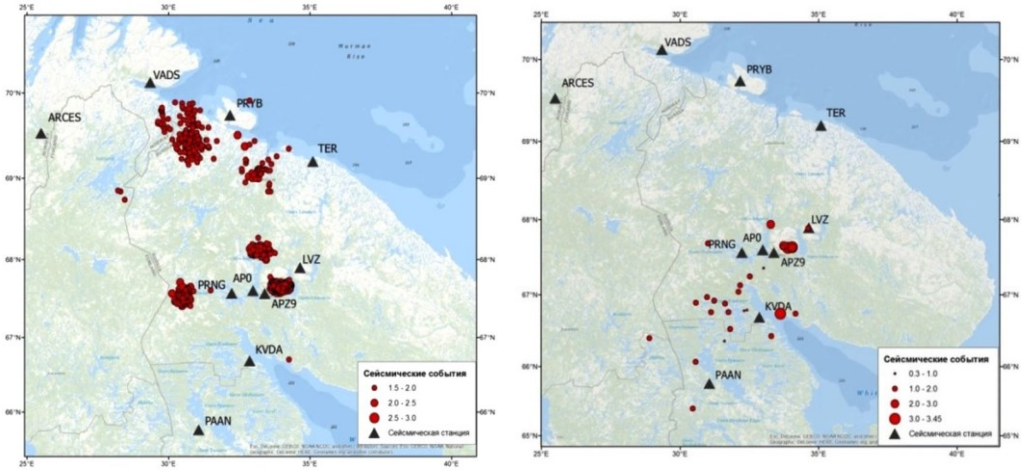
— получен опыт формирования и эксплуатации стационарных геодезических полигонов, с помощью которых возможно контролировать опасные промышленные объекты, расположенные в зоне влияния выявленных крупных геологических неоднородностей. Измерения деформирования массива пород в пределах таких полигонов могут выполняться как с использованием стационарных наклономерно-деформационных комплексов, так и с помощью геодезических методов высокого класса точности. Методика организации таких полигонов требует дальнейшего совершенствования и развития.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ, ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ, ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ГЕОМЕХАНИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

3.1. Исследование сейсмичности геологической среды природно-технических систем Кольского региона

Кольский филиал Единой геофизической службы РАН (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) проводит непрерывный мониторинг сейсмичности на территории Кольского полуострова и прилегающей акватории сетью сейсмических станций, 7 из которых станции КоФ ФИЦ ЕГС РАН (AP0, APZ9, TER, PRYB, PRNG, KVDA, PAAN), 2 станции норвежские (VADS, ARCES).

По результатам мониторинга сейсмической активности сетью станций КоФ ФИЦ ЕГС РАН на территории Мурманской области в 2019 г. зарегистрировано 8260 сейсмических событий с магнитудами ML от 0,3 до 3,45. Подавляющее большинство зарегистрированных сейсмических событий являются промышленными и технологическими взрывами, проводимыми на карьерах и рудниках горнодобывающих предприятий Мурманской области, а также дорожными взрывами (рис. 3.1 *а*) и только 26 классифицированы как природные и природно-техногенные землетрясения с ML от 0,3 до 3,45 (рис. 3.1 *б*).



а *б*

Рис. 3.1. Эпицентры сейсмических событий, 2019 г.: *а* — техногенные; *б* — природные и природно-техногенные

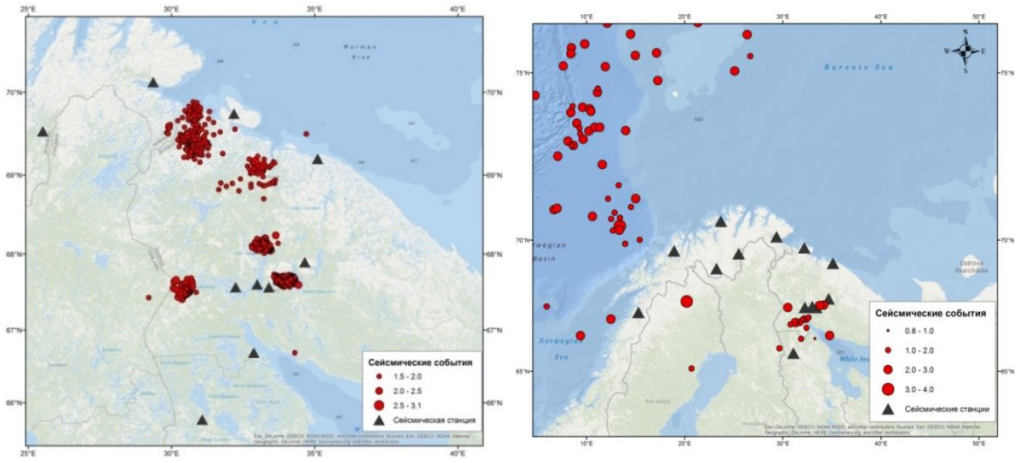
Из числа природных и природно-техногенных землетрясений к ощутимым и потенциально опасным для населения и инфраструктуры можно отнести следующие три события:

— 15.03.2019 г. в 18:28:43 (мск) в Хибинском горном массиве, в пределах Коашвинского месторождения, отрабатываемого КФ АО «Апатит» (по данным сети КоФ ФИЦ ЕГС РАН ML = 3,0). Событие классифицировано как природно-техногенное землетрясение ввиду того, что его очаг располагался в пределах геодинамически активной зоны, прилегающей к району повышенной техногенной нагрузки. Событие ощущалось в г. Кировск с интенсивностью колебаний до 4 баллов по шкале MSK-64;

— 10.06.2019 г. в 12:05:20 (мск) в Хибинском горном массиве, в пределах карьера «Центральный» КФ АО «Апатит» (по данным сети КоФ ФИЦ ЕГС РАН ML = 3,45). Событие классифицировано как природно-техногенное землетрясение интенсивностью до 4 баллов, ощущалось на промплощадке КФ АО «Апатит»;

— 05.11.2019 г. в 20:31:58 (мск) на северном берегу Кандалакшского залива, примерно 30 км к западу от пос. Умба (по данным сети КоФ ФИЦ ЕГС РАН ML = 3,3). Сейсмическое событие классифицировано как природное землетрясение. Землетрясение ощущалось жителями пос. Умба с интенсивностью до 4 баллов по шкале MSK-64.

В 2020 г. зарегистрировано 8260 сейсмических событий с магнитудами ML от 1,5 до 4. Из общего числа зарегистрированных сейсмических событий за отчетный период на территории Мурманской области 18 классифицированы как природные и природно-техногенные землетрясения с магнитудами ML от 0,8 до 3. На рис. 3.2 показаны эпицентры природных и природно-техногенных землетрясений.

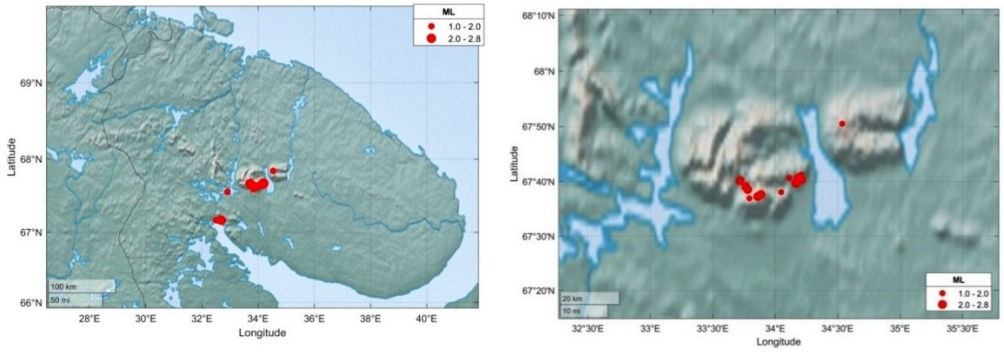


а *б*

Рис. 3.2. Эпицентры сейсмических событий, в 2020 г.: *а* — техногенные в Мурманской области и Фенноскандии; *б* — природные и природно-техногенные в акватории Баренцева и Норвежского морей

В 2021 г. (по данным на 30 сентября 2021 г.) на территории Мурманской области зарегистрировано 19 землетрясений с магнитудами ML от 1 до 2,8 (рис. 3.3 *а*),

из них 14 землетрясений — на территории Хибинско-Ловозерской ПТС, ML от 1 до 2,8 (рис. 3.3 *б*). Кроме того, зарегистрировано 6447 промышленных взрывов с магнитудами ML 1,5 и выше, проводимых на горнодобывающих предприятиях и строительных объектах Мурманской области и северных районов Карелии, Финляндии, Норвегии и Швеции.



а *б*

Рис. 3.3. Сейсмособытия с магнитудами ML от 1 до 2,8, зарегистрированные станциями КоФ ФИЦ ЕГС РАН: *а* — в Мурманской области; *б* — в Хибинско-Ловозерской ПТС

Исследование выполнено с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга Арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/, http://www.gsras.ru/unu/).

3.2. Выявление особенностей сейсмической активности рудников Хибинского массива

Исследования, направленные на выявление особенностей и закономерностей развития сейсмического процесса при ведении горных работ проводятся многими учеными России и мира. Несмотря на выявленные ранее закономерности изменения сейсмической активности такие исследования остаются актуальными, поскольку каждое месторождение является уникальным объектом, на котором сейсмичность проявляется под влиянием тех или иных факторов.

Очевидно, что сейсмический процесс при отработке подземных рудников и при отработке карьеров развивается по-разному. Кроме того, существенные различия могут быть и при отработке месторождений подземным способом, например, в связи с отработкой от центра к флангам или встречными фронтами.

Исследование сейсмической активности проводилось на месторождениях, отрабатываемых Кировским и Расвумчоррским рудниками. Исходными данными являлись результаты сейсмического мониторинга по данным Автоматизированных

систем контроля состояния массива Кировского (АСКСМ-К) и Расвумчоррского (АСКСМ-Р) рудников КФ АО «Апатит».

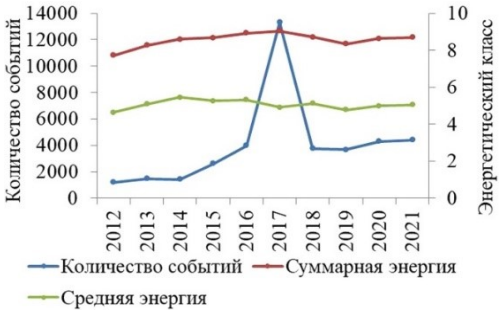
Сейсмологические каталоги содержат информацию о сейсмических событиях, происходящих в зоне контроля АСКСМ-К и АСКСМ-Р. Регистрация событий в зоне уверенной регистрации обеспечена с погрешностью не более 100 м (представительная энергия события от 1000 Дж), в районах повышенной точности — с погрешностью не более 25 м (представительная энергия события — от 1000 Дж).

Кукисвумчоррское месторождение

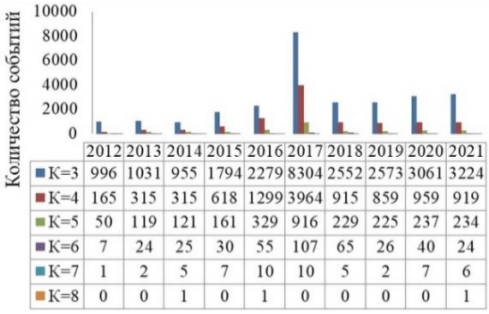
Подсистема АСКСМ-К контролирует Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения, в том числе район Саамского разлома. Исследования проводились для сейсмических событий, зарегистрированных в зоне уверенной регистрации АСКСМ-К (от Р2+16 до Р35+36).

Из представленного графика (рис. 3.4 *а*) видно, что наблюдается постепенный рост значений суммарной и средней выделившейся энергии. Увеличение числа сейсмических событий и суммарного энерговыделения в 2015–2016 гг. связано с развитием горных работ в блоке 7–10. Резкое увеличение числа сейсмических событий в 2017 г. отражает формирование трещин отрыва в консольной части необрушенных пород висячего бока. Причем, как следует из рис. 3.4 *б*, наблюдается увеличение числа сейсмособытий всех энергетических классов. Процесс интенсивного трещинообразования в консоли начался в апреле 2017 г. (рис. 3.5), максимальное число событий наблюдается в мае, а в сентябре произошел спад, что свидетельствует о завершении формирования магистрального разрыва. Максимальное значение суммарной выделившейся энергии также наблюдается в мае 2017 г. На космоснимках (рис. 3.6) показано распределение событий энергетического класса $K \geq 5$, видно, что эпицентры приурочены к зоне формирования разрыва.

Отметим, что в течение 2017 г. на Кукисвумчоррском месторождении зарегистрировано 168 сейсмических событий энергетического класса $K \geq 6$. В 2018 и 2019 гг. наблюдается снижение числа сейсмических событий энергетического класса $K \geq 6$. А в 2020 г. наблюдается рост сейсмической активности, который в основном связан с отработкой блока 4/7. Сейсмическая активность в 2021 г. находится примерно на уровне 2013–2014 гг.



а



	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
K=3	996	1031	955	1794	2279	8304	2552	2573	3061	3224
K=4	165	315	315	618	1299	3964	915	859	959	919
K=5	50	119	121	161	329	916	229	225	237	234
K=6	7	24	25	30	55	107	65	26	40	24
K=7	1	2	5	7	10	10	5	2	7	6
K=8	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1

б

Рис. 3.4. Ежегодное распределение числа событий и выделившейся сейсмической энергии (*а*) и сейсмособытий по энергетическим классам (*б*)

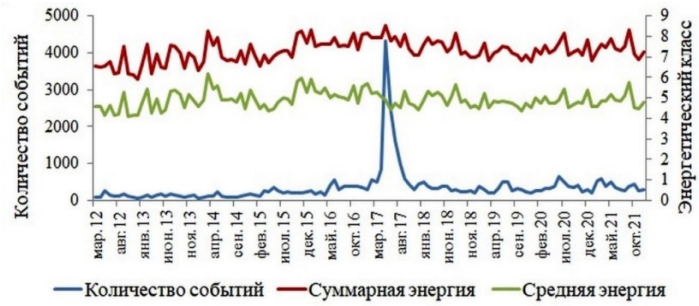
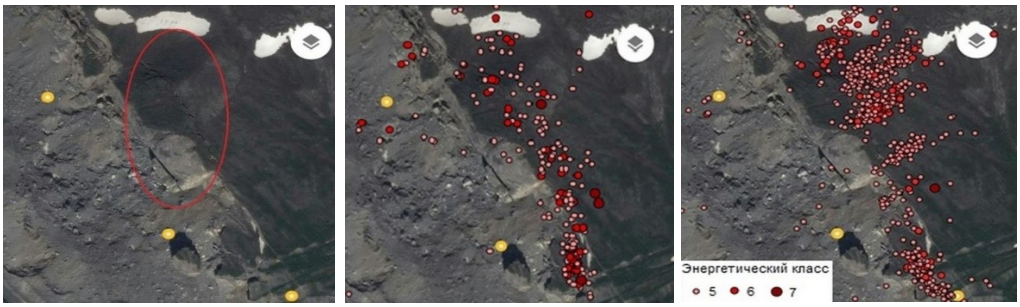


Рис. 3.5. Ежемесячное распределение числа сейсмособытий и выделившейся сейсмической энергии



а *б* *в*

Рис. 3.6. Формирование магистрального разрыва: *а* — овалом показан разрыв; *б* — сейсмичность с января по апрель 2017 г.; *в* — сейсмичность с мая по сентябрь 2017 г.

Основные участки сейсмической активности на Кукисвумчоррском месторождении в 2019–2021гг.:

— блок 4/7. Активизация сейсмичности отмечается с июня 2019 г. и связана с интенсивным ведением горных работ, а также не исключается влияние сезонного увеличения обводненности в период снеготаяния и дождей. С февраля 2020 г. на этом участке произошел существенный рост сейсмической активности. В 2021 г. уровень сейсмической активности остается высоким, но при этом число сильных сейсмических событий снизилось;

— консольная часть массива горных пород. Наиболее интенсивное трещинообразование происходило в 2019 г. В 2020–2021 гг. бóльшая часть событий в консоли происходила в районе бл. 4/7;

— окисленная зона в районе второго фронта горных работ, продвигающегося в сторону Саамского разлома. На этом участке сильные сейсмические события происходят постоянно, периоды активизации и затишья сменяют друг друга. 10 сентября 2021 г. в районе этого разлома произошло мощное сейсмическое событие энергетического класса $K = 8$, сопровождающееся длительной афтершоковой серией событий. Разрушений в выработках специалистами КФ АО «Апатит» не выявлено;

— район Саамского разлома. На этом участке сейсмическая активность в основном отмечается в лежачем боку рудной залежи, но при этом проявляются сильные события и в других частях разлома (например, в 2021 г.). Это может свидетельствовать об активности разлома в целом и о миграции сейсмичности вдоль него.

Наблюдаются кратковременные повышения сейсмической активности на других участках месторождения, в стороне от участков активного ведения

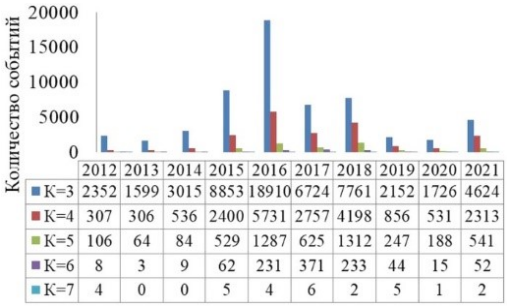
горных работ. Как правило, информация о разрушениях вследствие этих сейсмических событий отсутствует.

Юкспорское месторождение

За десятилетний период исследования установлено, что на Юкспорском месторождении происходило интенсивное трещинообразование в консоли пород висячего бока рудной залежи. Однако, в связи с особенностями отработки месторождения (встречными фронтами), этот процесс длился дольше: первый этап начался в 2015 г. и завершился примерно через год в 2016 г.; второй этап — 2018 г. Как и на Кукисвумчоррском месторождении процесс трещинообразования развивался постепенно: сначала происходило большое количество слабых событий, т. е. формировались трещины одного масштаба, в дальнейшем начали происходить более сильные события, что, в свою очередь, может свидетельствовать о слиянии мелких и средних трещин в более крупные. На рис. 3.7 и 3.8 представлены графики изменения параметров сейсмического режима (число событий, суммарная и средняя выделившаяся энергия). Значения суммарной выделившейся энергии и суммарного числа событий на Юкспорском месторождении значительно выше, чем на Кукисвумчоррском. Однако на Кукисвумчоррском месторождении за десятилетний период произошло 3 события энергетического класса $K = 8$, два из которых произошли в бл.7/10 и одно — в районе Саамского разлома, а на Юкспорском месторождении ни одного сейсмического события такого уровня не зафиксировано. В 2020–2021 гг. уровень сейсмической активности на месторождении снизился до уровня 2013 г.



а



	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
K=3	2352	1599	3015	8853	18910	6724	7761	2152	1726	4624
K=4	307	306	536	2400	5731	2757	4198	856	531	2313
K=5	106	64	84	529	1287	625	1312	247	188	541
K=6	8	3	9	62	231	371	233	44	15	52
K=7	4	0	0	5	4	6	2	5	1	2

б

Рис. 3.7. Распределение числа событий и сейсмической энергии (*а*) и сейсмособытий по энергетическим классам (*б*)



Рис. 3.8. Ежемесячное распределение числа сейсмособытий и выделившейся сейсмической энергии

В 2020 г. рост сейсмической активности наблюдался на участке Р8-Р12 в районе лежачего бока. Здесь зафиксирован отклик массива на продвижение горных работ — произошло сильное сейсмическое событие энергетического класса $K = 7$. Причем на этом участке сейсмичность мигрирует вместе с продвижением фронта работ. Так, 4 декабря 2020 г. в 23:23 (Р8+43 м, М+119, выс. отм. +310 м) работниками КФ АО «Апатит» зафиксировано сотрясение горного массива. Визуальным осмотром выработок в этом районе выявлено смещение в скважинах вееров в направлении ЮЗ-СВ и нарушение крепления горных выработок вследствие подвижки по эгириновой жиле. Данное геодинамическое явление классифицировано как толчок, реализации которого способствовали взрывные работы при торцевом выпуске руды вблизи эгириновой жилы, а также упругое расширение рудного массива за счет выполненной надработки массива. Ранее на этом участке отмечался рост сейсмической активности, по-видимому, вследствие нахождения данного участка в зоне опорного давления от очистного пространства вышележащего горизонта.

В феврале 2021 г. на Юкспорском месторождении зафиксирована активизация сейсмичности: 19.02.2021 г. в 04:51 произошел микроудар. Было зарегистрировано сейсмическое событие энергетического класса $K = 6$ (Р11+52 м, М-110, выс. отм. +288 м) и продолжительная серия афтершоков с максимальной энергией 4.27·103 Дж. В результате комиссионного осмотра было выявлено нарушение бетонного крепления выработок, обрушение горной массы с сектора разгрузочной строчки в объеме 0,25 м^3. Факторами, способствующими реализации геодинамического события, являлись:

— геомеханические условия: нахождение участка массива горных пород в зоне опорного давления от очистной выемки по отм. +337 м и бровки обрушения покрывающих пород;

— геологическая обстановка: наличие крутопадающей высокопрочной мелкозернистой мончикитовой дайки и приуроченной к ее контакту с линзовидно-полосчатыми рудами зоны интенсивной трещиноватости.

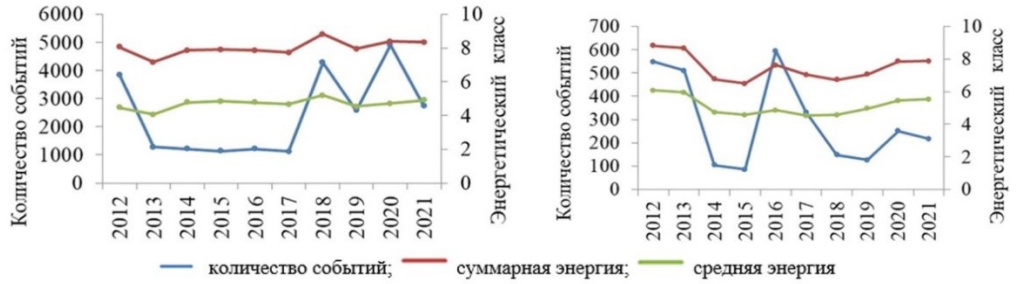
Месторождения Апатитовый цирк и Плато Расвумчорр

Подсистемой АСКСМ-Р контролируется зона стыковки подземного Расвумчоррского рудника с карьером «Центральный», район рудоспуска № 6 и северо-западный борт карьера [88]. На протяжении исследуемого периода активизация сейсмичности наблюдалась в 2012, 2018 и 2020 гг. на месторождении Апатитовый цирк и в 2012, 2013, 2016 и 2020 гг. на Плато Расвумчорр.

На рис. 3.9–3.11 представлены графики изменения параметров сейсмического режима на месторождениях Апатитовый цирк и Плато Расвумчорр. Существенными факторами, влияющими на сейсмичность месторождений, являются не только взрывные работы, но и обводненность массива горных пород в периоды дождей/снеготаяния и перепады температуры, когда происходит промерзание/оттаивание трещин, заполненных водонасыщенными породами.

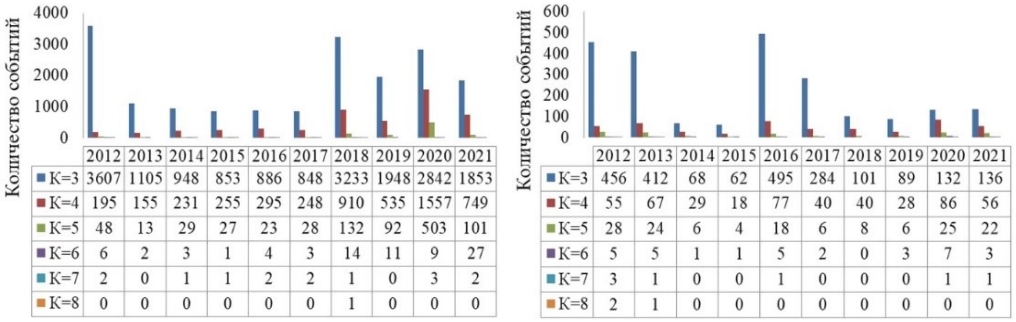
Местоположение событий совпадает с геологическими структурами или находится вблизи таких структур. Здесь сильные события происходят под влиянием

проводимых горных работ, а также интенсивного трещинообразования в основании консольного зависания.



а *б*

Рис. 3.9. Ежегодное распределение числа событий и выделившейся сейсмической энергии на месторождениях Апатитовый цирк (*а*) и Плато Расвумчорр (*б*)

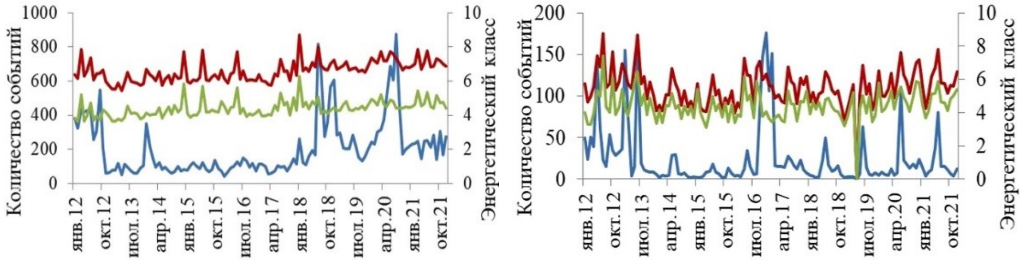


	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
K=3	3607	1105	948	853	886	848	3233	1948	2842	1853
K=4	195	155	231	255	295	248	910	535	1557	749
K=5	48	13	29	27	23	28	132	92	503	101
K=6	6	2	3	1	4	3	14	11	9	27
K=7	2	0	1	1	2	2	1	0	3	2
K=8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
K=3	456	412	68	62	495	284	101	89	132	136
K=4	55	67	29	18	77	40	40	28	86	56
K=5	28	24	6	4	18	6	8	6	25	22
K=6	5	5	1	1	5	2	0	3	7	3
K=7	3	1	0	0	1	0	0	0	1	1
K=8	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0

а *б*

Рис. 3.10. Распределение сейсмособытий по энергетическим классам на месторождениях Апатитовый цирк (*а*) и Плато Расвумчорр (*б*)



а *б*

Рис. 3.11. Ежемесячное распределение числа сейсмособытий и выделившейся сейсмической энергии на месторождениях Апатитовый цирк (*а*) и Плато Расвумчорр (*б*)

Установлено, что в 2019–2021 гг. потенциально опасные области наблюдаются в висячем боку рудной залежи, охватывая район обрушения консольной части массива

горных пород (на верхних горизонтах рудника), а также район ведения горных работ (гор. +310 и +450 м). Основные сейсмически активные участки на Расвумчоррском руднике:

— участок в районе Р7–Р12. На этом участке на сейсмичность влияют два фактора: ведение горных работ на нижележащих горизонтах; процессы трещинообразования в основании консольного зависания. Наиболее интенсивное проявление сейсмичности наблюдалось в 2020 г., в 2021 г. уровень сейсмической активности на данном участке несколько снизился;

— район ГТУ (09.01.2018 г.). Особенностью этого района является сложная геологическая структура. Учитывая, что ранее на этом участке неоднократно происходили горные удары, приводившие к последствиям различного масштаба, необходимо уделять особое внимание изменениям сейсмической активности. В течение 2019–2021 гг. здесь зарегистрированы единичные проявления сейсмических событий. Одно сильное событие энергетического класса $K = 6$ произошло в 2019 г., а в 2021 г. произошло три сильных сейсмических события (участок от Р6 до Р8). По-видимому, в связи с наличием разломных структур в этом районе и в дальнейшем могут происходить сильные сейсмособытия;

— участок в районе Р1п-Р5п. Здесь сейсмическая активность связана как с развитием горных работ, так и со сложной геологической структурой массива. Большое количество сильных сейсмических событий, произошедших на данном участке в 2020–2021 гг. не привели к разрушениям в выработках;

— Р6п–Р9п. На этом участке в 2020 г. произошло 5 сильных сейсмических событий. Участок находится в зоне стыковки подземного Расвумчоррского рудника и карьера «Центральный». Ранее здесь также происходили сильные сейсмические события.

Таким образом, на Кировском и Расвумчоррском рудниках основными участками повышенной сейсмической активности являются участки вблизи активного ведения горных работ; консоль необрушенных пород висячего бока рудной залежи и зоны геолого-структурных неоднородностей массива. Отдельно необходимо отметить увеличение числа сильных сейсмических событий в лежачем боку рудной залежи, причем зачастую эти события происходят в глубине массива, где ранее такие события не регистрировались, по-видимому, причиной таких событий является углубление горных работ.

3.3. Исследование влияния природных и техногенных факторов на формирование опасных зон в геомеханическом пространстве рудников

Исследование влияния обводненности на сейсмическую активность массива горных пород

Многолетнее существование проблемы горных ударов указывает на ее сложность и многофакторность [89–93]. Одним из природных факторов, изменяющих геомеханическое состояние горного массива и влияющим на проявление геодинамических явлений, является его обводненность. С одной стороны, увлажнение массива может быть использовано как профилактическое мероприятие при борьбе

с горными ударами [94]. С другой, известно, что проявление индуцированной сейсмичности может быть связано с процессом затопления шахт. Например, проявление сейсмичности при затоплении рудника Чемпион Риф в Индии и угольных шахт в России в 1990-х гг. было объяснено реактивацией тектонических нарушений при снижении их нормального сжатия под влиянием гидростатического давления [95, 96]. Аналогично объясняются и сейсмические активизации при затоплении шахт на месторождениях ЮАР и Европы [97, 98].

Также в сейсмологии неоднократно обсуждалась тема влияния атмосферных осадков и поверхностных водоемов на проявление сейсмичности. Так, например, известна связь между заполнением водохранилищ и проявлением сейсмичности [99, 100]. Изучению связи между дождями и слабыми землетрясениями посвящены работы [101, 102]. Однако вопрос об изменении геодинамической активности массива при его обводнении на действующих горных предприятиях по-прежнему остается недостаточно изученным.

В России одними из самых удароопасных являются месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива. Здесь произошли сильные горные удары с магнитудой 3,3 [89] и землетрясения с магнитудой 4,2 [103]. Сейсмические события, регистрируемые в центральной части Хибинского массива, объясняются перераспределением напряжений в массиве горных пород под воздействием крупномасштабных горных работ, причем не только при выемке руды, но и при отсыпке отвалов, образовании хвостохранилищ обогатительных фабрик [104, 105]. Здесь же отмечена связь интенсивности осадков и удароопасности [106–108].

Для действующих горных предприятий, ведущих работы в сложных геомеханических условиях, установление и отслеживание связи между обводненностью массива и проявлением горных ударов имеет большое значение при мониторинге и обосновании мероприятий по обеспечению геодинамической безопасности. Интересным представляется рассмотрение влияния стока вод на сейсмичность и удароопасность горных пород при разработке рудных месторождений в рамках геодинамической модели предельно напряженного состояния верхней части поверхности земной коры.

Обводнение подземных рудников Хибинского массива происходит за счет трещинных и трещинно-жильных вод палеозойского водоносного комплекса и инфильтрации атмосферных осадков через зону обрушения. Обводнение карьера «Центральный» происходит за счет атмосферных осадков, сезонных вод и подземных вод основного водоносного горизонта кристаллических пород.

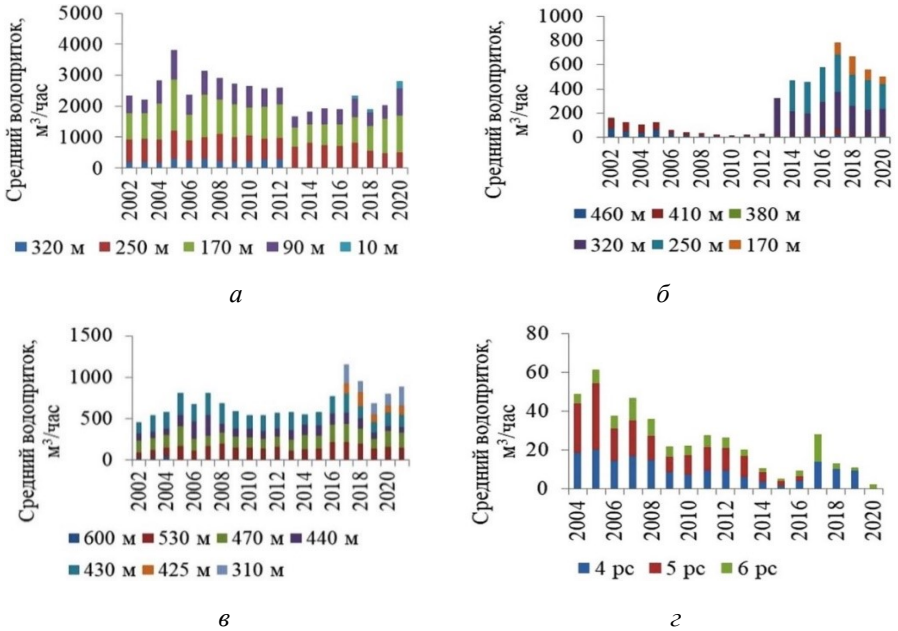
Начиная с высотной отметки (далее — отм.) +390 м Кукисвумчоррского месторождения и с отм. +410 м Юкспорского месторождения отработка ведется в сложных гидрогеологических условиях — в зоне постоянного водонасыщения. Следует отметить, что водоприток в выработках за счет подземных вод растет по мере увеличения глубины отработки, его увеличение на подготавливаемом горизонте происходит по мере продвижения проходческих работ и достигает своего максимума в период завершения проходки основных оконтуривающих выработок.

Анализ гидрологических данных по распределению объемов водопритоков по месяцам показал, что режим водопритоков на месторождениях относительно стабильный. Максимальные водопритоки наблюдаются в период снеготаяния

(в июне месяце) и ливневых дождей. Минимальные водопритоки, формирующиеся за счет подземных вод, наблюдаются в зимний период при продолжительности бесточного периода ≈4–5 месяцев (с ноября по март). Объемы средних водопритоков к главным водоотливным установкам Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождения приведены на рис. (рис. 3.12 *а*, *б*). С 2013 г. на гор. +320 м главная водоотливная установка принимает водопритоки с очистных работ гор. +320 м Юкспорского крыла и остаточные водопритоки с гор. +320 м Кукисвумчоррского крыла. Отработка гор. +380 м Юкспорского месторождения завершена в сентябре 2002 г.

Средние водопритоки в подземный Расвумчоррский рудник к главным водоотливным установкам гор. +600, +530, +470, +450, +440, +430, +425 и +310 м с 2002 по 2021 гг. приведены на рис. 3.12 *в*, из которого следует, что значения среднегодовых притоков за интересующий нас период изменялись от 373 м^3/ч (в 2013 г.) до 854 м^3/ч (в 2018 г.). Пропуски на графике в 2014, 2015 гг. связаны с отсутствием данных по замерам (рис. 3.12 *в*).

В карьере «Центральный» замеры водопритоков осуществляются в рудоспусках (далее — РС) №№ 4–6 (рис. 3.12 г.). С 2018 г. в РС № 5 замеры не проводятся, в 2020 г. отсутствуют данные по замерам на РС № 4. Повышенная обводненность происходит в сезонные периоды с весны по осень за счет атмосферных осадков и вод весеннего снеготаяния. Высота снежного покрова в мае (начало снеготаяния) в разные годы, по данным лавинной службы КФ АО «Апатит», колеблется от 68 см (в 2016 г.) до 256 см (в 2012 г.). Продолжительность периода интенсивного снеготаяния принята 15 дней. Максимальный водоприток за сутки зафиксирован в 2018 г. — 390 м^3/ч.



а *б* *в* *г*

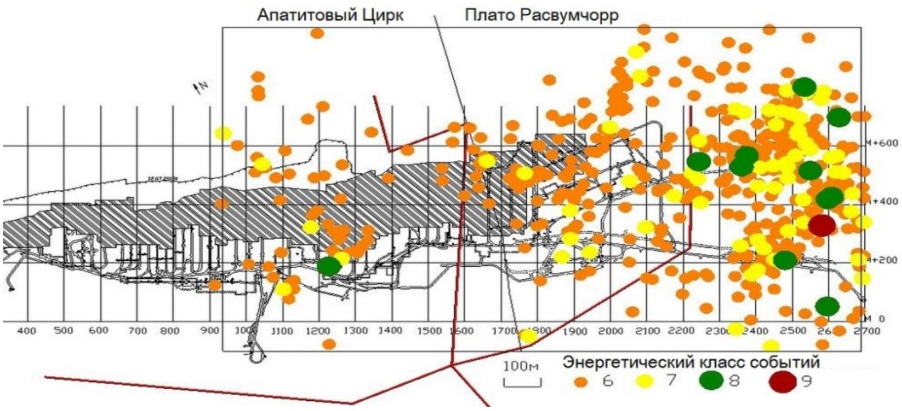
Рис. 3.12. Среднегодовой водоприток на Хибинских месторождениях: Кукисвумчоррское (*а*), Юкспорское (*б*), Апатитовый цирк (*в*), Плато Расвумчорр (*г*)

Таким образом, дальнейшая разработка глубинных горизонтов исследуемых месторождений: +250, +170, +90 и +10 м (Кукисвумчоррское); +320, +250, +170 м (Юкспорское); +470 м (Апатитовый цирк) будет осуществляться в сложных гидрогеологических условиях — в зоне постоянного водонасыщения.

Активизация сейсмичности в сезонные периоды на примере месторождений апатит-нефелиновых руд Апатитовый цирк и Плато Расвумчорр

Месторождения Апатитовый цирк (Расвумчоррский рудник) и Плато Расвумчорр (карьер «Центральный») расположены в зоне активного взаимного влияния: выработки подземного рудника находятся в бортах карьера и под его дном, отвалы карьера расположены на поверхности над подземными выработками. Проявления горного давления фиксируются в зоне стыковки подземного рудника и карьера чаще, чем на противоположных флангах шахтных полей [106, 108]. Тектоническое поле напряжений характеризуется здесь субширотной ориентировкой максимального сжатия σ_{max} в субгоризонтальной плоскости и вертикальной ориентировкой минимального сжатия σ_{min}. Соотношение $\sigma_{max}/\sigma_{min}$ оценивается как 2,5 [109].

На рис. 3.13 показаны эпицентры сейсмических событий с энергетическим классом $K \geq 6$, зарегистрированные с 2002 по 2018 гг.



Прямоугольником показана зона уверенной регистрации АСКСМ-Р, вертикальной линией разделены месторождения Апатитовый цирк и Плато Расвумчорр; — отбойка вышележащего горизонта; — отбойка нижележащего горизонта; — бровка обрушения; — граница горного отвода

Рис. 3.13. Проекция на гор. +530 м Расвумчоррского рудника эпицентров сейсмических событий

Всего на Расвумчоррском руднике (начиная с 2004 г.) зарегистрировано 480 таких событий, в карьере «Центральный» (с погрешностью определения гипоцентра события более 100 м) — 300. Бóльшая часть событий сконцентрирована в районе ведения очистных работ и в зоне влияния консоли налегающих пород, а также в зоне стыковки подземного Расвумчоррского рудника и карьера «Центральный».

Массив горных пород зоны стыковки и района рудоспусков карьера «Центральный» характеризуется наличием радиальных разломов, среди которых выделены крутопадающие дайки лампрофиров, а также разломы в виде шпреуштейнизированных зон, формирующих блочную структуру массива. В восточной части рудного тела к одному из радиальных разломов приурочена дайка диабазов, с которой связано ущелье Дразнящее Эхо

и Главный разлом [110] (зона шпреуштейнизации субширотного направления мощностью от 1 до 10 м), где периодически регистрируются сильные сейсмические события (энергетический класс $K \geq 6$) в весенне-осенние периоды.

Обводнение подземного рудника и карьера происходит за счет трещинных и трещинно-жильных вод палеозойского водоносного комплекса и инфильтрации атмосферных осадков через зону обрушения, а также за счет подземных вод во время подъема их уровня в период интенсивного снеготаяния и затяжных дождей.

О тектонофизических условиях реактивации нарушений

Горные удары типа «fault slip», «slip burst» и «горно-тектонический удар» по российской классификации сопровождаются подвижками крыльев тектонических нарушений, т. е. их реактивацией [111–113]. Эффект реактивации нарушений под воздействием горных работ объясняется их благоприятным расположением в поле напряжений. Обычно направление подвижки определяется локальным техногенным полем напряжений, возникшим в результате ведения горных работ и связанным с формирующимися зонами концентрации напряжений. Однако для сильных горных ударов, как и для индуцированных землетрясений при других видах инженерной деятельности, отмечается соответствие направления подвижки по реактивированным нарушениям региональному полю напряжений, т. е. полю напряжений нетронутого массива [114].

Тектоническое поле напряжений в районе месторождений характеризуется субширотной субгоризонтальной ориентировкой оси максимального сжатия и субмеридиальной ориентировкой оси минимального сжатия. Нарушения разрывного характера представлены обычно ровными, плавно изгибающимися крутопадающими разрывами северо-восточной и северо-западной ориентировки. Их сместители прослеживаются по падению обычно на десятки и сотни метров, часто заполнены вторичными минералами. В действующем поле напряжений сместители таких нарушений тяготеют к площадкам максимальных касательных напряжений τ_{max} и показатель (3.1) для них близок к единице, т. е. нарушения ориентированы благоприятно для их реактивации:

$$\hat{\tau} = \tau_n / \tau_{\max} , \qquad (3.1)$$

τ_n — величина касательных напряжений на произвольной плоскости сместителя с нормалью $\overline{n}$.

Необходимо иметь в виду, что уровень касательных напряжений на малых глубинах до 300–500 м значительно выше, чем на больших глубинах в связи с изменением соотношений горизонтальных и вертикальных компонент напряжений с 5–10 вблизи поверхности до 2–3 на глубине свыше 1000 м. Поэтому зона предельного напряженного состояния по уровню касательных напряжений расположена на глубинах, меньших протяженности разрывов при горно-тектонических ударах и техногенных землетрясениях.

Реактивация нарушений при изменении порового давления

В работе Гупта и Растоги о влиянии водохранилищ на сейсмический режим [99] было показано, что увеличение порового давления воды приводит к снижению нормального сжатия крыльев нарушений при сохраняющемся уровне

касательных напряжений. Снижение нормального сжатия сместителей нарушений и приводит к уменьшению сдвиговой прочности по сместителю от τ до τ^* (3.2, 3.3), что конечном счете способствует внезапной подвижке по нарушению с выделением сейсмической энергии:

$$\tau = \sigma_n * \mathrm{tg}\varphi + C, \quad (3.2)$$

$$\tau^* = (\sigma_n - P) * \mathrm{tg}\varphi + C. \quad (3.3)$$

Для шахт и рудников реактивации нарушений дополнительно способствует наличие значительных по размерам выработанных пространств, куда могут смещаться крылья нарушений при горно-тектонических ударах [106–108], т. к. наличие разуплотненных областей в массиве снижает его сцепление *C*. Аналогично можно предположить, что при инфильтрации осадков происходит повышение гидростатического давления и реактивацию испытывают прежде всего те нарушения, которые благоприятно расположены в поле действующих напряжений.

Выполнение равенств 2 или 3 для конкретного сместителя представляет собой достижение предельно напряженного состояния в этой плоскости, после чего возможна подвижка по нарушению в динамической форме.

Проявление удароопасности и реактивация нарушений свидетельствуют о достижении в очаговых областях геодинамических явлений предельно напряженного состояния.

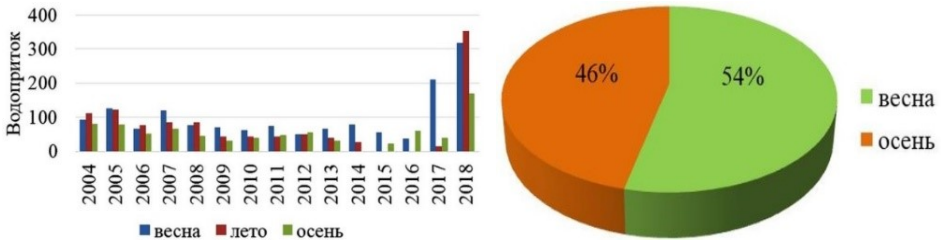
Мониторинг водопритоков

Обводнение горных выработок и буровых скважин горизонтов Расвумчоррского рудника происходит за счет инфильтрационных атмосферных осадков, начиная с гор. +470 м, добыча руды ведется в сложных гидрогеологических условиях в зоне постоянного водонасыщения. В зоне стыковки подземного Расвумчоррского рудника и карьера «Центральный» обводненность горных пород происходит за счет поверхностных вод, в связи с этим принято использовать ежесуточные данные по замерам рудничного водопритока в рудоспусках карьера «Центральный», которые располагаются непосредственно в зоне стыковки.

На рис. 3.14 представлен среднесуточный объем водопритока ($м^3$/сут) в зоне стыковки подземного Расвумчоррского рудника и карьера «Центральный». В 2015–2016 гг. нет данных по замерам водопритока в летний период. Весенний период установлен с начала снижения высоты снежного покрова и увеличения водопритоков до окончания снеготаяния (нулевой уровень снега); летний период начинается с окончания снеготаяния до 1 сентября; осенний — с 1 сентября до начала заморозков (средняя суточная температура — отрицательная) и снижения водопритока (до постоянных, низких показателей). Можно заметить, что в весенний сезон измерений значения по водопритокам выше, чем в осенний, хотя он более краткосрочный. На круговой диаграмме (рис. 3.14 *б*) представлено соотношение уровня суммарного рудничного водопритока в весенне-осенний период по данным за 2004–2018 гг.

Ежегодные показатели водопритока неравномерны. Это зависит от количества выпавшего снега, жидких осадков и положительной температуры воздуха

(обильное снеготаяние). Изменение максимальной высоты снежного покрова в мае по данным отдела лавинной безопасности АО «Апатит» показано на графике (рис. 3.15).



а *б*

Рис. 3.14. Анализ рудничных водопритоков по сезонам: распределение по периодам (*а*), соотношение водопритока в весенне-осенний период (*б*)

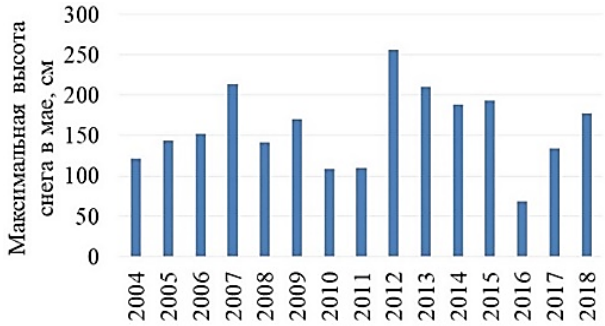


Рис. 3.15. Максимальная высота снежного покрова за сутки в мае

В условиях Хибин, где происходит большое снегонакопление в зонах обрушения пород и карьерах, искусственная (наведенная) трещиноватость существенно влияет на обводненность подземных выработок атмосферными водами. Сдвижение больших массивов пород сопровождается образованием крупных трещин скола цирков висячего бока на расстоянии до 100–150 м от кромки обрушения. В появившиеся трещины легко проникают талые воды.

Наибольшее число геодинамических явлений, сопровождающихся сотрясением земной поверхности, осыпанием уступов бортов и повреждением рудоспусков карьера «Центральный», нарушениями целостности контуров выработок подземного Расвумчоррского рудника, было зарегистрировано в весенний (2005, 2009, 2012, 2013 гг.) и осенний сезон (2004 г.).

Закономерность нарастания сейсмической активности массива в период снеготаяния или сильных осадков на Хибинских месторождениях

Средства современного сейсмологического и геомеханического мониторинга на горном предприятии позволяют выявить закономерности влияния обводненности на удароопасность массива [115]. Согласно полученным данным, прослеживается ежегодная тенденция роста сейсмоактивности в весенний сезон. На месторождении Плато Расвумчорр активизация сейсмичности происходит раньше, чем на смежном ему месторождении Апатитовый цирк, т. к. Плато Расвумчорр отрабатывается открытым способом и в этом районе обнажено больше трещин и тектонических

нарушений, которые в период снеготаяния обводняются. Вследствие этого в условиях предельно напряженного состояния массива происходит реактивация нарушений и повышение сейсмической активности.

Детальный анализ метео-, гидро- и сейсмоданных для весеннего периода мониторинга с 2004–2018 гг. показал, что ежегодное распределение количества твердых осадков (снега), объема водопритока, а также начала сезона снеготаяния неравномерны и варьируют с апреля по июнь. На графиках (рис. 3.16) отображены тренды значений, по которым видно, что ежегодно количество твердых осадков (снега) и объем водопритока неравномерны, сезон снеготаяния отмечается: в 2015 г. — в начале мая, а в 2016 г. — конце апреля, а в 2017 г. — в июне (табл. 3.1). Так, в 2015 г. 7 мая высота снежного покрова была ≈193 см, в 2016 г. 26 апреля — ≈91 см, рост водопритоков был зафиксирован через несколько дней, а в 2017 г., в связи с холодной весной, сдвинулся на июнь. В начале июня 2017 г. снеготаяние началось при высоте снежного покрова ≈120 см (на 4 июня), а в 2018 г. — в начале мая при высоте177 см (на 6 мая). Поскольку на рост водопритока влияет скорость таяния снега и общая обводненность массива, то введен параметр «изменение высоты снежного покрова в течение суток» Δh (см): $\Delta h = h_i - h_{i+1}$, где h_i — высота снега в предыдущий день. Параметр Δh показывает, насколько изменилась в ту или иную сторону высота снежной толщи. Положительные значения говорят, например, о том, что мог быть метелевый перенос ранее выпавшего снега в районе замера.

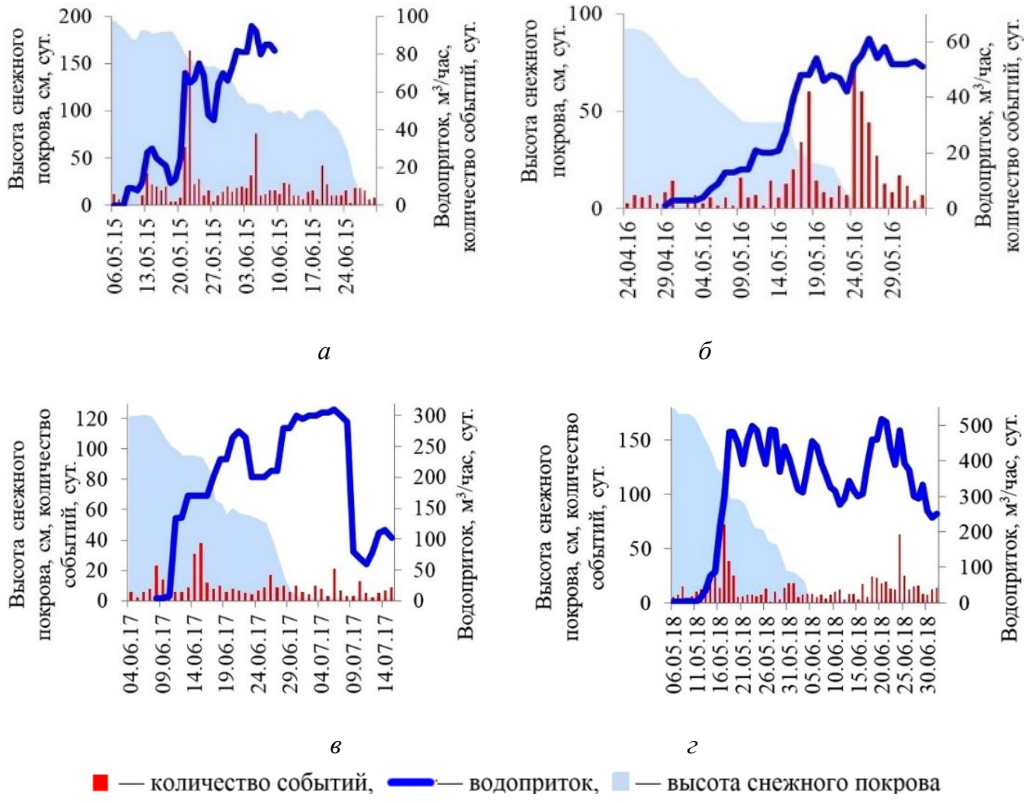


Рис. 3.16. Влияние высоты снежного покрова и водопритока на изменение сейсмичности

Таблица 3.1

Динамика ежегодного снеготаяния

Год	Дата	*h* (см)	Δ*h* (см)	Начало водопритока ($м^3$/ч)
2015	7 мая	193	–5	9 мая
2016	26 апреля	91	–1	29 апреля
2017	7 июня	120	–1	10 июня
2018	6 мая	177	–6	12 мая

Из приведенных данных видно (рис. 3.17), что прослеживается увеличение сейсмической активности. Как после продолжительного спада высоты снежного покрова, так и после экстремальных изменений высоты снежной толщи наблюдается существенный (на 50 % и более) рост числа сейсмических событий в период весеннего снеготаяния. И то и другое совпадает со скачкообразным ростом водопритока. Положительная температура воздуха приводит к образованию свободной воды в снежной толще (когда снег достигает температуры плавления, т. е. нуля градусов по шкале Цельсия) и началу ее инфильтрации в трещины на поверхности массива пород. Следует отметить, что сейсмическая активность повышается после продолжительного (от 5 дней) увеличения рудничных водопритоков в два и более раза от предыдущих суточных замеров, т. е. после интенсивного снеготаяния (рис. 3.17).

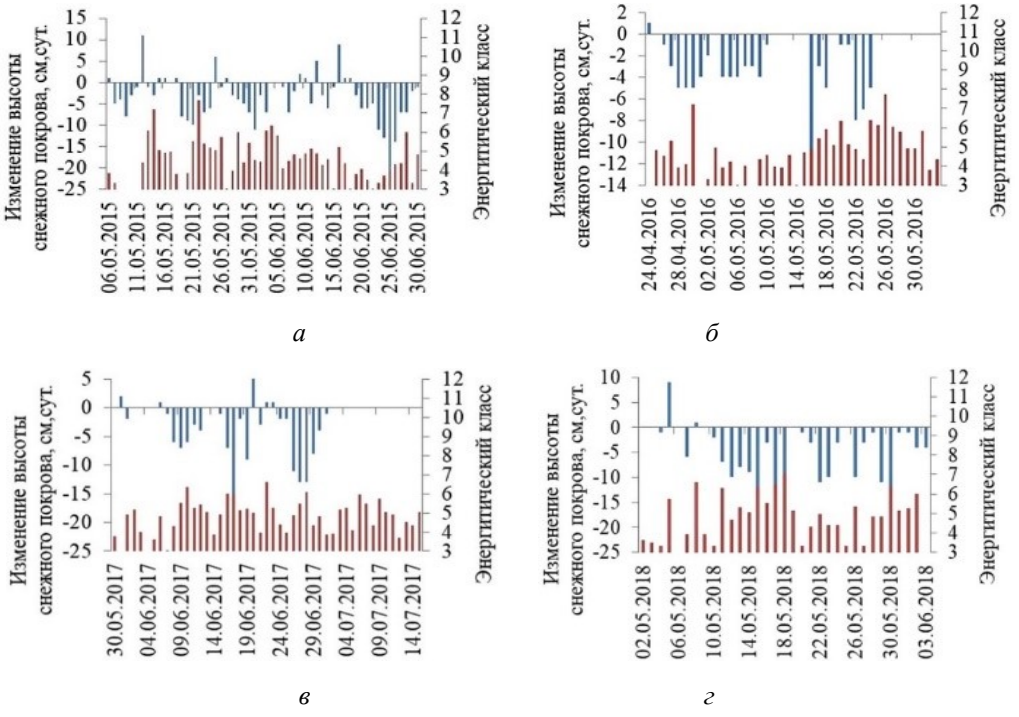


Рис. 3.17. Влияние изменения высоты снежного покрова на сейсмичность (ежесуточные значения)

На рис. 3.18 приведены результаты сопоставительного анализа данных сейсмического и метеорологического мониторингов за период снеготаяния. Расчет запаса воды в снежном покрове для площади карьера «Центральный»

и отвалов произведен по формуле [116]: $Z = 10hd$, где h — средняя высота снежного покрова, см; d — плотность снега, г/см^3. С учетом площади карьера и отвалов запас воды равен $Z - S$ (м^3) (на рис. 3.18 не отображен запас воды в снежном покрове после 2015 г. из-за отсутствия данных).



Рис. 3.18. Сопоставление данных сейсмического и метеорологического мониторингов

Значения запаса воды в снежном покрове показывают, сколько влаги поступает на инфильтрацию на всю площадь водосбора при таянии выпавшего за весь сезон снега с учетом жидких осадков, зафиксированных в весенний период.

Можно отметить, что повышенный уровень сейсмичности наблюдается в годы с запасом воды в снежной толще более 3·108 м^3. Так, в 2005 и 2009 гг. наблюдается всплеск сейсмической активности, в эти годы произошли техногенные землетрясения. В 2010 и 2011 гг. запас воды в снежной толще равен около 2·108 м^3, количество дней снеготаяния составляет 22 и 31 соответственно, но число сильных событий ($K \geq 6$), регистрируемых в карьере «Центральный», в эти годы остается большим — ≈30. В 2012 г. запас воды в снежной толще составил более 5,6·108 м^3, а период снеготаяния — 42 дня. Уровень выделившейся суммарной сейсмической энергии за эти дни высокий, при этом в карьере «Центральный» было зарегистрировано ≈50 сейсмических событий энергетического класса $K \geq 6$. Бóльшая часть событий была зарегистрирована 18 и 19 мая. Произведенный в карьере «Центральный» 18 мая массовый взрыв способствовал релаксации напряжений в массиве горных пород, вследствие этого снизился общий уровень энергии событий. В 2013 г. были зарегистрированы толчки. Расчет запаса воды показал, что значение близко к уровню 2009 г. и выше, чем в 2005 г., но период снеготаяния короче на 12 дней, чем в эти годы.

Статистический анализ данных показывает, что в исследуемом районе периодичность геодинамических явлений, ощущаемых на земной поверхности, составляет 3–4 года. Этому может способствовать как затяжное снеготаяние — период превышает в среднем 40 дней, так и запас воды в снежной толще более 3·108м^3 (табл. 3.2), что можно объяснить особенностями гидрогеологической обстановки на исследуемых месторождениях Апатитовый цирк и Плато Расвумчорр.

Таблица 3.2

Данные сейсмического и метеорологического мониторингов

Год	Период снеготаяния, сут	Начальная высота снежного покрова на период снеготаяния, см	Средний водоприток за период снеготаяния, $м^3/ч$	Суммарная выделившаяся энергия событий, Дж	Запас воды в снежном покрове (*10^8), $м^3$	Количество событий $\kappa \geq 6$	Количество событий $\kappa \geq 3$
2004	54	121	1737	2,0 e + 07	–	2	97
2005	47	143	1504	4,7 e + 08	3,7	40	1258
2006	45	152	985	2,4 e + 07	3,3	10	1361
2007	43	214	1889	7,4 e+07	4,1	21	729
2008	54	141	717	8,0 e + 07	3,9	15	657
2009	47	170	722	6,8 e + 08	4,1	83	1438
2010	22	109	315	4,2 e + 07	2	36	635
2011	31	110	339	2,4 e + 08	1,9	48	520
2012	42	254	701	5,7 e + 08	5,6	47	1143
2013	35	210	864	6,8 e + 08	4	28	755
2014	25	186	630	1,9 e + 07	3,8	9	318
2015	56	193	551	1,5 e + 08	3,9	11	517
2016	29	91	196	2,6 e + 07	–	8	262
2017	25	121	2303	1,2 e + 07	–	6	278
2018	28	177	3991	2,9 e + 07	–	12	404

Примечание. Средний водоприток за период снеготаяния — от начала роста водопритока до конца снеготаяния — период повышенной обводненности ($м^3/ч$).

Таким образом, прослеживается закономерность, согласно которой в период снеготаяния или сильных осадков происходит рост сейсмической активности массива.

Некоторые примеры сейсмических событий в период снеготаяния представлены в табл. 3.3.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. По данным пятнадцатилетнего периода наблюдений выявлена закономерность сезонного роста сейсмичности в период снеготаяния и выпадения осадков, в большей степени в весенние месяцы на месторождениях Хибинского массива Апатитовый цирк и Плато Расвумчорр.

2. На месторождениях Апатитовый цирк и Плато Расвумчорр выявлена закономерность сезонного роста сейсмичности (на ≈50 % и более) в период весеннего снеготаяния. Всплеск сейсмической активности массива исследуемых месторождений в период снеготаяния происходил при выполнении нескольких условий:

— период снеготаяния превышал 40 дней;

— запас воды в снежной толще более $3 \cdot 108$ $м^3$ (на площади карьера и отвалов);

— продолжительное (от 5 дней) увеличение объемов рудничных водопритоков;

— превышение суммарного значения объемов водопритоков в два и более раза от предыдущих суточных замеров.

3. Несмотря на то, что горные работы велись на глубинах более 500 м, сейсмические явления при инфильтрации осадков начинали проявляться с глубин 100–200 м и фиксировались до 900 м. Эти особенности проявления геодинамических явлений позволяют сделать вывод о предельно напряженном состоянии верхней части земной коры в целом в районе месторождений.

Таблица 3.3

Характеристика сейсмических явлений изучаемого месторождения Плато Расвумчорр с 2005–2018 гг.

Энергетический класс главного события/Z — высотная отметка	Период снеготаяния	Энергетический класс событий форшоков/афтершоков	Диапазон высотных отметок форшоков/афтершоков, м	Характер проявлений
Землетрясение 25 мая 2005 г.				
K = 7/Z = 445 м	1 мая – 17 июня	K = 4–6/K = 4–8	200–700/150–850	Серии толчков в районе рудоспусков и в зданиях административных комплексов. В карьере наблюдалось осыпание породы по зоне шпреуштейнизации
Землетрясение 25 мая 2009 г.				
K = 10/Z не установлена (за зоной АСКСМ)	8 мая – 24 июня	K = 4–7/K = 4–7	100–860/100–900	Основное событие, а также серия форшоков и афтершоков ощущались в подземных выработках, в зданиях Расвумчоррского, Центрального и Кировского рудников, а также в г. Кировске. В карьере отмечалось осыпание породы с бортов и поднятие пыли в районе эпицентра. Источником событий являлась подвижка по разлому
Толчок 18 мая 2012 г.				
K = 8/Z не установлена (за зоной АСКСМ)	16 мая – 27 июня	K = 4–5 / K = 4–7	340–600/100–700	Ощущались толчки в зоне стыковки подземного Расвумчоррского рудника и карьера Центральный, сотрясения земной поверхности в карьере
Толчок 2 июня 2013 г.				
K = 8/Z = 436 м	16 мая – 20 июня	K = 4–6/K = 4–7	100–600/100–700	Активизация сейсмической активности зарегистрирована в зоне стыковки и районе рудоспусков. На Расвумчоррском руднике 2 июня ночью рабочие ощутили толчки. Повреждения не установлены

О природе нарастания сейсмической активности в периоды снеготаяния

С точки зрения концепции проф. И. М. Петухова, зоны предельно напряженного состояния верхней части земной коры формируются под влиянием горизонтальных сил сжатия и их мощность зависит от условий взаимодействия блоков земной коры [117]. Косвенным доказательством повсеместного проявления этого эффекта на месторождениях является соотношение размеров очагов горно-тектонических ударов L и глубины их гипоцентров H. Поскольку $L/H > 1$ для многих месторождений [93], то возникновение областей предельно напряженного состояния в земной коре является, скорее, обычным явлением, чем исключением. Такие зоны предельно напряженного состояния массива рассматриваются как среда для техногенных аварий, поскольку воздействие на них с поверхности способно привести к сильному динамическому явлению с большой глубиной гипоцентра [114].

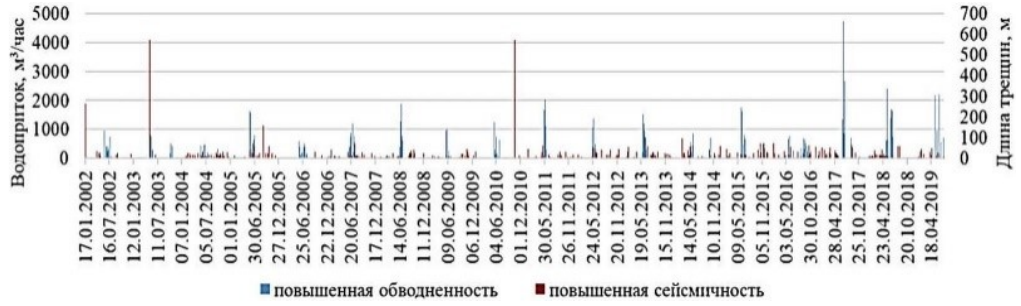
Анализ координат сильных сейсмических событий ($K \geq 6$) в период снеготаяния на месторождении Плато Расвумчорр с 2005–2018 гг. показал, что сейсмические явления начинают регистрироваться с высотных отметок 100–150 м (табл. 3.3), что можно расценивать как свидетельство в пользу гипотезы о предельно напряженном состоянии верхней части земной коры в районе месторождения. Для зоны предельно напряженного состояния массива характерна структурная иерархия и дискретность распределения напряжений. Локальные участки с предельным состоянием перемежаются с относительно разгруженными участками, но они в совокупности образуют зону предельного состояния более крупного ранга. Динамические явления при инфильтрации воды есть результат последовательного нарушения равновесия на участках массива горных пород, находящихся в предельно напряженном состоянии.

Таким образом, район горных разработок Хибинского массива можно рассматривать как участок земной коры, в котором достигнуто предельно напряженное состояние от поверхности до некоторой глубины. В этом случае и геомеханическое воздействие от ведения горных работ, и инфильтрация осадков вызывают немедленное перераспределение напряжений в массиве пород, что может при определенных обстоятельствах происходить в динамической форме.

Для выявления связи между объемом водопритоков и суммарной длиной трещин, вычисляемой по формуле (3.4) [105], ранее (до 2014 г.) были определены значения повышенной обводненности и повышенной сейсмичности соответственно за период наблюдений для исследуемых рудников. В настоящей работе применен несколько другой способ определения повышенных значений по водопритокам и сейсмичности — отдельно по каждому году проводился расчет среднего и стандартного отклонения для расчета повышенных значений, временной период анализа составил с 2002–2019 гг. по Кировскому руднику и с 2003–2019 гг. — по Расвумчоррскому (рис. 3.19). Следует отметить, что в некоторые годы результаты расчетов существенно отличались от предыдущих:

$$L = 0{,}1525 \cdot E0{,}3635, \qquad (3.4)$$

где E — энергия события.



а



б

Рис. 3.19. Временной ряд повышенной сейсмичности массива и обводненности горных пород: Кировский рудник (зона контроля АСКСМ-К) (*а*), Расвумчоррский рудник(зона контроля АСКСМ-Р) (*б*)

На новых данных за пятилетний период мониторинга подтверждена закономерность реализации повышенной сейсмичности в зависимости от повышенной обводненности, которая прослеживается в одновременном формировании пиков повышенной обводненности и сейсмичности, причем на 7–8 пиков повышенной сейсмичности приходится 5–6 пиков повышенной обводненности за один и тот же период времени. Наличие остальных всплесков сейсмичности связано с диссипацией энергии в массиве после технологических взрывов.

Всплески повышенной сейсмичности выпадают на зимний период мониторинга или в годы, когда зарегистрирована относительно невысокая обводненность массива и связаны с процессом раскрытия трещин отрыва, изменением конфигурации обрушения и началом раскрытия новых трещин на поверхности массива горных пород, например, в 2002 г. (месторождение Юкспорское), 2006 г. (месторождения Юкспорское и Плато Расвумчорр), 2013 г. (месторождение Плато Расвумчорр), 2015–2018 гг. (месторождения Юкспорское и Кукисвумчоррское), а также когда были зарегистрированы землетрясения и горно-тектонические удары: в октябре 2010 г. (месторождение Кукисвумчоррское) и в январе 2018 г. (месторождение Апатитовый цирк).

Активизация сейсмической активности может быть связана с диссипацией энергии массива пород после произведенного массового взрыва, как, например,

в феврале 2006 г. (месторождение Плато Расвумчорр) и в апреле 2016 г., в январе 2017 г., в апреле 2019 г. (месторождение Юкспорское). Большинство таких сейсмических событий связано с совместным влиянием геологических и горнотехнических факторов, обусловленных интенсивным ведением горных работ, при которых происходит постоянное нарушение равновесного состояния массива.

Следовательно, можно отметить, что обводненность не является единственным фактором, влияющим на сейсмичность массива. При оценке состояния массива важно учитывать очень высокую неоднородность, различную проницаемость горных пород и разнообразие горно-геологических условий, т. е. в целом геомеханическое состояние массива, подверженного постоянному техногенному воздействию. Это указывает на необходимость непрерывной, постоянной оценки состояния Хибинского массива.

Таким образом, сезонное увеличение водопритоков (снеготаяние, дожди); резкие изменения температуры (оледенение трещин, заполненных водой); наличие разломов, заполненных проницаемым материалом; снижение прочностных свойств контактов разрывных нарушений способствуют активизации сейсмичности. Крупномасштабные горные работы приводят к изменению гидрогеологического режима, что отражается на изменении сейсмичности. Пересчет фоновых и пороговых значений водопритока необходим для рациональной оценки состояния массива горных пород. Комплексная оценка гидро-, метео- и сейсмоданных дает общую характеристику причин активизации сейсмичности. Увеличение объемов водопритока в последние годы говорит о возможном изменении рельефа в районе рудоспусков карьера «Центральный», что может влиять на активизацию сейсмичности.

Итак, возможным основным механизмом сейсмической активизации массива в период снеготаяния и выпадения осадков является реактивация тектонических нарушений и ослабленных зон массива, возникающая за счет снижения их нормального сжатия при инфильтрации.

Выявленные закономерности влияния природных факторов на сейсмоактивность и удароопасность необходимо учитывать при планировании горных работ и проведении геомеханического мониторинга.

3.4. Развитие методики вероятностного прогноза уровня сейсмической опасности на отрабатываемых месторождениях на основе различных прогностических критериев

Безопасность ведения горных работ и уменьшение экономических потерь от сильных геодинамических явлений во многом определяются знанием потенциальной опасности на отдельных участках горных работ, проведением службой прогнозов и предупреждения горных ударов профилактических и оперативных мероприятий по контролю удароопасности.

Существенное значение имеет проведение прогноза времени, места и энергии сильных сейсмических событий. Возможность прогноза определяется изученностью пространственно-временных закономерностей техногенной сейсмичности конкретного месторождения. Как известно, существует три

вида прогноза сильных землетрясений: долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный [118–120]. Применительно к техногенной сейсмичности могут быть выделены такие виды прогноза.

Долгосрочный прогноз (1 год и более) — это сейсмическое районирование массива горных пород. Может применяться при планировании горных работ на несколько лет.

Среднесрочный прогноз (от 1 месяца до 1 года) может быть основан на отражении закономерностей конкретного участка массива. Может применяться при планировании профилактических мероприятий.

Краткосрочный прогноз (от нескольких часов до 1 месяца) является наиболее сложной задачей, не решенной ни в большой сейсмологии, ни в техногенной сейсмичности.

На сегодняшний день исследователями России и мира применяется прогноз сейсмической опасности, т. е. разрабатываются модели прогноза для определения вероятности возникновения события или выявления районов с высокой сейсмической опасностью.

При решении задач прогноза проявлений техногенной сейсмичности важно учитывать, что алгоритмы прогноза должны включать в себя и мониторинг формирования метастабильных очаговых зон, и отслеживание их инициации внешними воздействиями, поскольку момент возникновения землетрясения определяется как временем завершения формирования метастабильной очаговой зоны, так и моментом срабатывания триггерного механизма инициации очага [121]. Нами рассматривается первая часть проблемы: определение потенциально опасных участков и местоположения очага будущего сильного сейсмического события.

Известно, что сейсмическая активность, наблюдающаяся в районах производственной деятельности горнодобывающих предприятий, имеет природно-техногенный характер и развивается в двух направлениях. С одной стороны, техногенные процессы существенно модифицируют естественную сейсмичность и ведут к «стягиванию» сейсмических событий к зонам ведения горных работ. С другой стороны, наоборот, сейсмоактивность может распространяться от зон ведения горных работ на окружающий массив горных пород [122]. Поэтому на практике сейсмособытия часто происходят «на краю» или вне опасной зоны, где, видимо, и возникает релаксация напряжений в виде проявления динамических событий, например, в консоли покрывающих пород или в районе тектонических нарушений.

Ранее были разработаны методические положения комплексного прогноза критических состояний участков массивов горных пород [105], заключающиеся в одновременном рассмотрении отдельных прогностических критериев, отражающих какую-либо одну из особенностей процесса разрушения [123].

В настоящее время применяются три прогностических критерия: фрактальный, наклон графика повторяемости сейсмических событий, концентрационный. Для совместного использования критериев в каждой пространственно-временной ячейке j рассчитываются значения комплексного показателя K_j:

$$K_j = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} k_{ij}, \tag{3.5}$$

где N — число отдельных прогностических критериев; k_{ij} — приведенные значения прогностического критерия i в пространственно-временной ячейке j.

На сегодняшний день продолжается развитие подходов к вероятностному прогнозу сильных сейсмособытий (энергетический класс $K \geq 6$) на основе методики построения карт ожидаемых землетрясений [124]. В основу вероятностного подхода положен алгоритм расчета ретроспективных статистических характеристик динамических прогностических признаков. Вероятность возникновения сильного сейсмического события при наличии аномалии по комплексу прогностических признаков определяется по формуле (3.6):

$$P(K|D1) = \frac{N_{\text{ан}} - N^*_{\text{ан}}}{N_{\text{зт}}}, \quad (3.6)$$

где $P(K|D1)$ — вероятность возникновения сильного события при наличии прогнозного признака (вероятность обнаружения); $N_{\text{ан}}$ – число пространственных ячеек, в которых было объявлено состояние тревоги (общее число аномалий); $N^*_{\text{ан}}$ — число аномалий, для которых время ожидания сильного события превысило среднее время ожидания сильных сейсмических событий (с учетом среднеквадратичной ошибки его определения); $N_{З\ Т}$ — общее число сильных сейсмических событий, возникших за время наблюдений на определенной площади наблюдений.

Прогнозным признаком может быть любой из прогностических критериев, в нашем случае прогнозным признаком считается наличие аномалии по комплексу прогностических критериев. Аномальные значения определялись ретроспективно [125] и на текущем этапе исследований приняты ≥ 0,6.

Для расчета значений вероятностей на различных участках применяют данные о ранее произошедших на этих участках сильных сейсмических событиях и особенностях их проявления (событие предварялось тревогой (аномалией) по комплексу прогностических критериев либо ему предшествовало повышение сейсмической активности, но уровень тревоги не превышен; одиночное событие и др.).

В настоящее время в России и в мире проводятся активные исследования в области разработки методов прогноза проявлений сейсмичности при ведении горных работ. Рассматривается широкий спектр подходов к прогнозу сейсмической опасности: применяются различные прогностические критерии (например, в работах [120, 126, 127] и др.), проводится моделирование ожидаемой сейсмичности при планировании горных работ [128], а также другие подходы. Конечным результатом многих методов является разделение шахтного поля на участки с различным уровнем сейсмической опасности. Более сложной является задача прогноза сейсмической опасности во времени, т. е. выявление опасных и неопасных периодов для различных участков рудника. Практика применения методов прогноза сейсмической опасности показывает, что прогноз не всегда может быть успешным: возможны как ложные тревоги (тревога объявлена, но событие не произошло), так и пропуски цели (т. е. проявление не спрогнозированных сильных сейсмических событий из-за сложного процесса подготовки таких событий в условиях постоянно меняющейся горно-технологической ситуации на отрабатываемых месторождениях).

Особенностью разрабатываемой методики прогноза является применение комплекса прогностических критериев для выявления участков, потенциально опасных по проявлению сильных сейсмособытий или серии событий,

которые могут привести к разрушению в выработках. Целевое назначение методики — среднесрочный (1 мес.) и краткосрочный (ежедневный) прогнозы.

Для среднесрочного прогноза предлагается ежемесячное выявление потенциально опасных участков: 3D-районирование шахтного поля по значениям вероятности возникновения сильных сейсмических событий при наличии аномалии по комплексу прогностических критериев (фрактальный, наклон графика повторяемости сейсмических событий, концентрационный). Для этого строятся пространственно-временные карты распределения значений комплексного критерия и рассчитываются ретроспективные статистические характеристики [124], в том числе значения вероятностей для отдельных участков массива. Такое районирование массива горных пород является важной составляющей разрабатываемой методики, что принципиально отличает ее от методики, действующей сегодня в КФ АО «Апатит».

Для оперативной оценки уровня сейсмической опасности предлагается рассматривать динамику значений комплексного критерия (также в трехмерном варианте). Месторождение дифференцируется на участки с различным уровнем сейсмической активности (фоновым, повышенным или аномально высоким). Предполагается, что ежедневное применение такого подхода позволит соответствующим службам оценить динамику сейсмичности на выбранных участках и провести необходимые мероприятия.

Ретроспективная оценка возможности среднесрочного прогноза

В условиях горнодобывающего предприятия для выявления потенциально опасных участков 3D-районирование предлагается проводить ежемесячно. Для двумерного представления результатов строится разрез по высотной отметке либо по падению/простиранию рудного тела. Ниже (рис. 3.20) представлен пример двумерной карты вероятностей обнаружения сильных сейсмических событий (отм. +170 м). Карта построена на первое число календарного месяца и совмещена с фактически произошедшими в течение этого месяца сейсмособытиями.

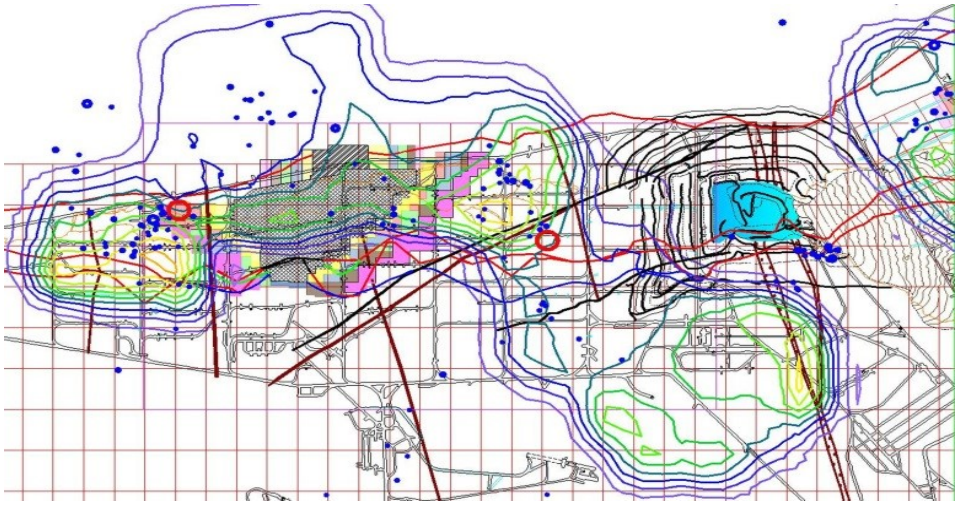


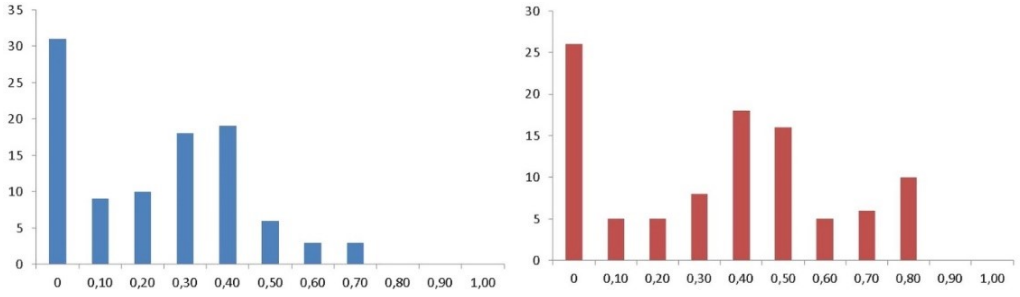
Рис. 3.20. Карта вероятностей обнаружения сильных сейсмических событий, совмещенная с фактически произошедшими сейсмособытиями

На карте (рис. 3.20) видно, что эпицентры двух сильных сейсмических событий попали в область, оконтуренную изолиниями как потенциально опасную. Эти

потенциально опасные области расположены вблизи фронтов горных работ. Также выделен как потенциально опасный участок район Саамского разлома, однако в течение месяца сейсмоактивность здесь не зафиксирована, соответственно, не было и аномалии по комплексу прогностических критериев.

Проведена ретроспективная оценка возможности применения подхода 3D-районирования шахтного поля по значениям вероятности возникновения сильных сейсмических событий при наличии аномалии по комплексу прогностических критериев (вероятности обнаружения) для Кировского и Расвумчоррского рудников. Для этого строили трехмерные карты значений вероятностей на первое число каждого календарного месяца за период 1.01.2020–1.08.2021 гг. и проводили сопоставление местоположения очага фактически произошедшего события со значениями вероятности обнаружения события (информация о наличии или отсутствии аномалии по комплексу прогностических критериев на данном этапе не учитывалась). Всего проанализировано 99 событий, произошедших на Кировском руднике, и 36 событий — на Расвумчоррском руднике.

Значения вероятностей для событий определяли как в точке, соответствующей координатам очага событий, так и ближайшие значения, учитывая, что область подготовки сильного сейсмического события превышает линейные размеры очага (рис. 3.21), что соответствует современным представлениям о выявлении предвестников сильных сейсмических событий: линейные размеры ареала распространения предвестников на порядок выше длины разрыва в очаге [129].



а *б*

Рис. 3.21. Распределение значений вероятности обнаружения сильного сейсмособытия для фактически произошедших событий на Кировском руднике: значения вероятности обнаружения сильного сейсмособытия в точке, соответствующей координатам очага события (*а*); максимальные значения вероятности обнаружения сильного сейсмособытия в области, включающей область подготовки сильного события (*б*)

В качестве другого подхода, позволяющего определить радиус зоны влияния сильных сейсмических событий, применяется предложенная в работе [130] формула (3.7):

$$R_e = 1{,}5E^{1/3}, \quad (3.7)$$

где R_e — радиус круга на плоскости или радиус сферы с центром в месте события, м.

Прогнозный размер радиуса опасной зоны определяется по формуле, предложенной в работе [122] с учетом погрешности определения координат события:

$$R_m = R_e + \delta_r, \quad (3.8)$$

где δ_r — погрешность определения координат гипоцентра события, м.

Тогда радиус опасной зоны влияния сильного сейсмособытия с энергией 1 МДж для района повышенной точности сейсмической сети составляет 175 м с учетом погрешности сейсмосети, т. е. как минимум 2,5 рудничных разреза. Отметим, что представленный метод определения опасной зоны может быть применим для своевременного оперативного проведения различных мероприятий, направленных на снижение удароопасности в выработках.

Таким образом, выполнен расчет вероятности обнаружения сильного сейсмособытия для подземных рудников КФ АО «Апатит». На графиках показано распределение значений вероятности для фактически произошедших событий в пределах шахтного поля Кировского рудника в двух вариантах:

— в точке, соответствующей координатам события (рис. 3.21 *а*);

— максимальные значения вероятности обнаружения сильного сейсмособытия в области, включающей область подготовки сильного события (рис. 3.21 *б*).

На рис. 3.21 видно, что значения вероятностей в точке, соответствующей местоположению очага события, в целом ниже, чем значения вероятностей, полученные с учетом области подготовки сильного сейсмособытия.

Это справедливо как для Кировского, так и для Расвумчоррского рудников, поэтому далее проведен анализ результатов только для значений вероятностей, определенных с учетом области подготовки сильного сейсмособытия.

На рис. 3.22 показан кумулятивный график числа сильных сейсмических событий, на котором отмечены моменты проявления событий, вероятность обнаружения которых составила 0,6 и более.

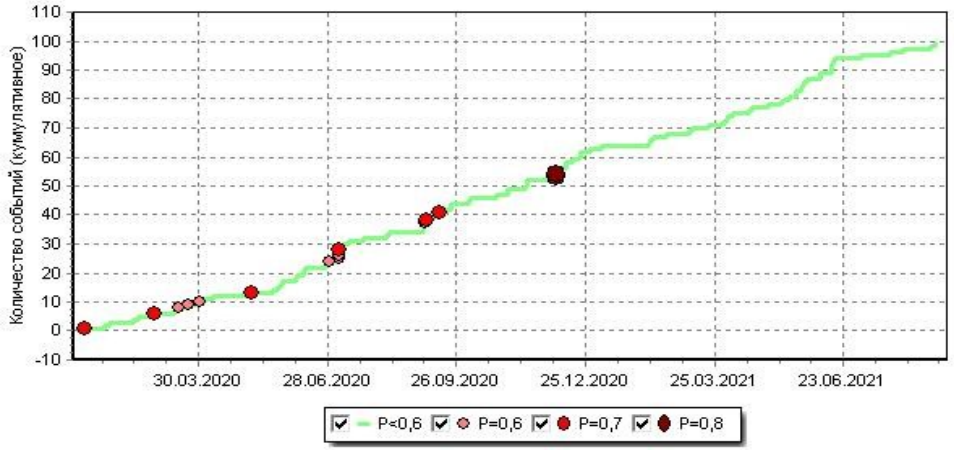


Рис. 3.22. Временной ход сейсмичности (сильных сейсмических событий) на Кировском руднике; *P* — значение вероятности обнаружения сильного сейсмического события

Представленный на рис. 3.22 график иллюстрирует сложность разработки методов прогноза в условиях техногенной сейсмичности. Применения одного и того же подхода с одинаковыми параметрами расчета дает разные результаты в 2020 г. и в 2021 г.

Карта сильных сейсмических событий приведена на рис. 3.23. Цвет сейсмического события соответствует значению вероятности обнаружения этого события.

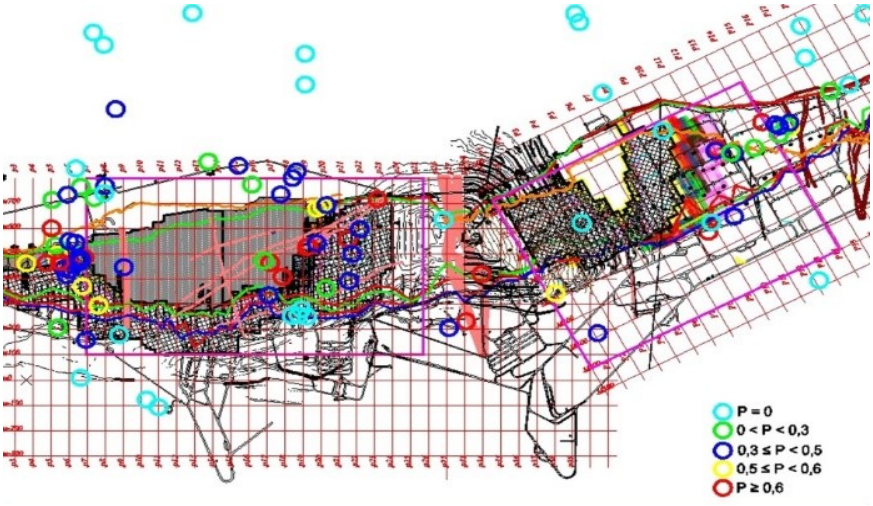


Рис. 3.23. Проекция сильных сейсмособытий на отм. +250 м с учетом значений вероятности обнаружения события

Выявлены несколько групп сильных сейсмических событий.

1. Группа событий, вероятность обнаружения которых равна нулю. Так называемые пропуски цели. Таких событий — ≈26 % от общего числа. Бóльшая часть событий произошла за пределами района повышенной точности АСКСМ-К.

1.1. Из 26 сейсмособытий (пропусков цели) 13 произошли в консольной части массива, большая часть из них не предварялась форшоками, т. е. это одиночные события.

1.2. В лежачем боку рудной залежи в стороне от проводимых горных работ произошло 4 сейсмособытия (3 — на Кукисвумчоррском месторождении, 1 — на Юкспорском). Эти события не привели к разрушениям в ближайших выработках.

1.3. В бл. 7/10 Кукисвумчоррского крыла Кр вблизи разлома произошло сильное событие, которое, по-видимому, является подвижкой по разлому.

1.4. В районе р18/р20 Кукисвумчоррского крыла Кр произошли 4 сильных сейсмических события на высотных отметках от отм. –44 м до отм. +1 м. Местоположение этих событий по высоте не характерно для Кукисвумчоррского месторождения. Важным моментом является сам факт проявления сильных событий на глубинах, где раньше практически не проявлялись сильные сейсмособытия. Пропуски цели, по-видимому, связаны с недостаточным качеством регистрации сейсмических событий на глубине по причине отсутствия сейсмопунктов.

1.5. События на Юкспорском месторождении. Одно из событий произошло на отм. +94 м, что не характерно для Юкспорского месторождения. Два события произошли на высотных отметках +388 и +424 м.

1.6. Одно из четырех сильных сейсмособытий в районе Саамского разлома также является пропуском цели. Предыдущими исследованиями установлено, что сейсмическая активность в районе разлома связана с проводимыми горными работами, и основной сейсмически активный участок располагается в лежачем боку рудной залежи, однако время от времени проявляются сильные сейсмические события и на других участках вдоль разлома.

2. Группа событий в бл. 4/7 и бл. 7/10. Повышенный уровень сейсмической активности на этом участке наблюдался в течение всего периода, для которого

проводили расчеты значений вероятности. Максимальные значения вероятностей проявления событий зафиксированы в районе продвигающегося фронта работ.

3. Группа событий в районе разломной структуры (между Р16 и Р24). Вдоль этой структуры события происходят постоянно. Для 6 сильных сейсмических событий значения вероятностей от 0,6 и более.

4. Район Саамского разлома. Фактически за рассматриваемый период произошло 5 сильных сейсмических событий. Расчетные значения вероятности обнаружения события составляют от 0 до 0,7 и представлены на рис. 3.24. Событие, для которого значение вероятности составило 0,3, произошло после ближайшего к нему события. Данные обо всех предыдущих событиях учитываются в расчетах, поэтому уменьшение значения вероятности обнаружения после проявления сильного события представляется логичным. Аналогичные случаи наблюдаются и в бл. 4/7 Кукисвумчоррского крыла Кр, и на Юкспорском крыле Кр.

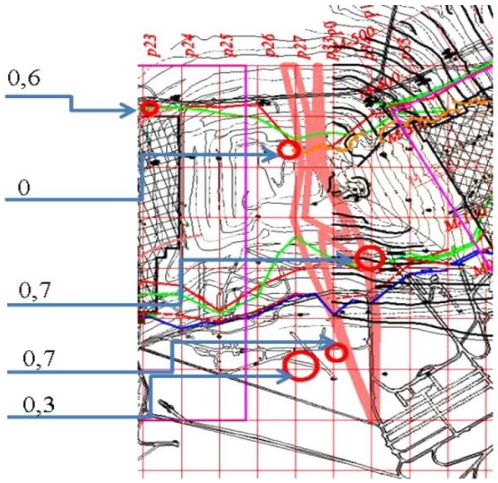


Рис. 3.24. Проекция сильных сейсмособытий на отм. +250 м и значения вероятности их обнаружения (масштаб события пропорционален энергии), район Саамского разлома

5. Юкспорское месторождение. Здесь есть две группы событий, произошедших, по всей видимости, под влиянием продвигающихся горных работ.

5.1. Группа событий в лежачем боку рудной залежи: произошли 4 сильных сейсмособытия в разное время, вероятность обнаружения которых составила 6.07.2020 — 0; 4.12.2020 — 0,8; 4.12.2020 — 0,8; 21.05.2021 — 0,4. Первое событие является пропуском цели, поскольку ранее на этом участке в течение года не происходили сильные сейсмические события. В дальнейшем, в случае роста сейсмической активности и возникновения аномалии по комплексу прогностических критериев, вероятность обнаружения сильного сейсмособытия достигает 0,8. Последнее сильное событие произошло несколько в стороне, на этом участке в течение года до его реализации не проявлялись сильные сейсмические события, однако методика расчета учитывает, что зона подготовки сильного события превышает линейные размеры его очага, поэтому при расчете были учтены предыдущие 3 сейсмособытия и значение вероятности обнаружения не 0, как для события 6.07.2020 г., а выше — 0,4.

5.2. Группа событий в районе магистралей Юкспорского рудника М-100–М-200. На этом участке и раньше происходили сильные сейсмические события. Высокие

значения вероятности обнаружения зафиксированы только для событий, произошедших в 2020 г., а для событий, произошедших в 2021 г., значения вероятностей составили 0,2–0,4.

Аналогичные исследования проведены для Расвумчоррского рудника. На рис. 3.25 представлено распределение значений вероятности обнаружения сильного сейсмособытия для фактически произошедших событий.

Количество пропусков цели — 15 (≈38 %); количество попаданий (независимо от величины вероятности) — 25.

На рис. 3.26–3.27 *а* представлены карты сильных сейсмических событий (для разных высотных отметок, Расвумчоррский рудник), цветом обозначены значения вероятности обнаружения события; на рис. 3.27 *б* — кумулятивный график числа сильных сейсмических событий.

Можно выделить несколько групп сейсмических событий.

1. Пропуски цели. В основном такие события произошли в лежачем боку рудной залежи. Местоположение части событий совпадает с геологическими структурами или находится вблизи таких структур: 2 события — на отм. +450 м, Р6–Р7, М200–М300; 3 события — на отм. +530 м вдоль мощной окисленной зоны. Для 6 событий (отм. +310 м, отм. +450 м) нет информации о геологических районах вблизи мест расположения очагов событий. И только 3 пропуска цели — вблизи проводимых горных работ.

2. Участок в районе Р8–Р11, отм. +310 м, отм. +450 м. Здесь сильные события происходят под влиянием проводимых горных работ, а также происходило интенсивное трещинообразование в основании консольного зависания. Зоны влияния сильных событий, приуроченных к фронту работ и к консоли, по расчетным данным пересекаются. Нет ни одного пропуска цели.

3. Участок в районе Р3п–Р6п, М500–М700, все высотные отметки. На гор. +530 м активно ведутся горные работы. События на нижних горизонтах, по-видимому, происходят под влиянием горных работ на вышележащих отметках. Максимальное значение вероятности обнаружения сильного сейсмособытия здесь достигает 0,5; для большинства событий — от 0,1 до 0,3.

4. Участок в районе Р4, М+500, отм. +450 м. Здесь произошли 2 сильных сейсмических события. Значения вероятностей составили 0,4 и 0,6. В этом районе проводятся горные работы, а также он осложнен наличием окисленных зон.

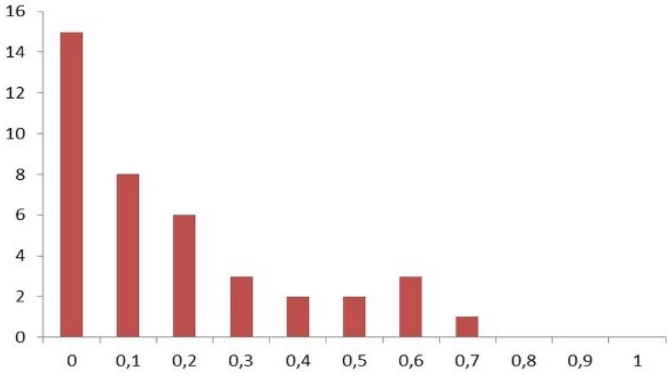
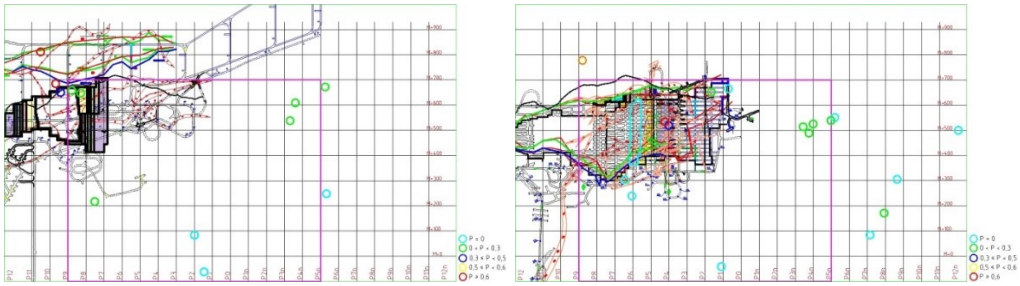
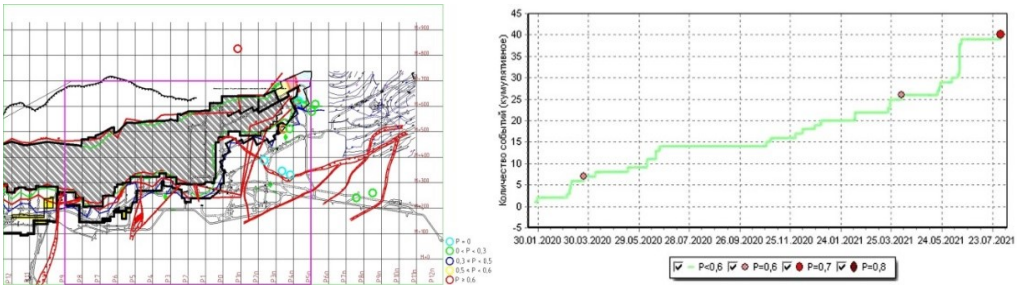


Рис. 3.25. Распределение значений вероятности обнаружения сильного сейсмособытия для фактически произошедших событий на Расвумчоррском руднике



а *б*

Рис. 3.26. Проекция сильных сейсмособытий с учетом значений вероятности обнаружения события: на отм. +310 м (выборка событий: ниже отм. +380 м) (*а*); на отм. +450 м (выборка событий: отм. +380 м – отм. +475м) (*б*)



а *б*

Рис. 3.27. Проекция сильных сейсмособытий на отм. +530 м с учетом значений вероятности обнаружения события (выборка событий: от отм. +475 м и выше) (*а*); временной ход сейсмичности (сильных сейсмособытий); *P* — значение вероятности обнаружения сильного сейсмического события (*б*)

В целом результаты ретроспективной оценки возможности применения вероятностного подхода для среднесрочного прогноза на Расвумчоррском руднике несколько хуже, чем на Кировском руднике. Большое количество событий вблизи проводимых горных работ не являются пропусками цели, тем не менее значения вероятностей обнаружения — менее 0,5.

Представленный подход к среднесрочному прогнозу потенциально опасных участков позволяет дифференцировать массив горных пород на участки с различным уровнем возможной опасности. Однако, как показывают результаты ретроспективной оценки, применение только такого подхода не всегда может быть эффективным. Поэтому в качестве второго этапа выявления потенциально опасных участков предлагается использовать оценку уровня сейсмической опасности по комплексу прогностических критериев.

Ретроспективный анализ уровня сейсмической опасности по комплексу прогностических критериев

Для безопасного ведения горных работ важной задачей является *ежедневная* оценка сейсмической опасности, а для предприятия — и оперативный осмотр выявленных опасных участков. Для этого требуется развитие метода в части

уменьшения объема потенциально опасных участков. Однако необходимо учитывать, что, с одной стороны, объем таких участков должен быть минимальным, с другой, — число спрогнозированных событий должно быть приемлемым.

Для ежедневной оценки сейсмической опасности участков массива горных пород предлагается применение комплексного критерия, а именно построение трехмерных карт сейсмоактивных зон и их ранжирование на основе значений критерия.

С этой целью на примере Кукисвумчоррского месторождения проведен ретроспективный анализ сейсмичности. По данным за 2017 г. рассмотрены 118 сильных сейсмических событий энергетического класса $K = 6 \div 8$. Установлено, что до 90 % сейсмособытий предварялись сейсмической активностью (остальные 10 % — одиночные события). При этом наибольшее число таких сейсмособытий произошло на участках массива, где значения комплексного критерия составили от 0,5 до 0,7. Аномально высокие значения уровня тревоги (более 0,7) встречаются реже, поэтому к этим участкам необходимо повышенное внимание службы прогноза и предотвращения горных ударов предприятия. Например, таким участком на Кукисвумчоррском месторождении уже несколько лет является район Саамского разлома.

Результаты кажутся обнадеживающими. Однако, как показали исследования, в условиях постоянного техногенного воздействия результаты оценки потенциально опасных участков, полученные по данным за разные периоды наблюдений, могут значительно отличаться. В исследовании были рассмотрены все сильные сейсмические события, зарегистрированные на Кировском руднике в 2020–2021 гг.

Для каждого сильного сейсмического события в день его реализации на 0 ч 00 мин рассчитывали значения комплексного критерия и строили трехмерные карты распределения значений. Распределение значений комплексного критерия перед реализацией сильного сейсмического события (Кировский рудник) представлено на рис. 3.28.

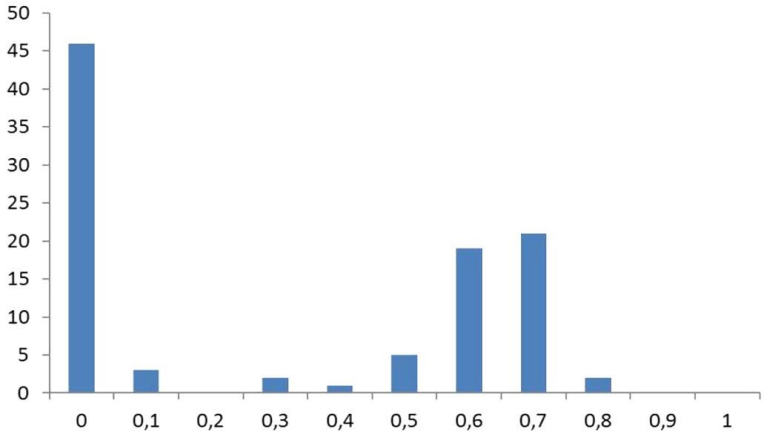


Рис. 3.28. Распределение значений комплексного критерия перед реализацией сильных сейсмособытий

Из 99 сильных сейсмических событий ≈46 % не предварялись сейсмической активностью. Для остальных событий распределение значений комплексного критерия представлено в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Распределение значений комплексного критерия перед сильным сейсмособытием

Значение комплексного критерия	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Доля сильных событий, %	5,7	0,0	3,8	1,9	9,4	35,8	39,6	3,8	0,0	0,0

Таким образом, уровнем тревоги для комплексного критерия, как и ранее, рекомендуется считать диапазон значений 0,5–0,7. Участкам с аномально высокими значениями (более 0,7) необходимо уделять повышенное внимание.

На рис. 3.29 приведена карта сильных сейсмических событий, цветом показаны значения комплексного критерия перед реализацией этих событий.

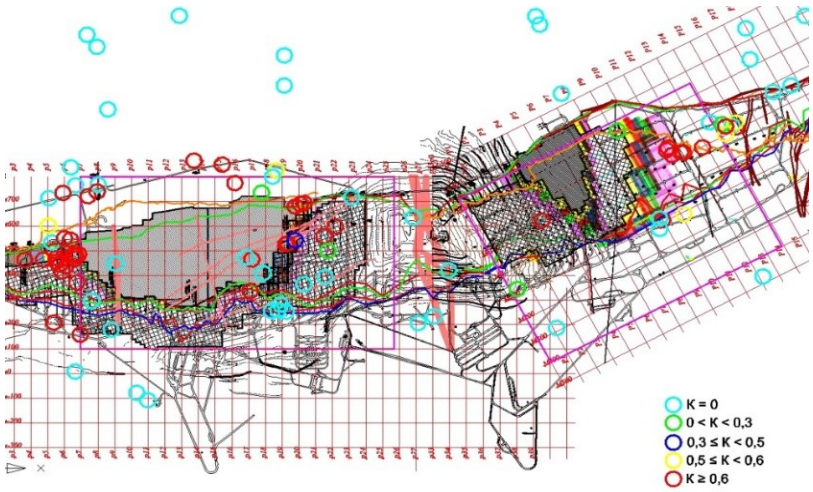


Рис. 3.29. Проекция сильных сейсмособытий на отм. +250 м
с учетом значений комплексного критерия перед проявлением событий

Из данных, представленных на рис. 3.29, видно, что бóльшая часть так называемых пропусков цели, т. е. событий, которые не предварялись повышенными значениями комплексного критерия, расположены за пределами района повышенной точности АСКСМ-К (события в консоли, в лежачем боку рудной залежи, в районе Саамского разлома). По-видимому, представительная энергия событий на этих участках массива отличается от участков массива непосредственно в зоне ведения горных работ. Такая проблема существует и в большой сейсмологии [131].

При этом важным результатом являются высокие значения комплексного критерия перед реализацией большинства сильных сейсмических событий на участках, где активно ведутся горные работы.

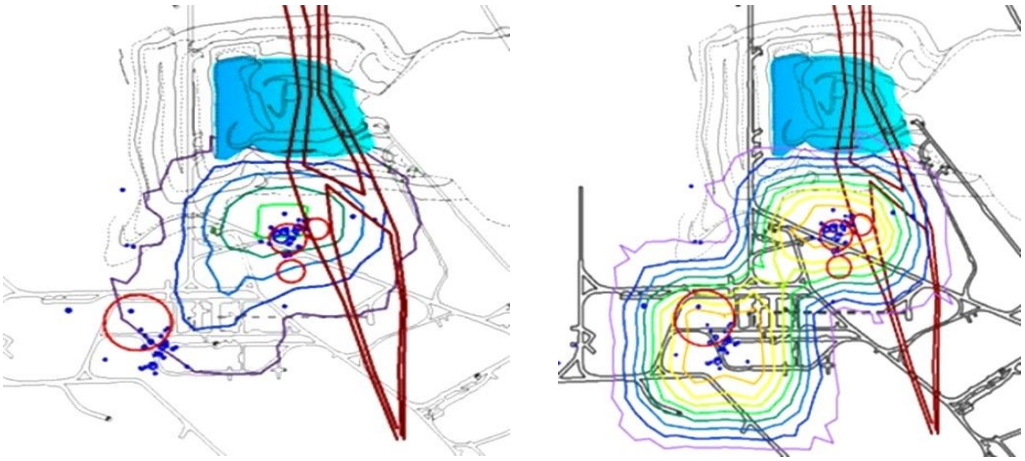
Представляет интерес участок в районе Саамского разлома, где за рассматриваемый период времени ни одно из событий не предварялось повышенным уровнем сейсмической активности. По-видимому, для этого участка необходим отдельный поиск оптимальных параметров расчета как для среднесрочного, так и для краткосрочного прогноза.

В качестве примера далее представлено применение подхода в районе Саамского разлома по данным за 2017 г. По данным за 2020–2021 гг. при таких же параметрах расчета ни одно из событий не было спрогнозировано по результатам краткосрочного прогноза, т. е. не была объявлена тревога по комплексу

прогностических критериев, тогда как по результатам среднесрочного прогноза могут считаться спрогнозированными 4 из 5 событий, как было показано выше (рис. 3.28).

На рис. 3.30 *а* приведена карта вероятностей для среднесрочного прогноза в районе разлома, совмещенная с фактически произошедшими событиями. Вероятность возникновения сильного сейсмического события при наличии аномалии по комплексу прогностических критериев определена с учетом данных о предыдущих сильных сейсмических событиях. Однако при ведении горных работ часто появляются новые сейсмоактивные участки, где ранее не происходили сильные сейсмические события, причем эти участки зачастую проявляются на границе выявленных зон, что отражает процесс продвижения работ. Для таких участков не может быть определено значение вероятности возникновения сильного события даже при наличии аномалии по комплексному критерию.

Представленный пример (рис. 3.30 *а*) свидетельствует о том, что наиболее сильное событие (окружность бóльшего радиуса) произошло на участке, где ранее не были зарегистрированы сильные сейсмические события, поэтому значение вероятности на данном участке не определено (близко к нулю). Однако по результатам оценки динамики комплексного критерия, т. е. при краткосрочном прогнозе (рис. 3.30 *б*), участок, где в дальнейшем произошло сильное событие, определяется как потенциально опасный — изолиниями оконтурена зона с разными уровнями тревоги (до 0,75), а также нанесены эпицентры произошедших сильных сейсмических событий. Для группы сильных сейсмических событий (3 события) участок может быть определен как потенциально опасный как при среднесрочном, так и при краткосрочном прогнозе. Представленные карты построены за несколько дней до реализации этих сейсмособытий.



а *б*

Рис. 3.30. Прогнозные карты, совмещенные с фактически произошедшими событиями: среднесрочный прогноз (*а*); краткосрочный прогноз (*б*)

Аналогичные ретроспективные оценки проведены для Расвумчоррского рудника. Для всех сильных сейсмических событий, зарегистрированных

с 1.01.2020 по 31.08.2021 гг. проведен расчет значений комплексного критерия вблизи местоположения очага события (рис. 3.31).

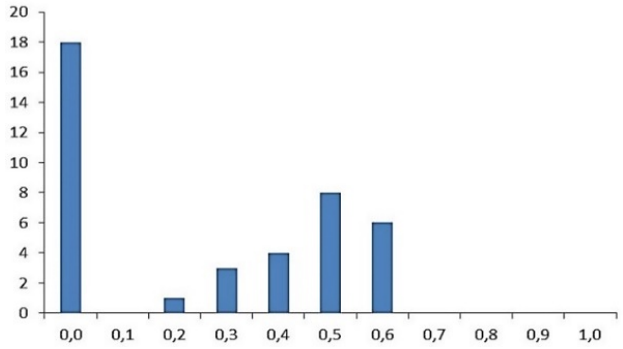


Рис. 3.31. Распределение значений комплексного критерия перед реализацией сильных сейсмособытия

Из 40 сильных сейсмических событий ≈45 % не предварялись сейсмической активностью (примерно так же, как и на Кировском руднике, где таких событий ≈46 %). Для остальных событий распределение значений комплексного критерия представлено в табл. 3.5.

Видно, что на Расвумчоррском руднике уровень тревоги для комплексного критерия по сравнению с Кировским рудником смещен в сторону более низких значений 0,4–0,6. По-видимому, в дальнейшем при проведении прогнозных расчетов необходимо учитывать различные пороговые значения для Кировского и Расвумчоррского рудников.

Таблица 3.5

Распределение значений комплексного критерия перед сильным сейсмособытием

Значение комплексного критерия	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Доля сильных событий, %	0	4,5	13,6	18,2	36,4	27,3	0	0	0	0

На рис. 3.32 представлена карта сильных сейсмических событий, цветом показаны значения комплексного критерия перед реализацией этих событий.

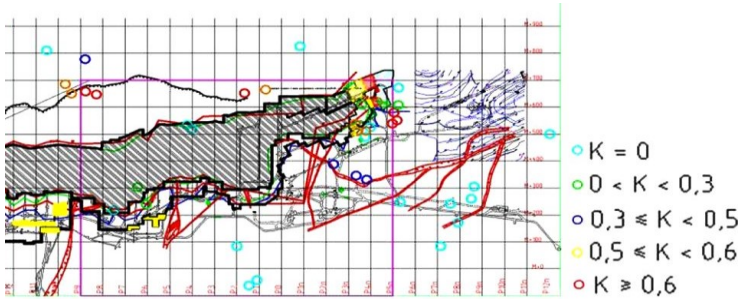


Рис. 3.32. Проекция сильных сейсмособытий на отм. +420 м с учетом значений комплексного критерия перед проявлением событий

Из данных, представленных на рис. 3.32, видно, что бóльшая часть так называемых пропусков цели расположены за пределами района повышенной

точности АСКСМ-Р (2 события в консоли, в лежачем боку рудной залежи, в зоне стыковки подземного рудника с карьером).

На участках вблизи проводимых горных работ на различных высотных отметках сильные сейсмические событий, как правило, предваряются повышенными значениями комплексного критерия.

На сегодняшний день результаты ретроспективной оценки представленной методики позволяют говорить об определении с приемлемой точностью возможного места возникновения сильного события в рамках среднесрочного и/или краткосрочного прогноза. Более точное определение места возникновения сильного события, а также времени его ожидания остается предметом дальнейших исследований.

Методика позволяет выявить сейсмоопасные участки массива горных пород, ранжирование которых по степени опасности и комплексирование с данными других имеющихся методов контроля позволит своевременно планировать профилактические мероприятия, а также принимать оперативные решения.

3.5. Развитие алгоритмов и программных средств анализа прогностических критериев при совместной 3D-визуализации параметров сейсмичности и напряженно-деформированного состояния

Современные методы анализа параметров сейсмичности и НДС массива горных пород должны учитывать пространственно-временные особенности изменения НДС и развития сейсмического процесса.

При анализе результатов моделирования НДС несомненно важной является форма их представления. Двумерное представление, т. е. планы горизонтов и разрезы, является наиболее привычными для горного инженера. Однако во многих случаях трехмерное представление распределения напряжений и деформаций помогает лучше понять причины формирования зон их концентрации.

В двумерном виде значения напряжений удобно изображать в виде изолиний или полей напряжений. В объемном варианте могут быть построены изоповерхности или вектора отдельной компоненты (рис. 3.33).

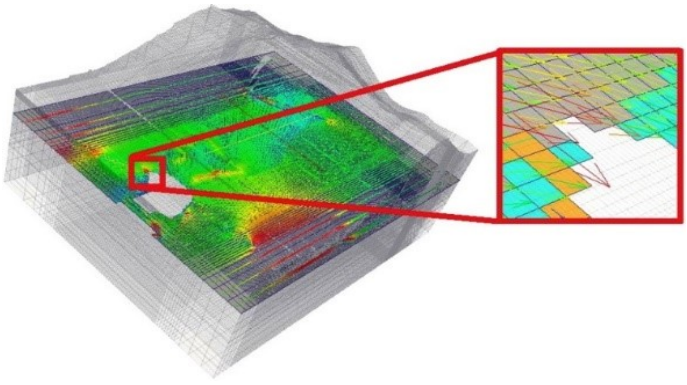


Рис. 3.33. Трехмерное отображение векторов главной компоненты напряжений

В качестве платформы для трехмерной визуализации используется приложение ParaView, которое обладает открытым исходным кодом и достаточным набором фильтров обработки расчетных данных.

Чтобы отобразить напряжения в виде векторов, необходимо по найденному тензору напряжений определить три главных компоненты напряжений (собственные числа) и соответствующие им направляющие косинусы для нормалей к трем главным площадкам (собственные векторы). Сам вектор напряжений получается в результате перемножения полученных значений для каждого из элементов:

$$\overline{\sigma} = eigenvalue(\sigma x, \sigma y, \sigma z) * eigenvector(\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}). \quad (3.9)$$

Полученный вектор значений используется в качестве входных данных фильтра Glyph над основной моделью. По данным визуализации можно определить не только концентрацию полей и значения компонент напряжений, но и пространственное направление векторов напряжений относительно всей модели и каждого элемента в отдельности.

Очевидно, что для практического применения необходима совместная трехмерная визуализация данных: НДС массива горных пород и параметров сейсмического процесса.

Ранее при оценке изменений сейсмического режима проводились расчеты в двумерном варианте для выбранной высотной отметки. В отчетный период разработан алгоритм расчета в трехмерном варианте, а также опробовано программное обеспечение Golden Software Voxler для интерполяции значений и визуализации результатов.

Разработаны алгоритмы, позволяющие проводить построение следующих трехмерных карт:

построение 3D-карт вероятностей возникновения сильных сейсмических событий;

построение 3D-карт зон повышенной сейсмической опасности по комплексу прогностических критериев;

построение 3D-карт распределения значений параметра графика повторяемости сейсмических событий — γ.

Очевидным преимуществом применения трехмерных полей значений является возможность построения разрезов по любой плоскости.

Алгоритм расчета следующий:

1) пространственная область разбивается на элементарные ячейки (тип ячейки: куб, цилиндр или сфера);

2) для каждой ячейки проводится расчет значений параметра с учетом заданных ограничений: временной диапазон; размер ячейки; перекрытие ячеек; минимум событий, участвующих в расчете; диапазон энергетических классов;

3) полученные значения присваиваются центру элементарной ячейки и затем в выбранном программном обеспечении проводится трехмерная интерполяция значений и 3D-визуализация.

Проведенный ретроспективный анализ показал, что для условий хибинских апатитовых рудников применимы только два варианта элементарных ячеек: куб или цилиндр (высота цилиндра — ось *Z*, т. е. высотные отметки). Причем отличие

между кубическими и цилиндрическими ячейками визуально не всегда заметно. Отметим, что авторы работы [132] при исследовании данных о сейсмичности Хибинского массива также оперируют пространственными ячейками цилиндрической формы: в качестве модели области, где с заданной вероятностью ожидаются повторные точки, инициированные сейсмическими событиями или взрывами, принят цилиндр, радиус и высота которого определяются исходя из ожидаемого числа инициированных толчков, распределенных по пространству степенным образом.

При таком подходе, к сожалению, в 3D-варианте визуализации сейсмически опасные участки зачастую выглядят в виде изоповерхностей, по форме близких к цилиндру. Решением проблемы могло бы стать применение сферических ячеек, но в таком случае получается отрицательный результат, поскольку сейсмических событий, попадающих в ячейку, зачастую недостаточно для расчета. Видимо, это связано с особенностями регистрации сейсмической активности и погрешностью по высотной отметке. Применение сферической ячейки приводит к отбрасыванию большой части событий, в результате чего не удается провести расчеты значений различных критериев.

Для совместной визуализации данных о распределении напряжений и о параметрах сейсмичности опробованы два способа.

Первый способ заключается в следующем.

1. Результаты расчета параметров сейсмичности импортируютсяв программу GS Voxler.

2. Инструментами GS Voxler проводится интерполяция и 3D-визуализация поверхности.

3. Каркасы изоповерхностей экспортируются в формат dxf и затем импортируются в ParaView.

Второй способ совместной визуализации позволяет не использовать программу GS Voxler, а сразу импортировать результаты расчета параметров сейсмичности в ParaView, что с практической точки зрения является более удобным вариантом.

Преимуществом программы Voxler является возможность построения разрезов по любой, в том числе наклонной плоскости. Также важным моментом для оценки эффективности предлагаемых методов определения потенциально опасных участков является вычисление объемов изоповерхностей. Поэтому на сегодняшний день нами применяются оба подхода в зависимости от решаемой задачи.

На рис. 3.34 на примере Кировского рудника показано применение совместной визуализации выявленных потенциально опасных участков, данных о фактически произошедших событиях и о распределении НДС массива горных пород.

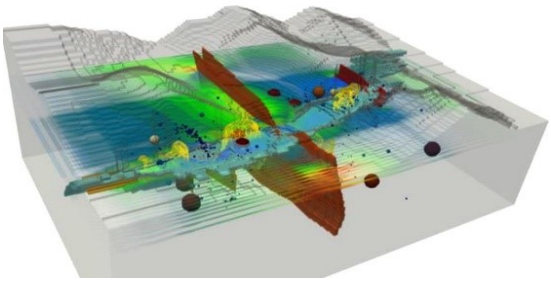


Рис. 3.34. Совместная визуализация выявленных потенциально опасных участков, данных о фактически произошедших сейсмических событиях и распределении НДС массива горных пород

Технические аспекты визуализации

Для наилучшего отображения и дальнейших манипуляций с данными о сейсмичности (например, данные об отдельных событиях в виде текстового файла с разделителями или данные об изоповерхностях, соответствующих потенциально опасным участкам, в виде файлов формата dxf (Drawing eXchange Format)) их необходимо преобразовать в формат vtk (Visualization Toolkit). Кроме того, программный продукт ParaView на сегодняшний день не позволяет импортировать файлы формата dxf. Поскольку такие данные широко используются (импортироваться могут не только изоповерхности, а также чертежи, содержащие планы горных работ), было принято решение реализовать эту необходимость по средствам другого формата — obj (формат файлов описания геометрии 3D-модели). Этот формат, по аналогии с dxf, позволяет отображать вершины, линии и изолинии, что вполне достаточно для корректного отображения планов горных работ в объемной постановке. Был разработан собственный программный модуль конвертации dxf-чертежей в файл формата obj, т. к. готового программного решения найдено не было. Данное решение позволило упростить пространственное соотнесение данных моделирования НДС и сейсмических данных.

Данные сейсмических событий представляют собой точки в пространстве с датой регистрации события и его энергией. В случае отображения их в виде сфер большое число мелких по количеству высвобожденной энергии событий визуально перекрывают куда более масштабные сейсмические события. Причем на фоне объемной геомеханической модели НДС массива, которая представляет собой конечно-элементную сетку, в свою очередь, раскрашенную по градиенту напряжений, визуально мелкие события практически не видны. Поэтому было принято решение использовать логарифмическое преобразование для выделения более масштабных событий.

Поскольку каждому сейсмическому событию соответствует конкретное время его регистрации, с помощью инструмента анимации возможно создание видеоряда, который в большей степени может продемонстрировать возникновение очагов сейсмических событий и изменение НДС массива горных пород при ведении горных работ. Аналогично и для поля значений параметров сейсмического процесса: возможно создание видеоряда для отслеживания изменений, например, потенциально сейсмоопасных участков.

3.6. Разработка и апробация методических подходов к прогнозу опасных геодинамических явлений с учетом параметров сейсмичности, техногенных полей напряжений, геологических и геомеханических особенностей массива горных пород

В рамках данной задачи проводился анализ фактически произошедших геодинамических явлений на рудниках для выявления закономерностей параметров сейсмичности, техногенных полей напряжений и геологических и геомеханических характеристик массива горных пород на локальном участке или на месторождении в целом, до и после реализации геодинамических явлений. Такой ретроспективный анализ является важным этапом для разработки методических подходов к прогнозу

опасных геодинамических явлений. Разбор уже произошедшего геодинамического явления с точки зрения прогноза уже не представляет интереса для горнодобывающего предприятия. Однако научные аспекты ретроспективного анализа и поиска возможных предвестников геодинамических явлений сомнения не вызывают.

Известно, что активизация техногенной сейсмичности — это результат совместного влияния целого ряда факторов: геологических (строение массива), топографических (рельеф местности), геодинамических (тектонические процессы), антропогенных (горные работы), гидрогеологических (обводненность массива пород), метеорологических (резкие перепады температуры). На диаграмме связей (рис. 3.35) показаны основные потенциальные причины рассматриваемой проблемы изменения сейсмической активности исследуемых апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива.

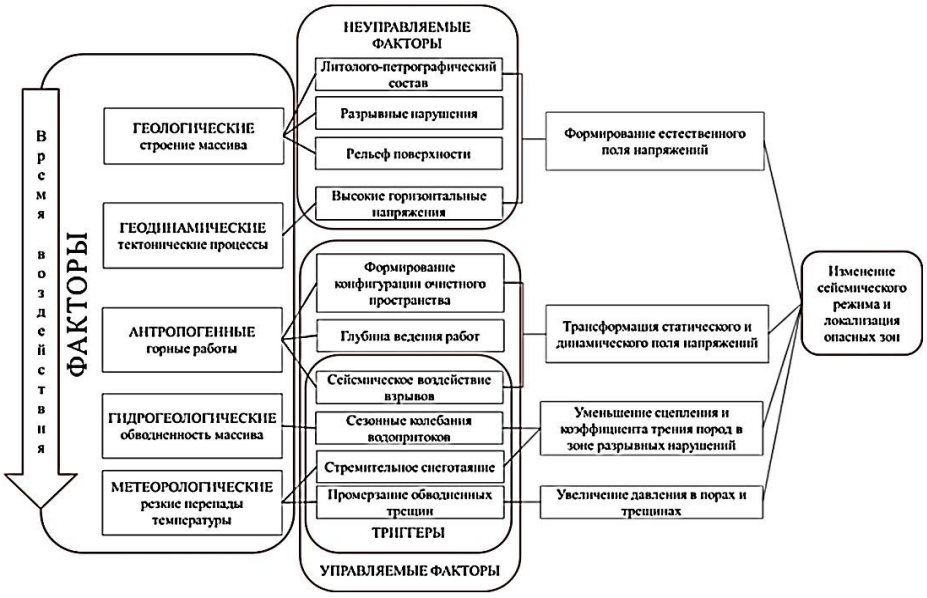


Рис. 3.35. Факторы, влияющие на изменение сейсмической активности отрабатываемых месторождений Хибинского массива

В большинстве случаев проявлению динамических явлений способствует совокупное влияние этих факторов, влияние одного из которых может являться основным триггером. Как общее, так и отдельное влияние каждого фактора ведет к изменению деформационных характеристик отрабатываемого месторождения в большей или меньшей степени, а следовательно, — к изменению поля напряжений в массиве.

К *геологическому* фактору относится строение массива горных пород, определяющее его прочностные свойства и их переменчивость, а также перепад высот поверхности.

На формирование поля напряжений влияют тектонические процессы (*геодинамический* фактор).

К *антропогенному* фактору относятся горные работы (глубина, темпы, технология), которые приводят к перераспределению полей напряжений на участках шахтного

поля, образованию пустот, раскрытию трещин, а в целом — к разрушению этого участка массива горных пород и изменению сейсмичности.

Гидрогеологический фактор определяет водонасыщенность массива. Сезонная обводненность влияет на активизацию сейсмической активности вследствие изменения трещинно-порового давления (при заполнении пустот и трещин в массиве) и изменения сцепления и коэффициента трения в системе блок-разлом (при перенасыщении водой разрывных нарушений).

Метеорологический фактор включает резкие перепады температуры воздуха. Промерзание или оттаивание заполненных водой трещин изменяет давление в них, что способствует смещению блоков породы, находящихся в предельном состоянии.

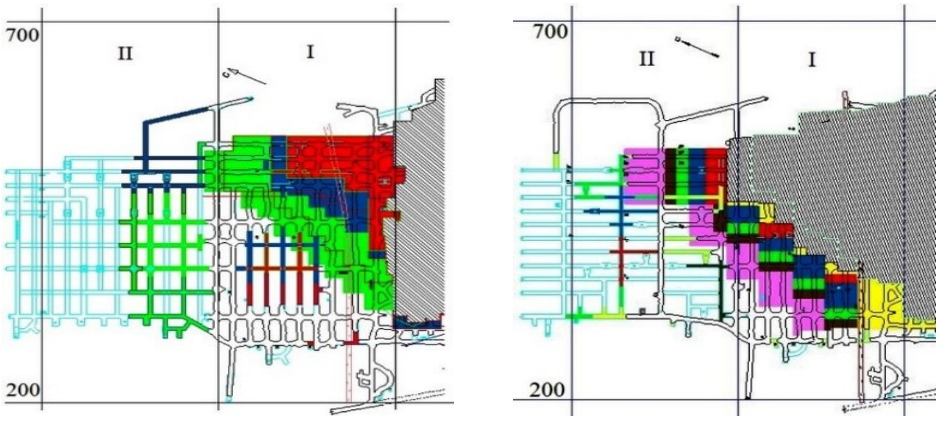
В рамках нашего исследования такие факторы, как влияние лунно-солнечной активности, атмосферного давления и других внешних воздействующих полей [133, 134] приняты как слабо влияющие на изменение сейсмического режима Хибинского массива и не учитываются.

Для исследования были выбраны наиболее сейсмически опасные участки Кировского рудника: Кукисвумчоррское месторождение, бл. 4/7 и 7/10 и Юкспорское месторождение, блок 7/12. Проведен детальный анализ активизации сейсмичности и влияющих факторов.

Кукисвумчоррское месторождение, блоки 4/7 и 7/10

Наиболее опасная ситуация при отработке Кукисвумчоррского месторождения наблюдалась в бл. 4/7 и 7/10 в разные периоды времени по мере их отработки [135].

Рост сейсмической активности в блоке 7/10 (рис. 3.36, участок I) наблюдается с 2013 г. и связан со сложными горно-геологическими условиями.



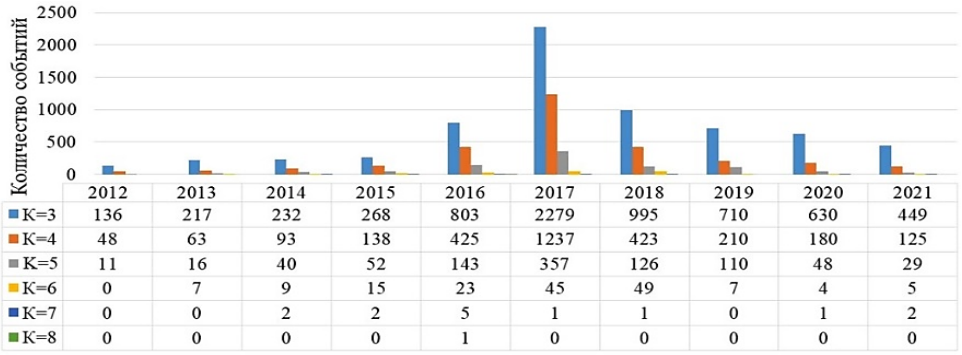
а *б*

Рис. 3.36. Схема горных работ на отм. +236 м Кукисвумчоррского месторождения с разделением исследуемой зоны на два участка, длина участка по простиранию рудного тела — 192 м (отмечено I и II): для 2016–2018 гг. (*а*); для 2020 г. (*б*). Цветом показан порядок развития добычных и проходческих работ: *а* — красным — в 2016 г., синим — в 2017 г., зеленым — в 2018 г.; *б* — поквартально — в 2020 г., серым — очистное пространство на конец 2019 г.

Под влиянием комплекса различных горно-геологических факторов произошел переход сейсмичности на более высокий масштабный уровень: стали происходить

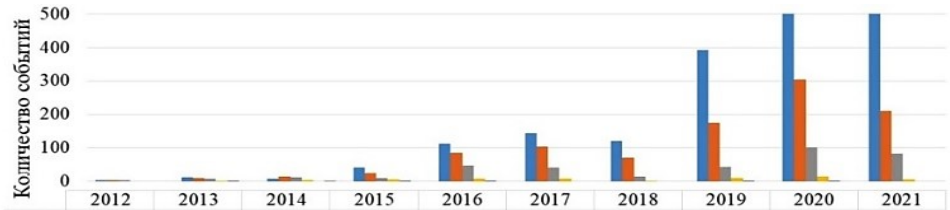
сейсмические события энергетического класса K = 6. Значительная активизация сейсмичности отмечается с 2014 г.: общее количество зарегистрированных сейсмособытий увеличилось на несколько десятков и добавились события K = 7 (рис. 3.37 *а*). 27 января 2016 г. была зафиксирована повышенная сейсмоактивность на участке I на гор. +170 м, которая сопровождалась динамическими проявлениями горного давления в выработках от шелушения до интенсивного динамического заколообразования. Наибольшие нарушения и многочисленные заколы были выявлены на третьем подэтаже гор. +170 м (отм. +236 м). Событие классифицировано как микроудар, причиной которого являлись действие высоких тектонических напряжений в массиве, наличие зоны опорного давления от очистных работ гор. +250 м и влияние консоли вышележащих покрывающих пород [104].

В блоке 4/7 (рис. 3.36, участок II) активизация сейсмичности наблюдается также с 2014 г. (рис. 3.37 *б*) — отмечается рост числа сейсмических событий и их энергии. На границе исследуемых участков зарегистрировано сейсмособытие энергетического класса K = 8. В последующие годы ситуация только усугубляется: количество событий увеличивается из года в год, что особенно заметно в 2019 г.



	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
K=3	136	217	232	268	803	2279	995	710	630	449
K=4	48	63	93	138	425	1237	423	210	180	125
K=5	11	16	40	52	143	357	126	110	48	29
K=6	0	7	9	15	23	45	49	7	4	5
K=7	0	0	2	2	5	1	1	0	1	2
K=8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

а



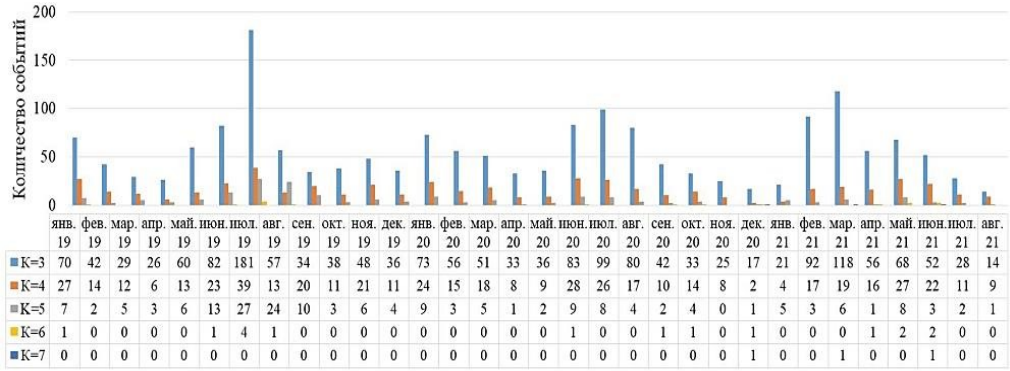
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
K=3	5	12	8	41	113	143	120	392	869	657
K=4	4	10	15	25	86	104	70	176	304	211
K=5	3	8	12	11	48	42	15	44	103	84
K=6	0	1	3	6	8	9	2	11	14	7
K=7	0	1	0	1	2	0	0	1	2	0
K=8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

б

Рис. 3.37. Распределение событий по энергетическим классам для исследуемых участков рудника: участок I (бл. 7/10) (*а*); участок II (бл. 4/7) (*б*)

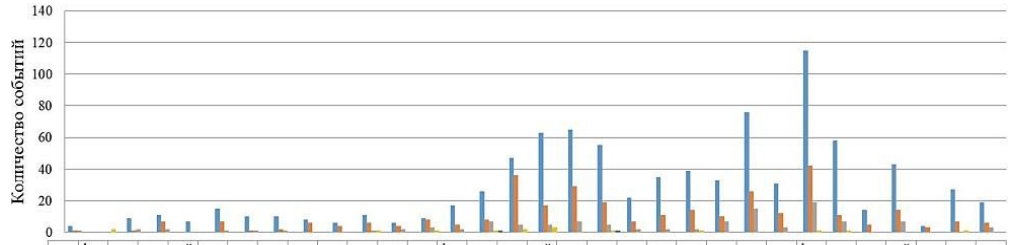
Первая существенная активизация сейсмичности наблюдалась в ноябре 2019 г., когда после большого перерыва произошло событие энергетического класса K = 6. Затем, после незначительного затишья в декабре, произошел рост сейсмической

активности: увеличилось число зарегистрированных событий всех энергетических классов. В дальнейшем активизация сейсмичности продолжилась. В марте и начале апреля произошло 3 сильных сейсмособытия энергетического класса $K = 6$ и 1 энергетического класса $K = 7$ (рис. 3.38). 8 апреля 2020 г. на отм. +248 м бл. 4/7 (участок II) было зарегистрировано сейсмическое событие $K = 6$, после которого были зафиксированы множественные изменения контуров горных выработок: по кровле одной из выработок выявлено нарушение набрызг-бетонного крепления и заколообразование в районе структурных нарушений; на подошве соседней выработки — изометричные обломки горной массы, обусловленные отслоением по геологическим трещинам; обрушение кусков горной массы, сформированных в зоне отжима от раннее обуренной строчки разгрузочных скважин; увеличение трещин в набрызг-бетонной крепи в целиках между выработками; очаговые нарушения набрызг-бетонной крепи по западной пяте свода выработки. Отмечается падение заколов по кровле, которое произошло в течение короткого времени, вероятно, вследствие толчка, спровоцированного сильным сейсмическим событием, подготовка которого, по-видимому, заняла длительный промежуток времени.



	янв.	фев.	мар.	апр.	май.	июн.	июл.	авг.	сен.	окт.	ноя.	дек.	янв.	фев.	мар.	апр.	май.	июн.	июл.	авг.	сен.	окт.	ноя.	дек.	янв.	фев.	мар.	апр.	май.	июн.	июл.	авг.
	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	21	21	21	21	21	21	21	21
K=3	70	42	29	26	60	82	181	57	34	38	48	36	73	56	51	33	36	83	99	80	42	33	25	17	21	92	118	56	68	52	28	14
K=4	27	14	12	6	13	23	39	13	20	11	21	11	24	15	18	8	9	28	26	17	10	14	8	2	4	17	19	16	27	22	11	9
K=5	7	2	5	3	6	13	27	24	10	3	6	4	9	3	5	1	2	9	8	4	2	4	0	1	5	3	6	1	8	3	2	1
K=6	1	0	0	0	0	1	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	2	2	0	0
K=7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0

а



	янв.	фев.	мар.	апр.	май.	июн.	июл.	авг.	сен.	окт.	ноя.	дек.	янв.	фев.	мар.	апр.	май.	июн.	июл.	авг.	сен.	окт.	ноя.	дек.	янв.	фев.	мар.	апр.	май.	июн.	июл.	авг.
	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	21	21	21	21	21	21	21	21
K=3	4	0	9	11	7	15	10	10	8	6	11	6	9	17	26	47	63	65	55	22	35	39	33	76	31	115	58	14	43	4	27	19
K=4	1	0	1	7	0	7	1	2	6	4	6	4	8	5	8	36	17	29	19	7	11	14	10	26	12	42	11	5	14	3	7	6
K=5	1	0	2	2	0	1	1	1	0	0	1	2	3	2	7	5	5	7	5	2	2	2	7	15	3	19	7	0	7	0	0	3
K=6	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	2	3	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
K=7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

б

Рис. 3.38. Распределение событий по энергетическим классам: участок I (бл. 7/10) (*а*); участок II (бл. 4/7) М+350÷М+550, отм. +195÷+300 м (*б*)

На рис. 3.38 представлена диаграмма ежемесячного распределения событий по энергетическим классам. Видно, что выделяются два месяца с наивысшими пиками по суммарному числу событий — это июнь и февраль. В июле наблюдалось снижение суммарного числа событий, но при этом увеличение их энергии — произошло наибольшее число сильных событий энергетического класса $K = 6$, произошел микроудар.

В феврале отмечается наибольшее суммарное число событий всех энергетических классов от $K = 3 \div 5$, а также произошло одно сильное событие. После снижения добычной деятельности в январе 2021 г., по-видимому, произошло накопление упругой энергии в массиве горных пород, что наблюдается в ее высвобождении в бóльшем количестве в виде сейсмической энергии одновременно с интенсификацией добычной деятельности в феврале 2021 г.

Из графиков отчетливо виден существенный ежемесячный рост сейсмической активности в июне и июле 2019 г. и начиная с февраля 2020 г. В связи с этим рассмотрены техногенные факторы, спровоцировавшие активизацию сейсмичности такие, как взрывы при проходке горных выработок и добычных работ, а также природные, поскольку не исключено влияние сезонной повышенной обводненности массива горных пород в период интенсивного снеготаяния и дождей.

На графиках (рис. 3.39) представлено сопоставление данных об объемах водопритока по горизонтам и числа сейсмических событий, зарегистрированных на рассматриваемом участке, за 2019 и 2020 гг. Видно, что и в 2019 г., и в 2020 г. значительный рост обводненности наблюдается в мае на гор. +170 и +250 м, после чего через некоторое время происходило увеличение числа событий.

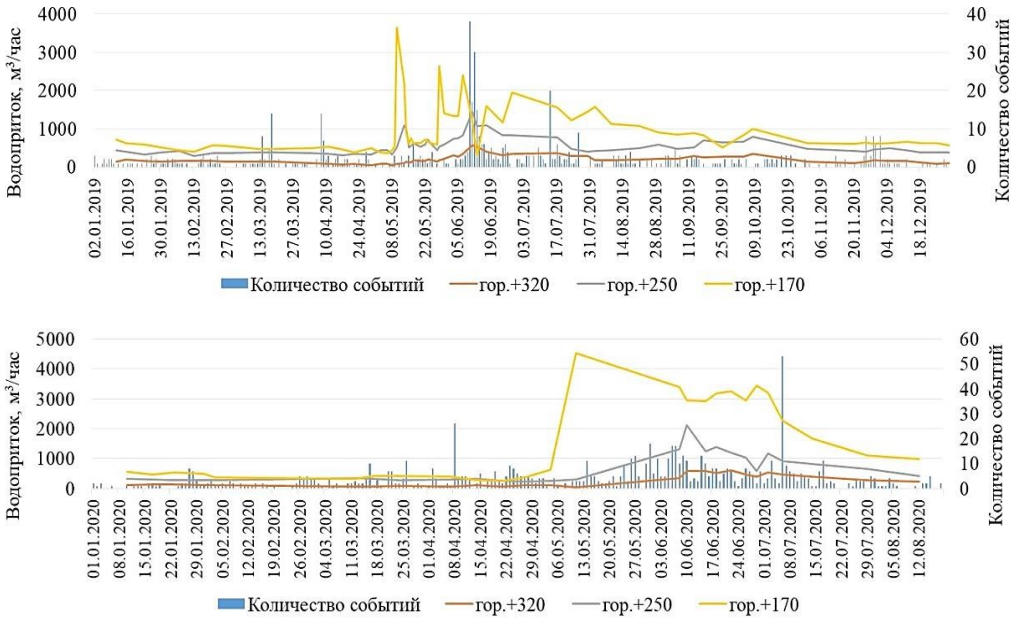


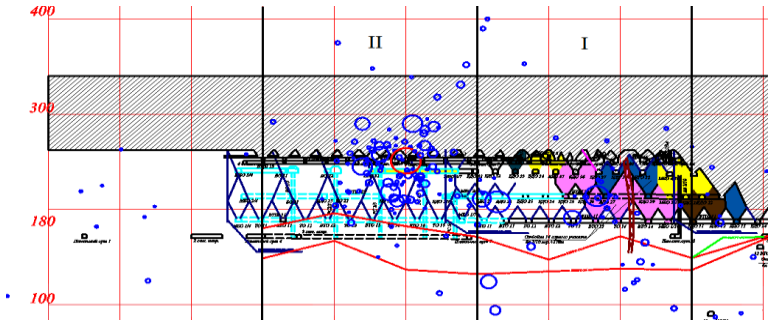
Рис. 3.39. Ежесуточное распределение количества сейсмических событий и объемов рудничного водопритока (2019 и 2020 гг.)

Несмотря на проводимые специалистами горнодобывающего предприятия профилактические мероприятия по приведению выработок в неудароопасное

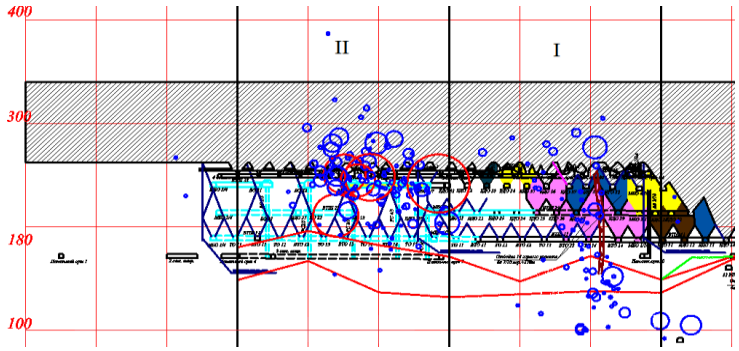
состояние (было возведено комбинированное крепление), в результате сильного сейсмического события (энергетический класс $K = 6$, 08.04.2020 г.) произошла потеря устойчивости массива, следствием которой стали нарушения контуров выработок.

Состояние массива, вмещающего эти выработки, характеризуется действием повышенных значений сжимающих напряжений и осложнено наличием системы трещин. По-видимому, резкое изменение уровня напряжений при проведении взрывных работ нашло выход в наиболее слабом месте, которое пришлось на соседнюю выработку и реализовалось в виде мгновенной подвижки по одной из трещин.

На рис. 3.40 показана проекция произошедших сейсмических событий на разрез по М+450 (выборка по магистрали от М+400 до М+500). Наибольшее количество событий приурочено к участку II. Видно, что и количество сейсмических событий, и их энергия в начале 2020 г. увеличились по сравнению с 2019 г.



а



б

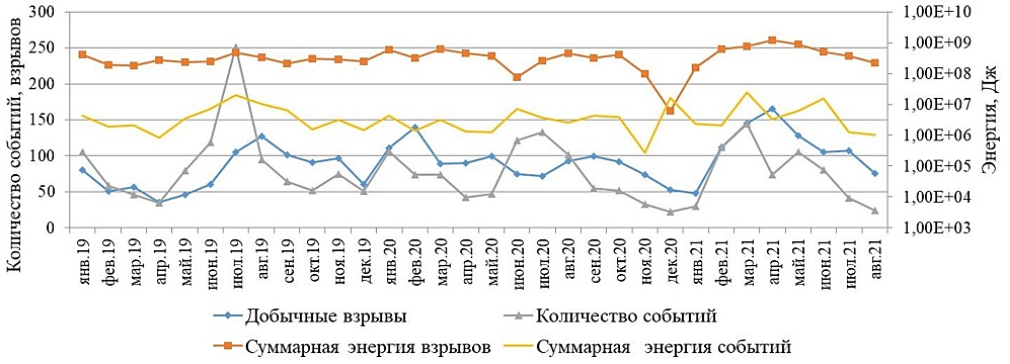
Рис. 3.40. Проекция сейсмических событий на разрез по М+450 м: *а* — 2019 г.; *б* — 2020 г.

Такая активизация сейсмичности могла быть спровоцирована совместным влиянием тектонических, геомеханических и технологических факторов.

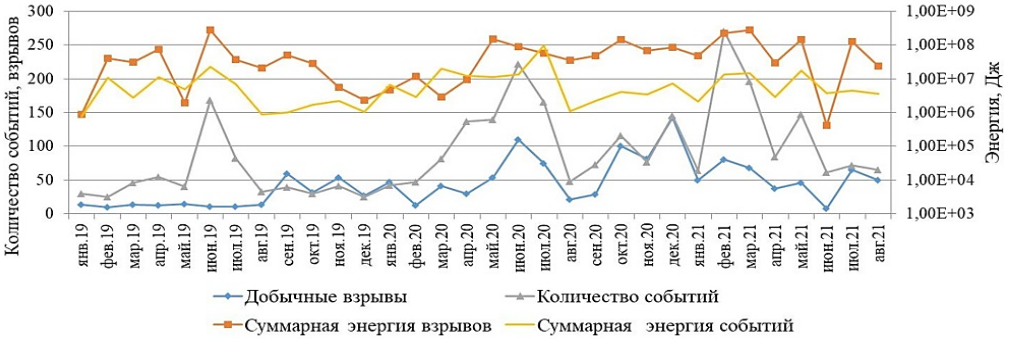
Сопоставление результатов сейсмического мониторинга с данными о проводимых взрывных работах на исследуемом участке показало, что в день активизации сейсмичности 25 ноября 2019 г. был проведен проходческий взрыв. В этот же день было зарегистрировано событие $K = 6$ (расстояние между взрывом и событием — около 26 м). В дальнейшем 26–27 ноября 2019 г. также проводились взрывные работы.

На рис. 3.41 представлено соотношение количества произведенных взрывов с количеством произошедших естественных событий. Прослеживается тенденция

роста или снижения числа событий при росте или снижении произведенных взрывов соответственно.



а



б

Рис. 3.41. График соотношения количества произведенных взрывов с количеством произошедших естественных событий и выделившейся сейсмической энергии: *а* — для участка I (бл. 7/10); *б* — для участка II (бл. 4/7)

Очередная активизация сейсмичности отмечалась в период с 25 февраля по 2 марта 2020 г., которая напрямую не связана со взрывными работами (в этот период только 26 февраля 2020 г. был произведен один маломощный добычной взрыв), т. е. проведение взрывных работ на данном участке было приостановлено, однако массив все еще находился в неустойчивом состоянии, т. к. происходило перераспределение напряжений.

Последующая активизация сейсмичности в конце марта 2020 г. может быть продолжением начавшегося в феврале процесса перераспределения напряжений, который был ускорен очередными взрывными работами на участке II (бл. 4/7). Сильные сейсмические события (энергетического класса $K = 6 \div 7$) произошли в основном через несколько часов после взрывных смен, кроме последнего события 08.04.2020 г., которое было зарегистрировано через несколько минут после 2 проходческих взрывов на этом участке. После этого события до 10.04.2020 г. наблюдалась серия афтершоков, было зафиксировано 39 событий.

Отметим, что число взрывов при проходке выработок примерно в 1,5 раза меньше числа взрывов при добычных работах, при этом их суммарная энергия больше суммарной энергии взрывов при добычных работах почти в 3,5 раза.

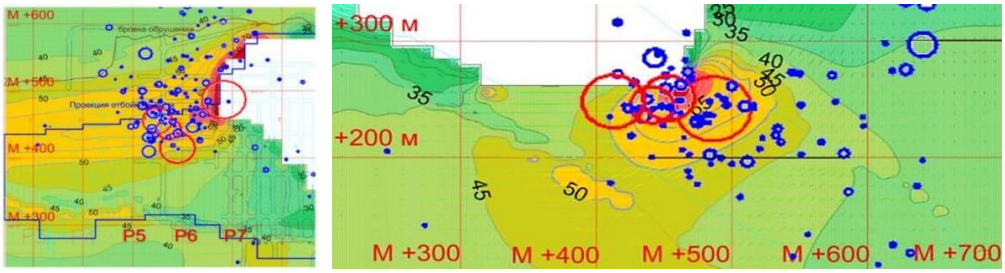
Таким образом, постоянное взрывное воздействие на массив горных пород и сложная горно-геологическая обстановка привели к росту сейсмичности в исследуемом блоке.

В бл. 7/10 также проводились взрывные работы в 2019–2020 гг. Существенного отклика массива горных пород на взрывное воздействие не наблюдается. За период декабрь 2020 — февраль 2021 гг. произошли 2 сильных сейсмических события вблизи разломной структуры. Отметим, что ранее вблизи данной геологической структуры происходили события сдвигового типа. К сожалению, начиная с 2019 г. информация о механизмах очага событий в ГоИ КНЦ РАН не передается.

Рост сейсмичности на исследуемых участках (бл. 4/7 и 7/10) связан не только с интенсивным ведением горных работ, но и в большей степени с горно-геологическими условиями. Осложняющими факторами также являются высокая изрезанность массива выработками, пройденными перпендикулярно действию максимальных сжимающих напряжений.

Более точно оценить геомеханическое состояние массива горных пород и потенциальную опасность динамических явлений позволяет совместный учет результатов сейсмических наблюдений и результатов численного моделирования НДС массива. Участки с высоким уровнем сейсмической активности и с повышенным уровнем действующих напряжений могут быть отнесены к потенциально удароопасным, что может быть учтено при разработке соответствующих мероприятий и повысит безопасность горных работ.

На рис. 3.42 *а* представлена проекция сейсмических событий, произошедших в марте и начале апреля 2020 г., совмещенная с данными о распределении напряжений на участке массива на апрель 2020 г. Наиболее мощное сейсмическое событие произошло в марте 2020 г. в районе наибольшей концентрации напряжений. Остальные сильные события также произошли на участках с повышенными значениями напряжений, но их уровень ниже, чем на участке вблизи границ очистного пространства. Эти события произошли на участке массива, где осуществляется проходка выработок. При взрывном воздействии происходит перераспределение напряжений в массиве горных пород, что на данном участке привело к реализации сильных сейсмических событий.



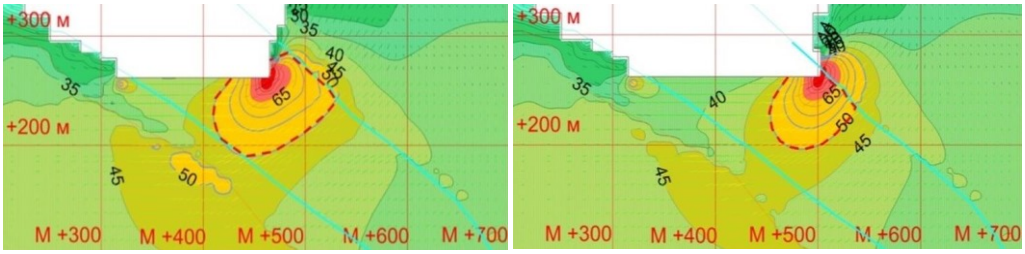
а *б*

Рис. 3.42. Проекция сейсмических событий (март – начало апреля 2020 г.) и распределение максимальных сжимающих напряжений на апрель 2020 г.: *а* — на отм. +236 м; б — на разрез 6

Ранее было установлено, что наиболее вероятной причиной увеличения сейсмоактивности в блоке 7/10 и произошедшего 27.01.2016 г. микроудара являются проходческие работы на отм. +236 м в зоне опорного давления от очистных работ вышележащего горизонта. В блоке 4/7 нарушение приконтурной части массива было вызвано рядом схожих факторов: влиянием высоких сжимающих

напряжений в зоне опорного давления от очистных работ гор. +252 м и разрушением склонного к хрупкой деформации массива под воздействием подвижки, которая, возможно, была спровоцирована технологическими взрывами. К осложняющим факторам можно отнести высокую изрезанность массива выработками, пройденными перпендикулярно действию максимальных сжимающих напряжений. К улучшению ситуации может привести снижение взрывного воздействия на массив горных пород, поскольку высока вероятность того, что в сложившихся условиях один из взрывов способен стать триггером сильного сейсмического события, последствия которого можно минимизировать профилактическими мероприятиями.

Региональным мероприятием, способным привести к существенной разгрузке массива, является отбойка запасов треугольника висячего бока по вышележащему гор. +250 м. Эффективность этой меры подтверждена прогнозным моделированием НДС (рис. 3.43). Чем дальше в висячий бок продвинется фронт работ по гор. +250 м, тем сильнее уменьшится зона опасной концентрации напряжений в пределах рудного тела.



а *б*

Рис. 3.43. Сокращение площади зоны концентрации σ_{max} в зоне активного ведения горных работ после отбойки запасов треугольника висячего бока по вышележащему гор. +250 м: фактическое состояние горных работ (*а*); после отбойки запасов висячего бока на гор. +250 м (*б*)

Также для дополнительной разгрузки массива было предложено бурение строчки глубоких скважин, это способствует уменьшению действующих сжимающих напряжений в окрестности выработок висячего бока до величин ниже половины прочности пород на сжатие ($б_{д.} < 0{,}5\ б_{сж.}$).

Таким образом, в высоконапряженных участках Кукисвумчоррского месторождения к существенной активизации сейсмичности приводит совместное действие факторов: геодинамических, антропогенных и гидрогеологических. На участках наиболее высокой концентрации напряжений в зоне влияния консоли вышележащих пород с существенной тектонической и техногенной нарушенностью массив горных пород является более чувствительным к динамическому воздействию технологических взрывов при проходке горных выработок.

Выявление зон повышенной чувствительности к взрывному воздействию на основе прогнозов НДС и сейсмичности позволит при необходимости своевременно скорректировать планы развития горных работ, а также снизить

в этих локальных зонах динамическую нагрузку на массив оперативно проведенными профилактическими мероприятиями.

Юкспорское месторождение, блок 7/12

19.02.2021 г. в 04:51:42 на Юкспорском крыле Кировского рудника АСКСМ-К произошло сильное сейсмическое событие (энергия — 1,72·106 Дж), высотная отметка — +288 м. После основного толчка произошла серия афтершоковых сейсмических событий (максимальня энергия — 4,27·103 Дж). Событие классифицировано как микроудар.

Специалистами предприятия по результатам осмотра выработок выявлено:

— 312 БДШ между 37 ВТО и 3/12 МБО ВТО, в интервале 30–42 м от сопряжения 37 ВТО/312 БДШ по юго-восточной стенке: нарушение комбинированного крепления в районе дайки, обрушение горной массы в объеме 2–3м^3;

— 3/12 МБО заезд в 312 БДШ нарушение набрызг-бетонного крепления, обрушение горной массы с сектора разгрузочной строчки в объеме 0,25 м^3.

Сложные геомеханические условия рассматриваемого участка связаны с его нахождением в зоне опорного давления от очистного пространства отм. +337 м, бровки обрушения покрывающих пород, наличием на участке, подверженному разрушению, крутопадающей высокопрочной мелкозернистой мончикитовой дайки и приуроченной к ее контакту с линзовидно-полосчатыми рудами зоны интенсивной трещиноватости.

Согласно данным моделирования напряжения вблизи очистных забоев достигают 70 МПа, в зоне опорного давления от отм. +337 м, куда попадает поврежденный участок, — 50–55 МПа.

На рис. 3.44 представлена выборка сейсмических событий, произошедших с 01.01.2021 г. по 20.02.2021 г. в диапазоне высотных отметок от +250 до +400 м. Высокий уровень сейсмической активности наблюдается в районе продвигающегося фронта работ в подконсольной части покрывающих пород. Одиночное сильное событие 5 января 2021 г. произошло на значительном удалении от рассматриваемого участка. Два сильных события произошли непосредственно в бл. 7/12.

Проведен ретроспективный анализ изменений сейсмического режима на этом участке. На рис. 3.45 показана динамика числа сейсмических событий по месяцам. Активизация сейсмичности в 2019 г. происходила с марта по июль, сильных сейсмических событий зарегистрировано не было. Затем длительное время уровень сейсмичности можно считать фоновым, происходили одиночные сейсмические события, менее 10 в месяц. Активизация сейсмичности наблюдается с ноября 2020 г. Максимальное количество событий произошло в декабре 2020 г. В январе наблюдается некоторое затишье, а в феврале произошел микроудар, причем в стороне от наиболее сейсмически активного участка. В дальнейшем сейсмическая активность на этом участке снизилась.

С точки зрения выявления потенциально опасных участков массива горных пород построены карты вероятностей возникновения сильного сейсмического события (рис. 3.46) при наличии аномалии по комплексу прогностических критериев (на 01.02.2021 г., время действия — 1 мес.), совмещенная с сейсмическими событиями, произошедшими в феврале 2021 г., а также построено распределение значений комплексного критерия на 19.02.2021 г.0 ч 00 мин, т. е. менее чем за 5 ч до проявления сильного события, совмещенное с сейсмическими событиями, данные о которых учитывались в расчете (рис. 3.47 *а*). На рис. 3.47 *б* распределение значений комплексного критерия совмещено с фактически произошедшими событиями.

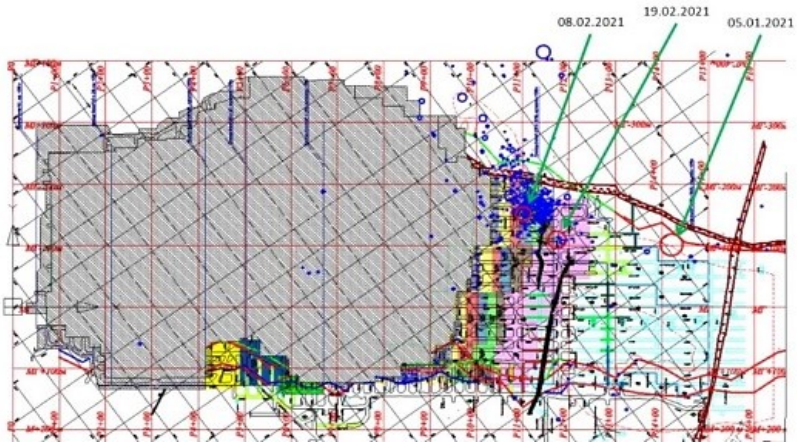


Рис. 3.44. Выборка сейсмических событий, период 01.01.2021–20.02.2021, отм. +250–+400 м

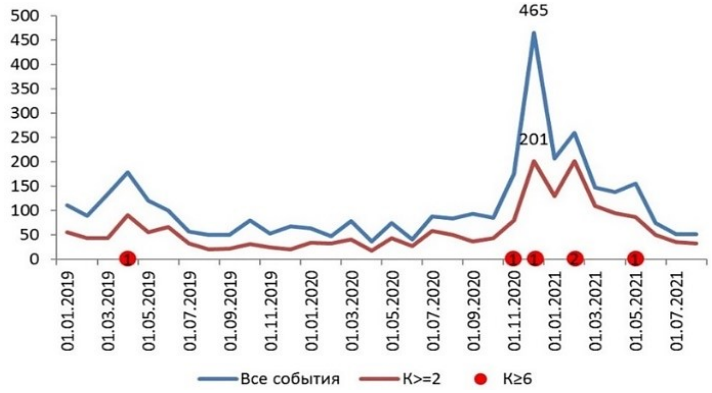


Рис. 3.45. Ежемесячное распределения числа сейсмических событий в бл. 7/12 (М0–М-400, от отм. +250 до +400 м)

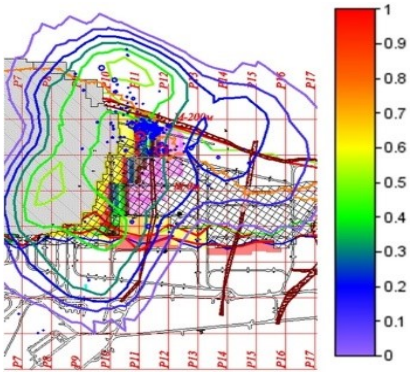
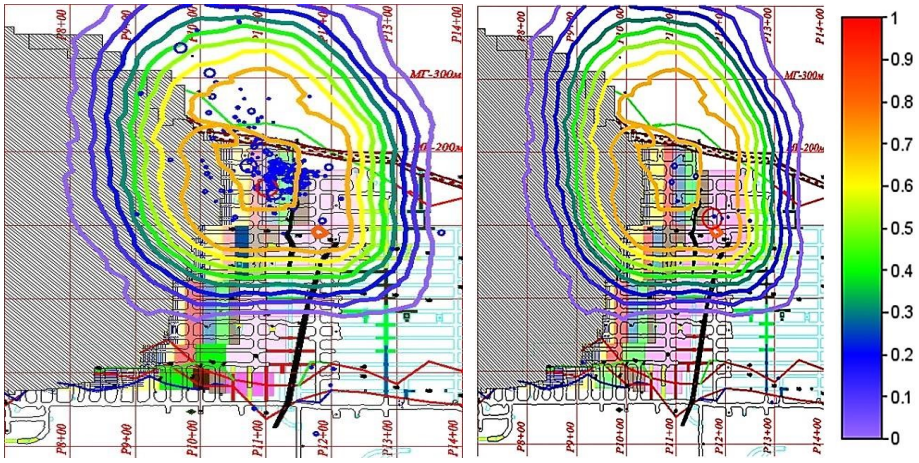


Рис. 3.46. Карта вероятностей возникновения сильного сейсмического события при наличии аномалии по комплексу прогностических признаков на 01.02.2021 г.

Как видно из рис. 3.46 бл. 7/12 в целом является участком, потенциально опасным по возникновению сильных сейсмических событий. Максимальное значение вероятности составляют 0,5. При этом микроудар произошел на участке, где значение вероятности составляет 0,3.



а *б*

Рис. 3.47. Распределение значений комплексного критерия: на 0:00:00 19.02.2021 г. с сейсмособытиями из расчетной выборки (*а*); на 0:00:00 19.02.2021 г. с сейсмособытиями, произошедшими 19.02.2021 г. (*б*)

Значения комплексного критерия (рис. 3.47 *а*) на рассматриваемом участке превышают 0,6. В центре выявленной сейсмически опасной области находится большинство событий, на основании которых проводился расчет, значение критерия составляет 0,6. Эта область оконтурена областью других значений — 0,7, причем на отдельном небольшом участке вблизи геологических нарушений значение достигает 0,8. Это соответствует известному в сейсмологии эффекту пространственной сепарации сейсмических событий по их энергии или эффектом сепарации: наиболее значительные сейсмособытия возникают не вперемешку со слабыми и не в центре «облака» слабых событий, а располагаются в периферических частях. Такое явление наблюдается как в естественной сейсмичности, так и в техногенной, например, на удароопасных шахтах Североуральского бокситового рудника [136].

Из данных рис. 3.47 видно, что сильное сейсмическое событие произошло вблизи области максимальных значений комплексного критерия, рассчитанных за несколько часов до реализации события.

Представленный пример хорошо иллюстрирует сложности разработки формализованных подходов к прогнозу опасных геодинамических явлений в условиях постоянно меняющейся техногенной сейсмичности. Расчет значений вероятностей проводится по данным за 1 год, предшествующий дате расчета. Большая часть сейсмических событий происходит под влиянием продвигающегося фронта работ. При ретроспективном расчете миграцию сейсмоактивных зон по мере продвижения фронта работ не всегда удается отразить в картах вероятностей. При этом карты вероятностей хорошо отражают потенциальную опасность тех участков, где влияние фронта работ меньше или отсутствует.

Расвумчоррский рудник, район ГТУ 09.01.2018 г.

9 января 2018 г. на Расвумчоррском руднике (месторождение Апатитовый цирк) произошло мощное сейсмическое событие (ML = 3,3 по данным КоФ ФИЦ ЕГС РАН), которое сопровождалось сильным звуковым эффектом, сотрясением массива и дневной

поверхности, существенными разрушениями выработок и ощущалось как работниками рудника, так и жителями городов Кировск и Апатиты.

На геодинамический режим данного участка массива оказали влияние различные факторы.

Геологические и геодинамические факторы

Значительная часть зон сейсмической активности, не связанная с отработкой блоков-целиков и процессами обрушения подработанного массива, приурочена к разломным структурам. В этом случае принято говорить о геодинамической активности разлома. Одним из кольцевых разломов, сыгравшим существенную роль в формировании структуры и геодинамических особенностей Хибинских апатит-нефелиновых месторождений, является Главный разлом мощностью до $n \times 10$ м. К нему примыкает серия оперяющих разломов: круто падающий радиальный разлом, прослеженный в пределах рудного тела, месторождения Апатитовый цирк в районе 8–10 разрезов («оперяющий радиальный разлом» на рис. 3.48 *а*). При проходке выработок лежачего бока на участке, примыкающем к восточному борту данного разлома, ранее уже отмечались интенсивные формы проявления горного давления, вплоть до горных ударов, например, в 1993 г. Горные удары происходили и в других местах, расположенных в зоне влияния данного радиального разлома — в 1976, 2002, 2007 гг. При этом следует отметить, что максимальные разрушения приконтурной части выработок тяготели к маломощным трещинам (до 0,5 м), являющимся ответвлениями этого разлома.

Все участки разрушения приконтурной части выработок и большинство зарегистрированных сейсмических событий 9 января 2018 г. тяготеют к полого-наклонной окисленной зоне мощностью 0,6–1,0 м, проходящей во вмещающих породах лежачего бока согласно залеганию рудного тела (выделено пунктиром на рис. 3.48 *б*). Исходя из радиуса ареала, в котором ощущалось событие, и характера разрушений выработок можно предположить его более глубинный характер. Событие спровоцировало подвижку по Разлому-1 по типу правого сдвига со смещением лежачего бока. Затем произошло смещение блока в треугольнике: кольцевой Разлом-1 – разломы Р-2 и Р-3. И в результате — выброс в СКШ-2, смещение массива относительно торкрет-бетонной крепи, вспучивание подошвы в СКШ-1 с образованием трещин отрыва в плоскости перпендикулярной Разлому-1.

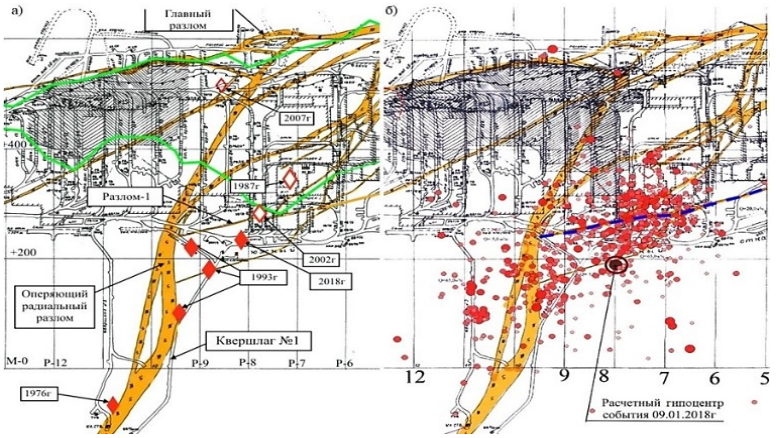


Рис. 3.48. Распределение событий и местоположение геологических структур на исследуемом участке месторождения Апатитовый цирк в плане: ретроспектива геодинамических событий (*а*); сейсмические события 9 января 2018 г. (*б*)

Гидрогеологический фактор

Для Хибинского массива характерно сезонное повышение сейсмичности в период паводков за счет увеличения обводненности разломных структур, выполненных тонкодисперсным материалом. Данный фактор способствует релаксации накопленных напряжений на более низком энергетическом уровне, что снижает уровень опасности возникновения землетрясений по естественным геодинамическим причинам. Структурные блоки, расположенные вне областей существенного водосбора, способны накапливать значительную потенциальную энергию с последующим срывом по одному из контактов, что провоцирует возникновение сильных сейсмических событий с бóльшим объемом разрушений подземных и наземных объектов. Анализируемое событие относится к этому типу.

Антропогенные факторы

Расчеты 3D-моделирования НДС для горнотехнической ситуации на момент события показали (рис. 3.49), что наиболее высокая концентрация сжимающих напряжений характерна для зоны опирания подработанного массива (на некоторых участках до 100 Мпа), а также участков в окрестности продвигающегося фронта горных работ (до 70 Мпа). В лежачем боку рудной залежи уровень напряжений близок к исходному фону и в зоне рассматриваемого события составляет 35÷40 МПа с небольшой концентрацией до 55–60 МПа у фронта работ в районе разрезов 7–8. То есть сам по себе уровень действующих напряжений для данного участка массива не является критическим и не мог привести к такому объему разрушений, тем более что мероприятия по приведению выработок в устойчивое состояние были выполнены. Однако анализ действующих касательных напряжений показал, что их величины близки к критическим, причем одна из площадок действия τ_{max} совпадает по направлению с оперяющей разломной зоной, по которой с большой вероятностью и произошла подвижка.

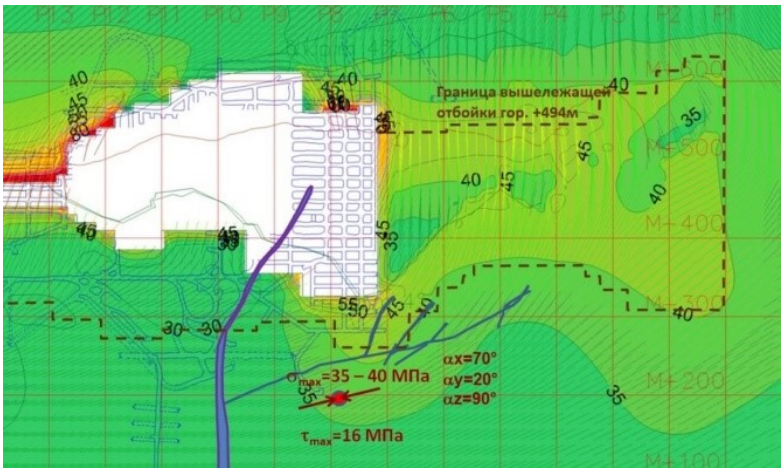


Рис. 3.49. Расчетные данные о поле напряжений при состоянии горных работ на начало 2018 г.

Анализ данных АСКСМ-Р показал, что уровень сейсмической активности этого участка возрастал постепенно, причем в значительном числе случаев такая активизация происходила после проведения торцевых взрывов. Первое сильное сейсмическое событие (энергия порядка 107 Дж) произошло в ноябре 2017 г., после чего наблюдалось некоторое затишье. За 2 дня до реализации ГТУ зарегистрировано сильное сейсмособытие (энергия порядка 106 Дж). Примерно за 7 ч до реализации ГТУ на отм. +450 м был

произведен торцевой взрыв (зарегистрированная сейсмическая энергия — 3·107 Дж), после которого зафиксировано повышение сейсмической активности в течение 2 ч (энергия менее 105 Дж). Максимум как по числу событий, так и по суммарной энергии приходится на день реализации ГТУ — 09.01.2018 г.

После чего наблюдалась длительная серия афтершоков, затем сейсмическая активность на данном участке постепенно снизилась.

Проведенными исследованиями установлено, что при реализации ГТУ произошла активизация и подвижка по существующим разломам. Возможно, при достижении самим массивом горных пород предельно неустойчивого состояния, триггером, спровоцировавшим дальнейший катастрофический сценарий развития событий, явился торцевой взрыв. Мощное сейсмособытие в рассматриваемой зоне могло произойти, с высокой вероятностью, независимо от взрыва. Детальное изучение разрывных структур с выделением сейсмически активных элементов позволит на стадии проектирования новых горизонтов избежать заложения долгосрочных капитальных сооружений в потенциально опасных зонах и минимизировать риск их разрушения в процессе эксплуатации.

Таким образом, в основу разрабатываемых методических подходов к оценке состояния массива горных пород положено выявление комплекса факторов, влияющих на состояние массива, т. е. на динамику сейсмичности. В первом приближении предлагается следующий порядок применения.

1. Выявление особенностей геологического строения массива: детальное изучение разрывных структур с выделением сейсмически активных элементов.

2. Определение сейсмоопасных участков шахтного поля рудника: проведение расчета значений комплексного критерия и вероятности обнаружения сильного события.

3. Определение зон повышенной концентрации напряжений σ_{max}: расчет значений НДС массива горных пород в ПО Sigma GT.

4. Анализ технологических взрывов, произведенных в районе сейсмоопасного участка, на основе данных о регистрации взрывов системами сейсмического мониторинга.

5. Определение периодов повышенной обводненности массива горных пород, используя данные контроля значений количества атмосферных вод, поступающих с поверхности вглубь массива пород (значения по объемам водопритоков).

6. Сопоставление полученной информации, на основе которого формулируются выводы и рекомендации.

Применение указанных подходов позволяет на практике провести оперативный сравнительный анализ влияния определенных факторов опасности как по отдельности, так и в совокупности, а также подготовить рекомендации по ведению горных работ, в том числе по определению необходимых профилактических мероприятий.

3.7. Выявление механизмов разрушения массива горных пород и закономерностей формирования опасных зон в окрестности элементов горной технологии с учетом структурных неоднородностей и свойств пород

Интенсивное ведение крупномасштабных горных работ на месторождениях с выраженным гравитационно-тектоническим типом НДС существенно трансформирует исходное поле напряжений массива горных пород и может приводить к реализации горных ударов. Эта проблема по-прежнему остается актуальной для многих рудников мира [119–121]. Не являются исключением и тектонически напряженные Хибинский

и Ловозерский массивы, где ведение горных работ сопровождается проявлениями горного давления в динамической форме. Отметим, что в целом сейсмический режим на территории Мурманской области оценивается как стабильно невысокий [122].

Рассмотрим закономерности формирования опасных зон в окрестности горных работ на примере максимально изученной с точки зрения геологического строения, геодинамического районирования, свойств горных пород и руд, параметров естественного и техногенного поля напряжений, а также миграции зон сейсмической активности природно-технической системы Кольского полуострова — Хибинского массива. В пределах Хибинской апатитовой дуги ведется разработка месторождений апатит-нефелиновых руд с 1930-х гг., т. е. почти 100 лет на протяженные участки массива оказывается существенное техногенное воздействие. Наибольший вклад в исследование геомеханических условий на Хибинских апатитовых месторождениях внесли ученые Горного института КНЦ РАН.

К настоящему времени в отделе геомеханики ГоИ КНЦ РАН сложилось следующее представление о причинах и механизмах реализации проявлений горного давления в динамической форме:

первый тип — вследствие активизации существующих разломов и реализации подвижек по ним структурных блоков;

второй тип — в результате развития и лавинно-неустойчивого слияния техногенных трещин в новые крупные разрывы или разрушения барьеров между сближенными очистными пространствами или разломами, или между очистным пространством и разломом;

третий тип — в процессе формирования трещин отрыва в подработанном массиве пород висячего бока.

Анализ мощных сейсмических событий последних лет подтверждает данную классификацию и позволяет выделить соответствующие опасные зоны, формирование которых происходит по одному из трех вышеописанных сценариев. Рассмотрим каждый из них и приведем примеры формирования зон повышенной сейсмической активности на Хибинских апатитовых рудниках в последние несколько лет.

К первому типу геодинамических явлений относятся наиболее опасные и трудно прогнозируемые сейсмические события, которые происходят с периодичностью 5–10 лет и более. В качестве примеров можно привести следующие события в Хибинском массиве — техногенные землетрясения на Кукисвумчоррском месторождение Кировского рудника в апреле 1989 г. (магнитуда $M \approx 4{,}2$) [122] и в октябре 2010 г. (M = 3,5) [123]; а также событие 9.01.2018 г. на Расвумчоррском руднике (M = 3,3) (рис. 3.50) [124].

Гипоцентр каждого из этих событий находился на удалении от фронта горных работ в лежачем боку рудной залежи. Зоны сейсмической активности в случае реализации таких событий приурочены к геодинамически активным разломным структурам. В рассматриваемых случаях зоны сейсмической активности формировались вблизи одного из кольцевых разломов — Главного разлома, мощность которого достигает n×10 м.

Если уточнять механизм мощных сейсмических событий такого рода, то они реализуются в виде взброса по имеющимся структурным нарушениям

в подстилающих породах лежачего бока за счет частичного снятия вертикальной нагрузки, роста величин касательных напряжений (τ_{max}) вплоть до критических и совпадения площадок действия τ_{max} (сдвигового напряжения) с геодинамически активной разломной структурой.



а *б*

Рис. 3.50. Событие 09.01.2018 г.: *а* — схема в проекции на разрез; *б* — разрушения в конвейерном штреке

Триггером мощного динамического явления на фоне достижения массивом горных пород предельно неустойчивого состояния может послужить массовый взрыв. События с подобным механизмом вызывают наиболее мощный сейсмический отклик массива и приводят к серьезным разрушениям подземных и наземных объектов. Подготовка события данного типа занимает не менее 3 лет. Причем интервал между событиями, относящимися к первому типу геодинамических явлений, в значительной мере зависит от интенсивности ведения горных работ и связанной с этим скоростью увеличения объемов очистного пространства. При прогнозе зон первого типа на передний план выходят данные по геодинамическому районированию с выделением геодинамически активных разломных структур (рис. 3.51) и расположение фронта горных работ по отношению к ним. Так, в марте 2021 г. при подходе ступенчатого фронта горных работ к комплексу геодинамически активных структур было зафиксировано повышение сейсмической активности — одно из событий с энергией E = 2,73•106 Дж и серия афтершоков в энергетическом диапазоне от 102 до 104 Дж (рис. 3.52).

Ко второму типу относятся динамические события, реализующиеся в непосредственной близости от фронта горных работ или в целиках на фоне концентрации сжимающих напряжений, уровень которых приближается или превышает предел прочности пород на сжатие, $\sigma_{д.} > 0{,}7 \times \sigma_{сж}$. Целики могут формироваться как между сближающимися фронтами горных работ (при ведении горных работ на уменьшающийся целик), так и при приближении фронта горных работ к разломной структуре. Параметры зон второго типа, в которых с большой вероятностью произойдет сейсмическое событие высокого энергетического уровня, достаточно успешно прогнозируются на основе комплексирования данных

прогнозных расчетов НДС и карт вероятности сильного сейсмического события с местоположением структурных нарушений.

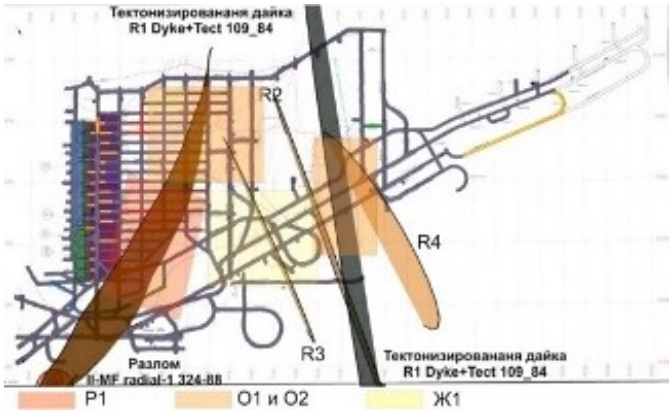


Рис. 3.51. Схема геодинамического районирования с выделением потенциально опасных структур для участка Расвумчоррского рудника (Д. В. Жиров)

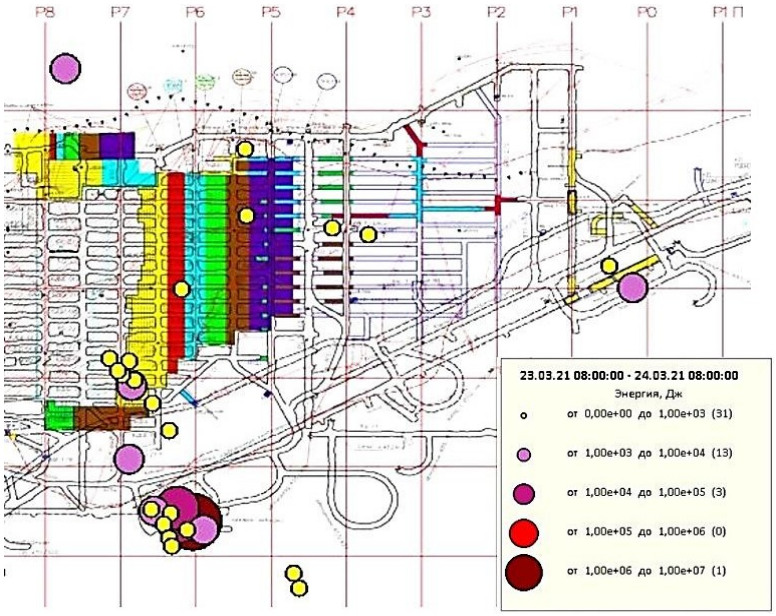


Рис. 3.52. Повышение сейсмической активности в марте 2021г. в лежачем боку рудной залежи Расвумчоррского рудника в районе Главного разлома, активизация которого явилась основной причиной горно-тектонического удара 09.01.2018 г.

В качестве примера такой зоны можно привести участок массива горных пород Кукисвумчоррского месторождения у северного фронта очистной выемки, где на протяжении ряда лет сохранялась удароопасная ситуация с проявлениями горного давления в динамической форме в выработках вплоть до микроударов и необходимости приостановки горных работ, усиления крепления горных выработок, повторного проведения локальных разгрузочных мероприятий (рис. 3.53).

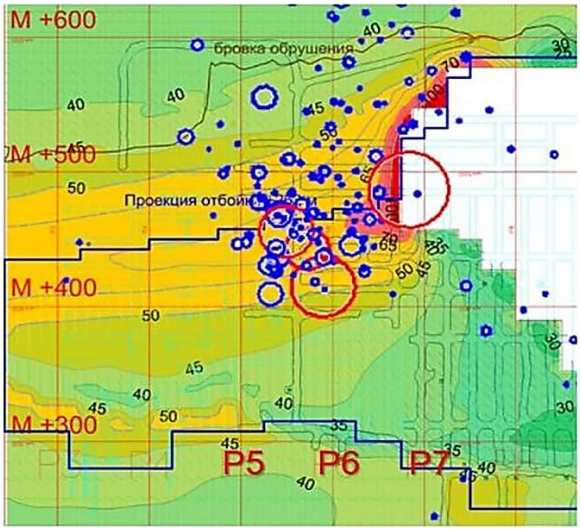


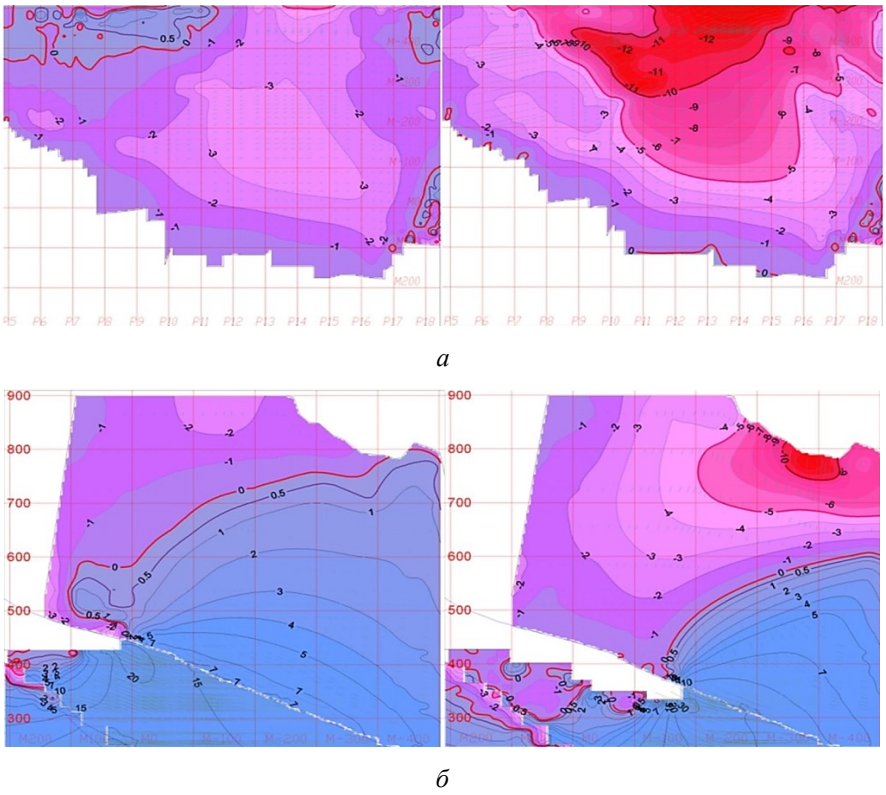
Рис. 3.53. Опасная зона второго типа, блок 4/7, Кукисвумчоррское месторождение. Сейсмические события сосредоточены в области максимальной концентрации напряжений у фронта горных работ и под границей отбойки вышележащего горизонта

Однако для зон второго типа наиболее действенной мерой являются региональные разгрузочные мероприятия, которые позволяют в целом снизить уровень действующих напряжений на опасном участке и сократить простои горных работ и дополнительные затраты на крепление и локальные разгрузочные мероприятия в выработках. Подтвержден существенный эффект разгрузки массива при создании полостей, перпендикулярных действию максимального сжатия σ_{max}. Так как на глубоких горизонтах Кукисвумчоррского месторождения вектора σ_{max} направлены вкрест простирания рудного тела с отклонением 30–40° от горизонтальной плоскости (в силу увеличения действия собственного веса пород в подконсольной части массива), то наиболее эффективными региональными мероприятиями по снижению уровня геодинамической опасности являются: полная отработка треугольников висячего бока по вышележащим горизонтам и подэтажам, создание опережения горных работ по висячему боку рудной залежи и формирование заглубленных отрезных щелей по висячему боку рудной залежи в том случае, если два предыдущих мероприятия являются недостаточными для разгрузки массива. Кроме того, важно минимизировать количество выработок, перпендикулярных направлению максимального сжатия, т. е. в случае действия σ_{max} вкрест простирания рудного тела осуществлять ортовую подготовку запасов, а в случае действия σ_{max} по простиранию тела — штрековую.

К третьему типу относятся сейсмические события в подработанных породах, они сопровождают процессы формирования и развития трещин отрыва в консольных зависаниях. Соответствующие зоны динамической активности несут меньшую опасность для людей и оборудования в горных выработках при создании условий по обеспечению планомерности обрушения подработанного массива. Поэтому с точки зрения прогнозирования повышенного уровня опасности в данных зонах является продолжительное затишье, которое свидетельствует о замедлении процессов трещинообразования в налегающем массиве и формировании значительных

по объемам консольных зависаний, что может привести в дальнейшем к стремительному развитию и единовременному обрушению данных объемов.

В качестве негативного примера развития событий можно привести Юкспорское месторождение, где в течение нескольких десятилетий горные работы велись от двух разрезок, постепенно формируя блок-целик. В данном случае по центральной части месторождения образовалось существенное консольное зависание, процессы разрушения которого резко активизировались при отработке блока-целика и стыковочной секции (рис. 3.54), соответственно, был зафиксирован существенный рост сейсмичности.



а

б

Рис. 3.54. Распределение σ_{min} в подработанном массиве до отработки блока-целика и после развития работ в блоке-целике: *а*) слой элементов под дневной поверхностью; *б*) разрез 10

Прогноз местоположения зон третьего типа можно осуществлять на основе комплексирования картин распределения критических растягивающих напряжений σ_{min} в подработанном массиве и прогнозных вероятностных карт сейсмической активности, дополняя их характеристиками трещиноватости пород.

Таким образом, подтверждены основные механизмы разрушения массива горных пород и выявлены закономерностей формирования трех типов опасных зон в окрестности элементов горной технологии с учетом параметров техногенного поля напряжений, структурных неоднородностей и свойств пород. Предложены варианты прогноза локализации каждого из типов зон повышенной геодинамической активности.

4. РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ, АЛГОРИТМОВ, ПРОГРАММ И МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ

4.1. Развитие принципов численного моделирования НДС с учетом структурной неоднородности массива горных пород на разных масштабных уровнях

Тектоническая нагруженность и высокая степень неоднородности месторождений Кольского полуострова влечет за собой отнесение многих из них к удароопасным. Данные факторы обуславливают высокие требования к геомеханическому обоснованию безопасных параметров ведения горных работ [109, 137–138]. При расчетах учитываются как геологические, так и горнотехнические факторы. Одной из важных задач моделирования является учет структурных неоднородностей различного ранга, оказывающих влияние на НДС массива горных пород.

Массив горных пород имеет блочное строение, где границами блоков различного масштабного уровня являются структурные нарушения разного порядка. С таким строением связана и неоднородность поля напряжений. Особенности НДС массива пород при отработке Хибинских апатит-нефелиновых месторождений в значительной мере определяются следующим.

1. Естественной геологической нарушенностью массива:

— геологическое строение массива (с выраженными границами раздела типов вмещающих пород и рудных тел);

— разломные структуры (это могут быть ослабленные зоны (например, зоны шпреуштейнизации) или жесткие включения (например, мончикитовые дайки));

— системная трещиноватость.

2. Техногенной нарушенностью массива:

— трещины отрыва в подработанной толще пород;

— техногенная нарушенность в окрестности элементов горной технологии.

Действие в массиве тектонических напряжений является дополнительным усложняющим фактором, требующим учета при прогнозе и анализе НДС массива горных пород при геомеханическом обосновании горных работ.

В программном комплексе Sigma GT, разработанном и использующимся в отделе геомеханики Горного института КНЦ РАН, моделирование НДС в окрестности разломной структуры возможно имитацией ее материалом с измененными прочностными характеристиками (рис. 4.1), что является корректным в случае достаточно высокого сцепления с основным массивом. Например, когда тектонические напряжения действуют по нормали к поверхности разлома.

Данное представление разлома является достаточно эффективным и простым способом моделирования НДС массива горных пород в окрестности неоднородностей, однако более полноценным вариантом является учет возможности сдвига блоков друг относительно друга. Если же разлом сориентирован под углом к направлению

действия тектонических напряжений или совпадает с ним, то необходимо учитывать сдвиговую составляющую: раскрытие или сдвиг [139, 140]. Поэтому расширение функционала данного метода и совершенствования конечно-элементных моделей, максимальное их приближение к фактическим условиям ведения горных работ является, безусловно, актуальной задачей.

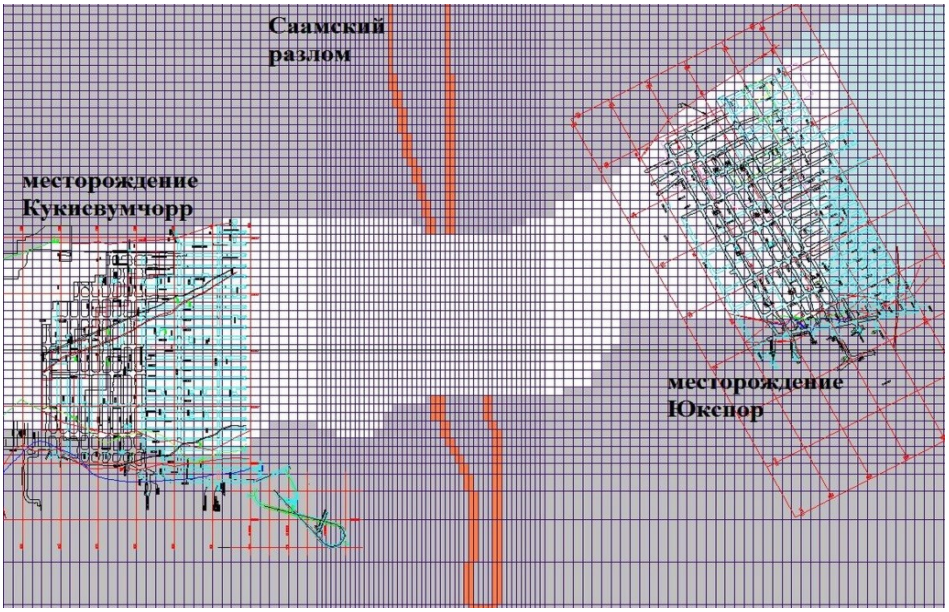


Рис. 4.1. Представление Саамского разлома в конечно-элементной модели Кировского рудника

Развитием данного представления в рамках программного комплекса стал алгоритм, позволяющий определить потенциально неустойчивые участки борта карьера по анализу направления площадок касательных напряжений. Считается, что наименее устойчивыми могут считаться участки борта карьера, в которых одна из площадок максимальных касательных напряжений подсекает борт карьера и совпадает по направлению с подсекающей разломной структурой. Для таких участков необходимо рассчитывать коэффициент запаса устойчивости [141]:

$$n = \frac{(\sigma_{max}+\sigma_{min})*\tan\phi + 2C}{2}, \quad (4.1)$$

где n — коэффициент запаса устойчивости; σ_{max} и σ_{min} — максимальные и минимальные нормальные напряжения; φ — угол внутреннего трения; C — сцепление.

Площадки, на которые действуют максимальные тангенциальные напряжения, делят пополам двугранные углы между главными площадками нормальных напряжений. Значения напряжений на этих площадках являются максимальными в данной точке и равны полуразности соответствующих нормальных напряжений [142]:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{max}-\sigma_{min}}{2}. \quad (4.2)$$

Для анализа реализации разрушений в массиве горных пород реализован алгоритм расчета и визуализации касательных напряжений и площадок сдвига. Результатом

работы данного алгоритма является построение облака площадок вблизи разломной структуры (рис. 4.2), по которому можно оценить их пространственную ориентацию.

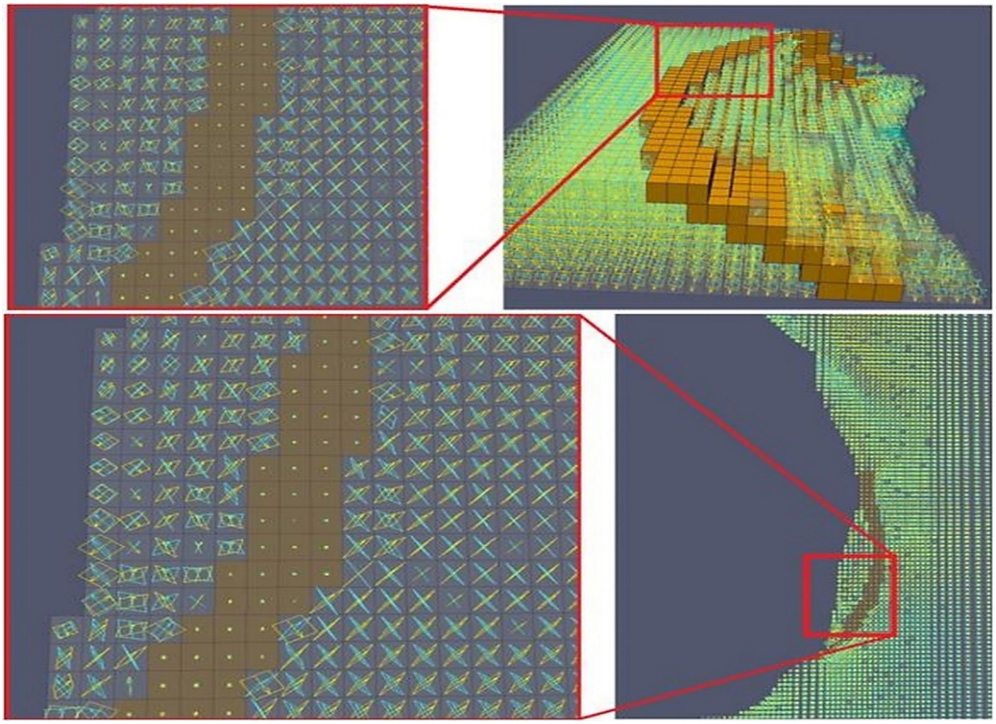


Рис. 4.2. Объемная оценка площадок сдвига в окрестности разломной структуры

Оценка пространственной направленности площадок сдвига является одной из тех задач, которая должна выполняться с объемным представлением модели, поскольку вектора максимальных касательных напряжений имеют уникальный угол и длину в каждом отдельно взятом конечном элементе.

4.1.1. Контакт-элемент, анализ свойств и сравнение модификаций

Существенное влияние на НДС массива в окрестности структурной неоднородности оказывает процесс деформации на контакте сред, а именно смещение блоков друг относительно друга. Одним из возможных способов учета контактных характеристик структурных неоднородностей в численном моделировании является решение задачи теории упругости методом конечных элементов (МКЭ) с использованием контактных элементов (рис. 4.3). МКЭ широко используется для оценки устойчивости подработанной толщи пород, целиков, выработок, участков борта карьера и отдельных уступов, позволяя выявить зоны критических напряжений и деформаций и на основе результатов моделирования принимать решение о безопасности конкретного варианта ведения горных работ [143–146].

Деформационные характеристики заполнителя трещины или ее контакта могут быть описаны модулем Юнга и коэффициентом Пуассона заполнителя, сцеплением, углом внутреннего трения, шероховатостью, обводненностью, действующими напряжениями на контакте, однако Р. Гудман предложил характеризовать упругие

свойства межблоковых интерфейсов нормальной и тангенциальной жесткостью контакта [147]. В условиях решения статической упругой задачи методом конечных элементов они связаны следующим образом [148]:

$$\frac{k_s}{k_n} = \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}, \tag{4.3}$$

где k_s — это тангенциальная (сдвиговая) жесткость; k_n — нормальная жесткость контакта; μ — коэффициент Пуассона.

Интеграция контактных элементов на границах разномодульных сред и разломных структур позволит увеличить адекватность разрабатываемых прогнозных моделей реальным геологическим и геомеханическим условиям и повысить достоверность результатов моделирования.

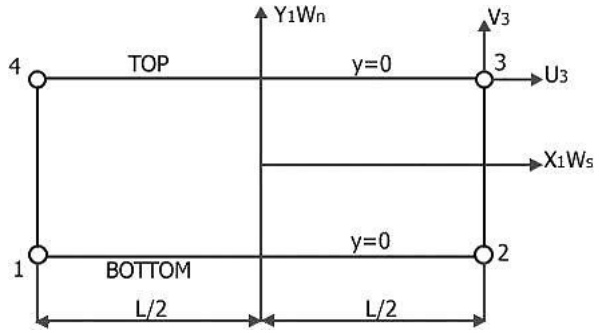


Рис. 4.3. Плоский контакт-элемент трещины в системе локальных координат

Обобщенный контактный элемент, представленный на рис. 4.3, характеризуется следующими свойствами:

— Y_1, X_1 — локальные координаты;
— U — нормальные относительные смещения в узловой точке;
— V — касательные относительные смещения в узловой точке;
— W_s — тангенциальная деформация;
— W_n — нормальная деформация;
— W — вектор относительного смещения, выраженный через W_s и W_n;
— τ — касательное наряжение в контакт-элементе;
— σ — нормальное наряжение в контакт-элементе;
— dU — нормальные относительные смещения в узловой точке;
— dV — касательные относительные смещения в узловой точке;
— [K] — диагональная матрица свойств материала (аналог матрицы жесткости конечного элемента), выражающая жесткость трещины на единицу длины в перпендикулярном и тангенциальном направлениях.

Контактный элемент может быть применен для учета межблоковых интерфейсов в моделировании НДС нарушенного массива. Однако для каждого ранга нарушения при равных деформационных характеристиках вмещающего массива и заполнителя трещины тангенциальная и нормальная жесткости контакта будут разными. В данном случае срабатывает так называемый масштабный эффект, который связывает линейные размеры нарушений с их упругими свойствами [149].

В двумерной четырехузловой постановке метода конечных элементов контактный элемент имеет квазилинейную форму, т. к. пары его узлов (1, 4) и (2, 3)

имеют одинаковые координаты. В определенных условиях при моделировании протяженных объектов двухмерное НДС будет приближено к трехмерному. Одним из таких случаев является модель выработки в поле действия тектонических напряжений, где одна из горизонтальных компонент напряжений в несколько раз превышает другую. Тогда при построении модели вкрест простирания действующих максимальных напряжений второй горизонтальной компонентой можно пренебречь [150]. Контактный элемент, предложенный Р. Гудманом, широко используется для учета относительных смещений по контакту и моделирования деформаций, возникающих на границах разномодульных сред внутри отдельно взятого блока. Накопленная в таком элементе энергия имеется благодаря приложенным силам на единицу длины, действующим через вектор смещения. Интеграл накопленной энергии в таком элементе имеет вид:

$$\Pi = \frac{1}{2}\int_{\frac{-L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{1}{4}\{U\}^T[B]^T[D][B]\{U\}\,dx. \tag{4.4}$$

Используя принцип минимума потенциальной энергии и рассматривая вектор смещений как обобщенное напряжение, матрицу жесткости для контактного элемента Р. Гудмана можно получить следующим образом:

$$\left[k^{(e)}\right] = \int \left[B^{(e)}\right]^T \left[D^{(e)}\right] \left[B^{(e)}\right] dx. \tag{4.5}$$

Матрицы жесткости единичных контактных элементов должны ансамблироваться (интегрироваться) в глобальную матрицу конечных элементов, входящую в систему линейных алгебраических уравнений закона Гука:

$$[K]\{U\} = F. \tag{4.6}$$

Л. Герман разработал связующий элемент для моделирования контактов неоднородностей. Как и у контактного элемента Р. Гудмана, он имеет четыре узла и нулевую толщину, если начальное раскрытие отсутствует. Однако подход Германа обладает определенными численными преимуществами. В соответствии с подходами Германа, поведение поверхности структурной неоднородности моделируется через фиктивные пружины связи, одну нормальную и одну касательную к интерфейсу, на каждой паре соседних узлов (рис. 4.4) [151].

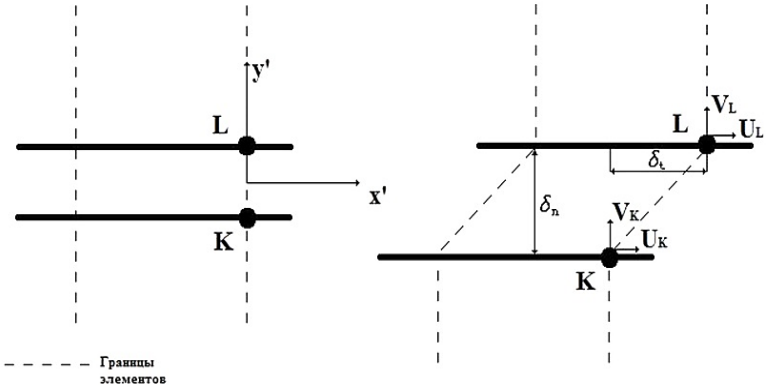


Рис. 4.4. Контактный элемент (элемент связи) Л. Р. Германа

Узловые силы в элементе Л. Германа связаны с относительными смещениями через тангенциальные и нормальные пружины связи:

$$\frac{L}{2}\begin{bmatrix} P_t & 0 & -P_t & 0 \\ 0 & P_n & 0 & -P_n \\ -P_t & 0 & P_t & 0 \\ 0 & -P_n & 0 & P_n \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u_k \\ v_k \\ u_L \\ u_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{kx} \\ f_{ky} \\ f_{Lx} \\ f_{Ly} \end{Bmatrix}, \tag{4.7}$$

где P_t и P_n — жесткость на единицу длины тангенциальной и нормальной пружины связи; L — длина контактного элемента.

Идея использовать шестиузловой контактный элемент в состоящей из четырехузловых конечных элементов модели принадлежит Джианчао Ли и В. Калякину [152]. Геометрически шестиузловой контактный элемент состоит из двух контактных элементов Р. Гудмана равной длины и нулевой толщины (рис. 4.5), пары узлов (1,4), (5,6) и (2,3) которого совпадают по координатам.

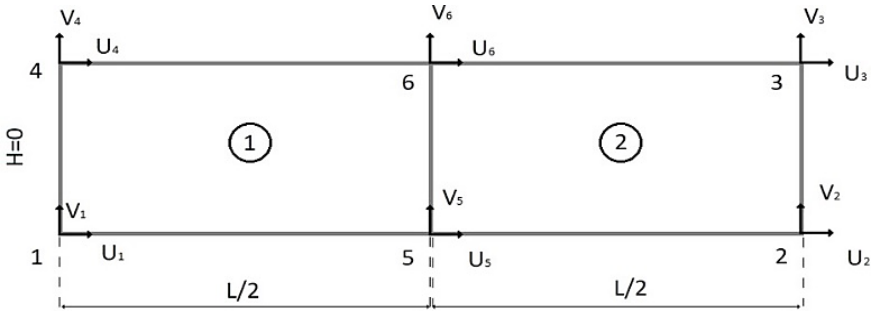


Рис. 4.5. Шестиузловой контактный элемент Джианчао Ли и В. Калякина

Узловые силы в таком элементе, в отличие от узловых перемещений, в узлах 5 и 6 имеют разное направление в обоих элементах. Для того, чтобы построить систему уравнений для двух элементов в локальной системе координат, необходимо сложить жесткости двух контактных элементов. Поскольку узловые силы в 5 и 6 узлах противоположно направлены, но равны по модулю, то при сложении они дают 0 в системе уравнений.

Геометрические характеристики двойного четырехузлового контактного элемента схожи с формой контактного элемента Р. Гудмана, однако матрицы жесткости отличаются и, соответственно, такой элемент имеет отличное от других элементов поведение под нагрузкой.

Для тестирования выбранных модификаций контактного элемента была создана абстрактная модель, содержащая 4 конечных элемента (вмещающий массив) и включающая слой контактных элементов посередине. Повернутая на 45° пластина нагружена по одной из граней и закреплена на противоположной. Сдвиг вдоль поверхности контакта блоков должен достигаться за счет поверхностных сил и угла наклона модели.

Результаты тестирования показали, что податливость контактного элемента Германа в тангенциальном направлении выше контактного элемента, предложенного Р. Гудманом, т. е. узловые перемещения верхней и нижней грани неоднородности имеют, скорее, сдвиговый характер. Двойной контактный (шестиузловой) элемент,

предложенный Джианчао Ли и В. Калякиным, показал более высокие субгоризонтальные перемещения и, следовательно, является более тангенциально-производительным.

4.1.2. Особенности моделирования НДС массива горных пород в окрестности структурных неоднородностей

Основной проблемой использования контактных элементов при моделировании НДС массива в окрестности структурной неоднородности является определение параметров контакта трещины. Наиболее широко данная тема раскрыта у Бандиса и др. [153]. В его работах описаны методики определения тангенциальной и нормальной жесткости контакта трещины с помощью лабораторных испытаний (рис. 4.6). Эта проблема частично может быть решена использованием усредненных параметров жесткости по всему контакту структурной неоднородности в рамках ее моделирования на одном масштабном уровне.

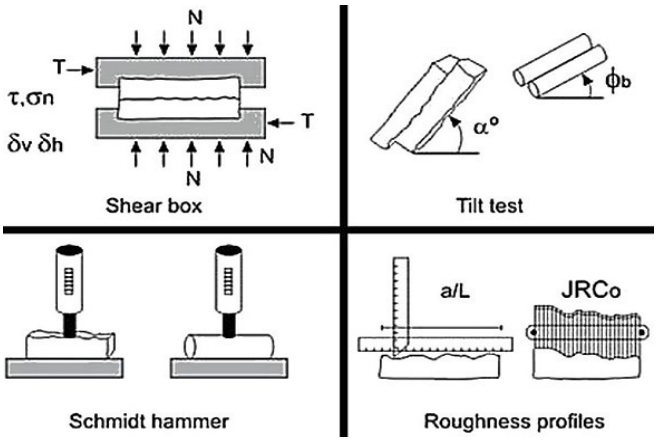


Рис. 4.6. Лабораторные испытания образцов с трещиной

Shear box test (испытание на сдвиг) — это метод испытаний, используемый для определения прочности образца на сдвиг.

Tilt test (испытание на наклон) — тест для оценки параметров прочности на сдвиг неоднородности.

Schmidt hammer (метод упругого отскока) — позволяет определить прочность поверхности трещины образца.

Roughness profiles (профилирование шероховатости) — визуальный метод оценки шероховатости поверхности трещины.

Эти методы позволяют вывести контактные характеристики образца с трещиной, однако для более точного моделирования необходимы натурные определения непосредственно в массиве.

Дополнительным фактором, усложняющим детальное моделирование НДС в окрестности разломных структур, является динамическое поведение параметров тангенциальной и нормальной жесткости. При подвижке по контакту трещины меняется ее шероховатость и сопротивление на сдвиг, а вместе с ними и ее параметры, закладываемые в контактный элемент. Если в условиях лабораторных испытаний эту динамику можно проследить на образце, то непосредственно

в массиве горных пород это сделать практически невозможно. Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом его структурных неоднородностей с помощью контактных элементов предполагает квазидинамический характер, когда параметры жесткости контакта трещины меняются на каждом его шаге. С учетом большого масштаба создаваемых моделей, на данный момент более 16 млн конечных элементов, такой подход потребует колоссального количества ресурсов как вычислительных, так и временных. Исходя из вышесказанного, моделирование НДС с решением статической задачи теории упругости и использованием усредненных параметров жесткости трещины позволит в некоторой степени приблизить модель к реальным условиям и процессам, протекающим в массиве.

Наличие в массиве не только гравитационных, но и тектонических напряжений делает необходимым трехмерное моделирование контакта трещины, особенно если вектор действия максимальной компоненты напряжений не направлен по нормали к разломной структуре. Для решения данной проблемы была реализована трехмерная модификация контактного элемента Гудмана, позволяющая учесть при моделировании полный тензор напряжений. Трехмерный контактный элемент выведен из соображений подобия двумерному линейному контактному элементу и имеет вид плоской пластины, толщина которой изначально равняется нулю.

Внедрение контактных элементов по поверхности разломной структуры влечет за собой увеличение масштаба (количества элементов) трехмерных моделей НДС. Причем в случае использования структурированных сеток для моделей месторождений даже небольшой участок с контактными элементами требует внедрения как минимум одного дополнительного слоя сетки конечных элементов.

4.2. Разработка алгоритмов и программ для учета влияния параметров неоднородностей геологической среды на напряженно-деформированное состояние горнотехнических систем

Основным направлением при развитии ПО Sigma GT для учета влияния неоднородностей на НДС массива горных пород в отчетном периоде являлась разработка алгоритмов и программ, реализующих внедрение в 3D-модели контакт-элементов. В двумерной постановке контактный элемент представляет собой предельно тонкий конечный элемент, в котором соответствующие пары узлов (1,4) и (2,3) изначально имеют идентичные координаты (рис. 4.7). Его длина L совпадает с длиной грани, характеризующей один из блоков конечного элемента, а высота H равна нулю.

Как было упомянуто ранее, контактный элемент может быть применен для учета межблоковых интерфейсов в моделировании НДС нарушенного массива. Однако для каждого ранга нарушения при равных деформационных характеристиках вмещающего массива и заполнителя трещины тангенциальная и нормальная жесткости контакта будут разными. В данном случае срабатывает так называемый масштабный эффект, который связывает линейные размеры нарушений с их упругими свойствами.

Трехмерная модель, по сравнению с плоской постановкой, обладает рядом преимуществ: учет полного тензора напряжений; поддержка сложной геометрии

геологических структур и горнотехнических объектов; возможность создания больших мелкомасштабных моделей для целых месторождений.

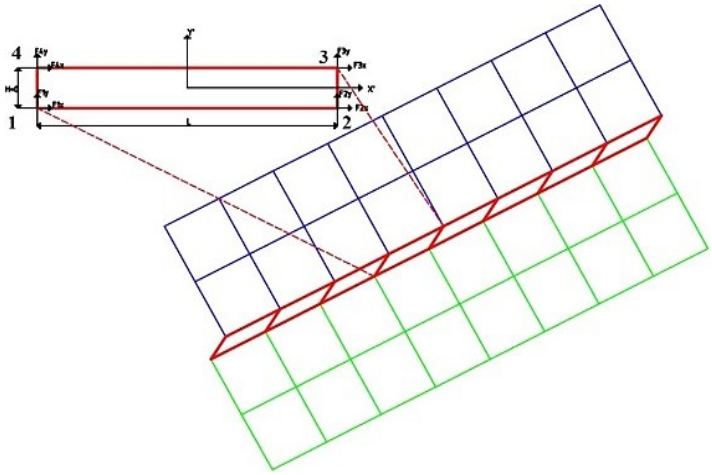


Рис. 4.7. Вид двумерного контактного элемента. Зеленые и синие элементы — блочные структуры, красные элементы — контакт блочных структур

Обобщение подхода Р. Гудмана на трехмерный случай позволило вывести матрицу жесткости трехмерного элемента. Для интегрирования использовались функции формы объемного элемента [147]. Сам контактный элемент рассматривался в локальных координатах и представлял собой восьмиузловую пластину (рис. 4.8).

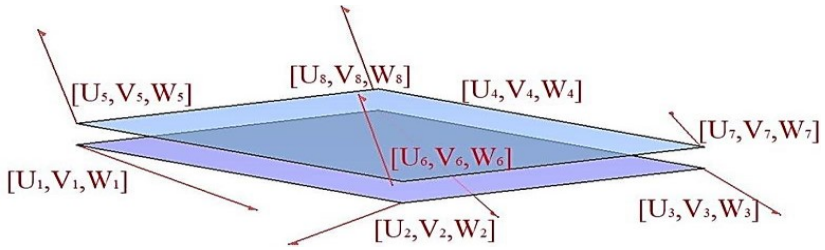


Рис. 4.8. Элементарный трехмерный контактный элемент

В исходном состоянии элемент имеет идентичные координаты в смежных узлах по координате *Z*. Размерность матрицы жесткости такого элемента [24×24]. Имея начальную матрицу жесткости для квадратного элемента с локальными координатами узлов *X*', *Y*':[–1,1] и *Z*' = 0, необходимо было получить матрицу для элемента с произвольными глобальными координатами. Матрица Якоби для контактного элемента формируется за счет его функций формы в плоскости по аналогии с обычным упругим конечным элементом. В общей форме переход от локальных координат к глобальным имеет вид:

$$\iiint_V W[X,Y,Z]_{global}dV = det(J)^{-1}\iiint_{V'} W[X',Y',Z']_{local}dV'. \qquad (4.8)$$

Для оценки деформации массива с включенной неоднородностью контактный элемент был внедрен в абстрактную модель, прочностные характеристики которой представлены в табл. 4.1. Силы приложены к верхней грани (рис. 4.9), но действуют

не по нормали и раскладываются по трем направлениям. Значения действующих сил представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Свойства моделируемого объекта

E	μ	ρ	k_n	k_s
700000	0,2	2,65	1,7e + 7	0,7*e* + 7

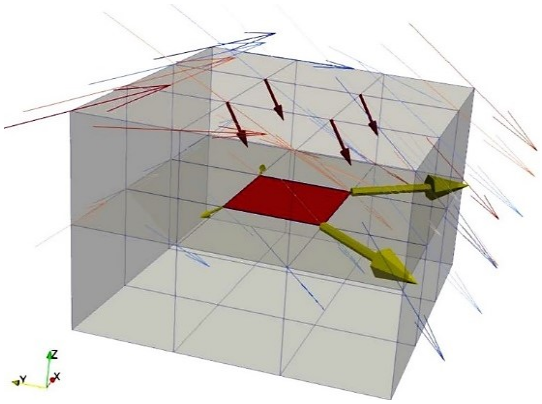


Рис. 4.9. Абстрактная модель с трехмерной модификацией контактного элемента: красные вектора — приложенные узловые нагрузки; желтые — узловые смещения по контакту

Был проведен ряд численных экспериментов с поворотом модели и изменением геометрии контактного элемента. При равных граничных условиях модели имели аналогичную деформацию, что указывает на независимость контактного элемента от его геометрии и положения в пространстве. При прочих равных условиях, при повороте и наклоне контактного элемента полученный вектор смещений был равен по модулю вектору неповернутой модели. Исходя из результатов тестового моделирования был сделан вывод о возможности использования трехмерной модификации контактного элемента в трехмерных моделях конечных элементов упругой среды.

Несмотря на свои преимущества использование трехмерного контактного элемента имеет ряд ограничений:

1) контактный элемент должен представлять собой восьмиузловую ровную пластину;

2) при внедрении контактного элемента на очередной слой размерность модели увеличивается на число элементов, представляющих данный слой, что значительно увеличивает размерность решаемой задачи;

3) если слой, на котором внедрены трехмерные контактные элементы, представлен как контактом разномодульных сред, так и переходным слоем сплошного массива, то описание его в виде обычного конечного элемента с нулевой толщиной и прочностными характеристиками Юнг/Пуассон не корректно.

Этот подход может привести к формированию вырожденной системы уравнений, не имеющей решений без дополнительных ограничений.

Проблема, заключающаяся в особенной геометрии трехмерного контактного элемента, может быть решена модификацией алгоритма формирования конечно-элементной сетки с учетом структурной неоднородности. Чтобы слои

структурированной сетки максимально совпадали с плоскостью нарушения или неоднородности, возможен как поворот всей модели, так и адаптация узлов сетки непосредственно вблизи структуры.

Последние две особенности могут быть устранены созданием «нулевого элемента», способного обеспечить однородность и непрерывностьмоделируемой среды и сохранить при этом регулярное строение сетки конечных элементов. Под однородностью среды подразумевается способность «нулевого элемента» передавать энергию вглубь изотропного массива, не оказывая влияния на его НДС.

4.2.1. Разработка фиктивного нулевого элемента для сохранения структурированности сетки конечных элементов

Как было упомянуто выше, трехмерные контактные элементы в реальных задачах моделирования НДС массива горных пород, как правило, не занимают весь слой модели, тем самым разделяя ее на две несвязных области. Поэтому в большинстве задач могут возникать трудности с их интеграцией. Внедрение ряда контактных элементов на границах структурных неоднородностей создаст разрыв сплошности модели и нарушит структурированность сетки конечных элементов модели, что недопустимо в рамках решаемых программным комплексом задач. На рис. 4.10 приведен пример такой ситуации. Сетка конечных элементов представлена гексаэдральными восьмиузловыми блоками. Номера на поверхности модели пронумерованы вдоль одной из граней. Структурная неоднородность, требующая внедрения контактных элементов в массиве, выделена черным цветом. Контактные элементы отмечены красным и для возможности их обозначения на рисунке имеют отличную от нуля толщину.

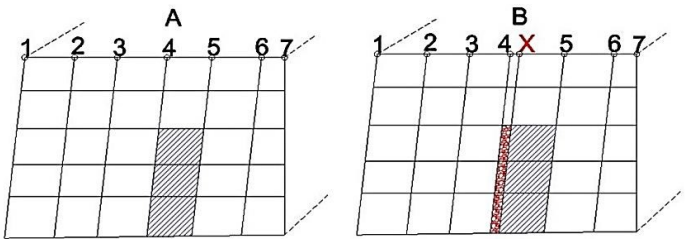


Рис. 4.10. Внедрение контактных элементов (выделены красным) на границе структурной неоднородности (выделена черным)

Такая ситуация влечет за собой сбой в нумерации элементов и узлов сетки конечных элементов, что легко исправить, изменив нумерацию узлов всей модели. Однако изотропность массива между слоями 3 и 5 будет нарушена, и элементы слоя 4-*X* (рис. 4.10 *в*) будут требовать описания их деформационных свойств для дальнейшего выведения их матрицы жесткости. В результате добавления слоя контактных элементов на структурной сетке вместо узла 4 появились две точки: точка 4 и точка *X*. Замена свободной от контактных элементов области на внедряемом слое модели (белые элементы слоя 4-*X* на рис. 4.10 *в*) на контактные элементы, идентичные вмещающему массиву, приводит к сбою в вычислениях, поскольку объем матрицы жесткости отдельного элемента становится равным нулю, что было подтверждено на абстрактной тестовой модели. Возможным путем решения данной проблемы

является разработка фиктивного элемента, который мог бы сохранить целостность структурированной сетки и механические свойства изотропного массива.

Глобальная матрица жесткости, образующая систему линейных уравнений, состоит из ансамблированных особым образом квадрантов. Квадранты представляют собой участки матрицы жесткости отдельного элемента, характеризующие определенный узел. Каждый элемент сетки конечных элементов вносит свой вклад в общую глобальную матрицу жесткости, но только в те точки (узлы, строки, столбцы), которые образуют этот элемент.

Для примера возьмем локальный участок модели с внедренным контактным элементом. На рис. 4.11 видно, что на структурной сетке вместо одного узла 4 появились две точки. Образовался нулевой фиктивный элемент из точек 4-5-8-7. Из соображений целостности модели все физические параметры должны быть в этих точках абсолютно равными. Назовем такие точки «связанные».



Рис. 4.11. Фиктивный элемент в структурированной сетке

Рассмотрим простейший случай, в котором каждый узел модели обладает одной степенью свободы, т. е. в каждом узле хранится одна переменная, например, температура. В дальнейшем из скаляра с условной температурой можно легко перейти на вектор узловых перемещений. Строки матрицы жесткости элемента, отвечающие за одну «связанную» пару узлов, должны в конечном случае иметь одинаковые значения, т. к. это фактически одна физическая точка. Поскольку матрица жесткости имеет симметричный вид, это относится и к столбцам.

Номера элементов на рисунках показаны красным цветом. Так, элемент 2 будет вносить вклад в позиции матрицы 2-3-5-6 как в структурированном, так и в неструктурированном варианте сетки конечных элементов. Таблица влияния элементов на жесткость в отдельных узлах матрицы (табл. 4.2) для неструктурированной сетки представлена ниже.

Таблица 4.2

Таблица влияния элементов на жесткость в отдельных узлах неструктурированной сетки

Номера элементов	Номера узлов										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	+	+		+	+						
2		+	+		+	+					
3					+	+	+	+			
4				+			+		+	+	
5							+	+		+	+

В непустых элементах таблицы ансамблирования (табл. 4.3) глобальной матрицы жесткости системы линейных уравнений отображена схема интегрирования квадрантов из матрицы жесткости отдельных элементов в конкретных узлах.

Далее необходимо рассмотреть, какой вклад в глобальную матрицу жесткости будут вносить фиктивные элементы в случае структурированной сетки. Для этого снова построим таблицу физического влияния узлов (табл. 4.4) в отдельных элементах.

В случае структурированной сетки 3-й элемент — фиктивный и не вносит никакого вклада в глобальную матрицу жесткости. Теперь изобразим схематично матрицу для структурированной сетки. Аналогично табл. 4.2 в непустых ячейках таблицы (матрицы) указаны вклады элементов. Для компактности таблицы (табл. 4.5) знак «+» был убран.

Точки 4 и 7 сцеплены, и следующей задачей было получить в строках 4 и 7 одинаковые значения (табл. 4.6), которые были бы эквивалентны строке 4 из матрицы жесткости неструктурированной сетки. Далее требовалось комбинировать эти строки из табл. 4.4, ориентируясь на четвертую строку из табл. 4.2. Так как элемент 4 из неструктурированной сетки и элемент 5 из структурированной сетки (рис. 4.8) фактически являются одним и тем же блоком, вместо номера 4 в некоторых случаях возможна замена пятым номером элемента.

Диагональные элементы 4 и 7 образуются из их полусуммы по причине их дальнейшего сложения во время интеграции в глобальную матрицу жесткости (табл. 4.7).

В результате обновления значений в строках 4 и 7 и приведения глобальной матрицы жесткости сетки к симметричному виду она принимает вид (табл. 4.8).

Из представленной выше таблицы видно, что, за исключением дублирующей точки (7 столбец), строки схемы ансамблирования глобальной матрицы жесткости в сцепленных точках 4 и 7 неструктурированной сетки идентичны. Это указывает на физическую непрерывность данной области и, следовательно, на возможность использования полученной глобальной матрицы жесткости в системе линейных уравнений метода конечных элементов.

Ввиду большого объема описания математических операций над матрицей жесткости элемента и громоздкости самой матрицы, в рамках данной монографии весь процесс иллюстрироваться не будет. В основном стоит отметить, что узлы 7 и 4 в правой части рис. 4.11 должны оказывать равный вклад по жесткости, что и узел 4 в левой части рисунка.

Полученная глобальная матрица жесткости является вырожденной [154], т. к. содержит одинаковые строки, следовательно, ее определитель будет равняться нулю. Для решения такой матрицы надо учитывать нулевое пространство этой матрицы (пространство, содержащее «нулевые» элементы). В библиотеке PETSc (Portable Extensible Toolkit for Scientific Computation) имеется возможность учета подобных областей при решении систем линейных уравнений [155].

Данный подход позволяет интегрировать контактные элементы на границе структурных неоднородностей, оставаясь в условиях структурированной регулярной сетки конечных элементов.

Необходимость создания подобных «нулевых» элементов повлекла за собой увеличение размерностей сеток конечных элементов, а также увеличила время формирования матрицы жесткости. Эта проблема частично решается приведением матрицы к ленточному виду.

Таблица 4.3

Ансамблирование матрицы жесткости неструктурированной сетки конечных элементов

№ узлов	Номера узлов										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1+0+0+0+0	1+0+0+0+0		1+0+0+0+0	1+0+0+0+0						
2	1+0+0+0+0	1+2+0+0+0	0+2+0+0+0	1+0+0+0+0	1+2+0+0+0	0+2+0+0+0					
3		0+2+0+0+0	0+2+0+0+0		0+2+0+0+0	0+2+0+0+0					
4		1+0+0+0+0		1+0+0+4+0	1+0+0+0+0		0+0+0+4+0		0+0+0+4+0	0+0+0+4+0	
5		1+2+0+0+0	0+2+0+0+0	1+0+0+0+0	1+2+3+4+0	0+2+3+0+0	0+0+3+0+0	0+0+3+0+0			
6			0+2+0+0+0		0+2+3+0+0	0+2+3+0+0	0+0+3+0+0	0+0+3+0+0			
7				0+0+0+4+0	0+0+3+0+0	0+0+3+0+0	0+4+3+0+5	0+0+3+0+5	0+0+0+4+0	0+0+0+4+5	0+0+0+0+5
8					0+0+3+0+0	0+0+3+0+0	0+0+3+0+5	0+0+3+0+5		0+0+0+0+5	0+0+0+0+5
9				0+0+0+4+0	0+0+0+4+0				0+0+0+4+0	0+0+0+4+0	
10				0+0+0+4+0	0+0+0+4+0		0+0+0+0+5	0+0+0+0+5	0+0+0+4+0	0+0+0+4+5	0+0+0+0+5
11							0+0+0+0+5	0+0+0+0+5		0+0+0+0+5	0+0+0+0+5

Таблица 4.4

Таблица физического влияния узлов в элементах структурированной сетки

Номера элементов	Номера узлов											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+	+		+	+							
2		+	+		+	+						
3												
4					+	+		+	+			
5							+	+		+	+	
6								+	+		+	+

Таблица 4.5

Ансамблирование матрицы жесткости структурированной сетки конечных элементов

№ узлов	Номера узлов											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	100000	100000		100000	100000							
2	100000	120000	020000	100000	120000	020000						
3		020000	020000		020000	020000						
4	100000	100000		100000	100000							
5	100000	120000	020000	100000	120400	020400		000400	000400			
6		020000	020000		020400	020400		000400	000400			
7							000050	000050		000050	000050	
8					000400	000400	000050	000456	000406	000050	000056	000006
9					000400	000400		000406	000406		000006	000006
10							000050	000050		000050	000050	
11							000050	000056	000006	000050	000056	000006
12								000006	000006		000006	000006

Таблица 4.6

Строки смежных узлов фиктивного элемента

Строки	Точки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	100000	100000		100000	100000							
7							000050	000050		000050	000050	

Таблица 4.7

Операция над строками смежных узлов фиктивного элемента

Строки	Точки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	100000	100000		(100050)/2	100000		(100050)/2	000050		000050	000050	
7	100000	100000		(100050)/2	100000		(100050)/2	000050		000050	000050	

Таблица 4.8

Финальная схема ансамблирования матрицы жесткости структурированной сетки конченых элементов

№ узлов	Номера узлов											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	100000	100000		100000	100000		100000					
2	100000	120000	020000	100000	120000	020000	100000					
3		020000	020000		020000	020000						
4	100000	100000		100050	100000		100050	000050		000050	000050	
5	100000	120000	020000	100000	120400	020400	100000	000400	000400			
6		020000	020000		020400	020400		000400	000400			
7	100000	100000		100050	100000		100050	000050		000050	000050	
8				000050	000400	000400	000050	000456	000406	000050	000056	000006
9					000400	000400		000406	000406		000006	000006
10							000050	000050		000050	000050	
11				000050			000050	000056	000006	000050	000056	000006
12				000050				000006	000006		000006	000006

Для проверки физического вклада фиктивного «нулевого» элемента в систему линейных уравнений и влияния его на НДС моделируемого участка массива был проведен численный эксперимент. Он заключался во внедрении целого слоя «нулевых» элементов в изотропный массив без включения контактных элементов. В результате моделирования поле напряжений в исследуемом участке осталось неизменным.

4.2.2. Характеристики контактного элемента

Очередной проблемой при использовании контактных элементов в рамках решения упругой задачи методом конечных элементов было описание деформационных характеристик контакта. Матрица жесткости контактного элемента характеризуется двумя значениями: нормальной K_n и тангенциальной K_s жесткостью. Наиболее полное описание этих характеристик, в особенности тангенциальной жесткости, можно найти в работах Бартона [156]. Нормальная жесткость трещин в большей мере представлена у Бандиса [157].

В работах Костюченко, а также Будкова, Кочаряна, Юфина и Ламониной, описывается некоторая корреляции между линейными размерами структурной неоднородности и ее нормальной жесткостью [148, 158–160]. В работе Назаровой, как и у большинства вышеперечисленных, отмечается зависимость тангенциальной жесткости от нормальной: тангенциальная жесткость должна быть как минимум на один порядок ниже нормальной [161].

Несмотря на достаточный объем проанализированной информации по характеристикам структурных неоднородностей, максимально четкой аналитической формулировки данных параметров найдено не было.

На основе полученных знаний и исходя из необходимости исследования НДС массива для проведения прогнозного моделирования, было принято решение попытаться подобрать необходимые деформационные характеристики контакта эмпирически. Для этого с использованием уже имеющейся модели одиночной выработки было произведено моделирование разгрузочной строчки скважин. В качестве структурной неоднородности моделирующий ее слой модели был задан пустотой (рис. 4.12).

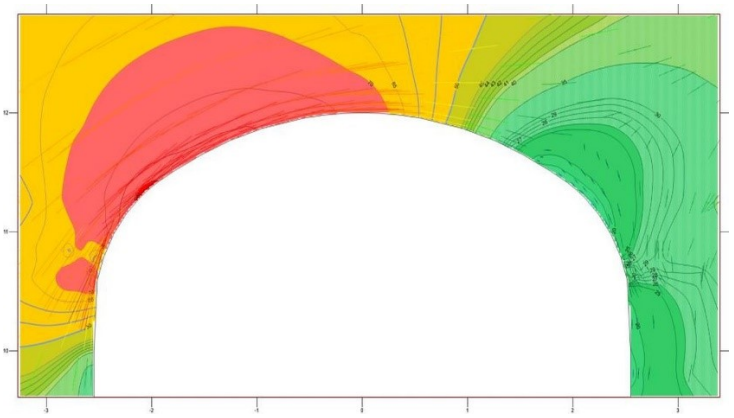


Рис. 4.12. Распределение напряжений σ_{max} на контуре выработки после ее проходки

На рис. 4.12 продемонстрировано начальное НДС выработки, без проведения разгрузочных мероприятий. Выработка имеет начальное НДС, заданное в перемещениях на границе модели. Граничные условия в виде перемещений получены путем интерполяции из модели месторождения Кукисвумчорр. В левой части кровли выработки образуется зона концентрации максимальной компоненты главных напряжений, где значения σ_{max} достигают 100 МПа.

Для проведения оценочных экспериментов было создано две опорных модели со структурами в левой и правой частях кровли выработки (рис. 4.13).

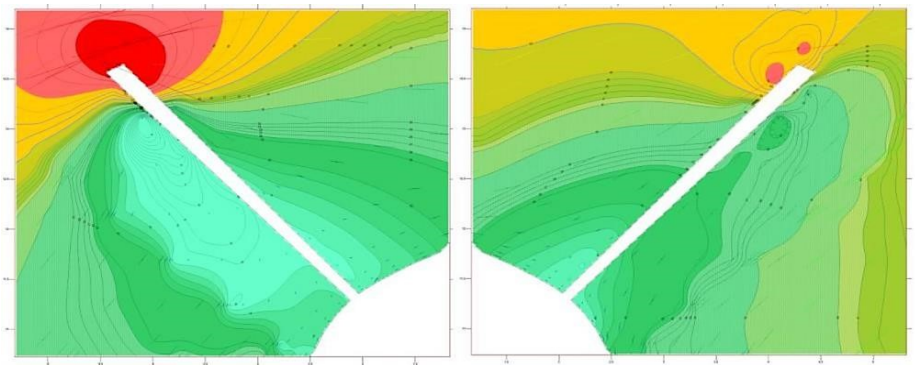


Рис. 4.13. Моделирование разгрузочной строчки без контактных элементов. Распределение σ_{max}

Дальнейшим шагом проведения оценочных экспериментов было создание ряда моделей с вариацией значений касательной и нормальной жесткости как для левого, так и для правого варианта модели. В качестве структурной неоднородности в модели использовался слой контактных элементов, дополненный нулевыми фиктивными элементами для сохранения целостности сетки конечных элементов.

В случае, когда структурная неоднородность располагалась в левой части кровли выработки, вектора σ_{max} направлены по нормали к плоскости структурной неоднородности. На данных моделях выявлены следующие явления (рис. 4.14):

— вариация значений нормальной жесткости контактного элемента при фиксированном значении тангенциальной жесткости не привела к значительному изменению области концентрации σ_{max};

— при достижении нормальной жесткости, превышающей $1e^6$, зона концентрации максимальной компоненты исчезает;

— вариация значений тангенциальной жесткости контактного элемента при фиксированном значении нормальной привела к снижению области концентрации σ_{max}.

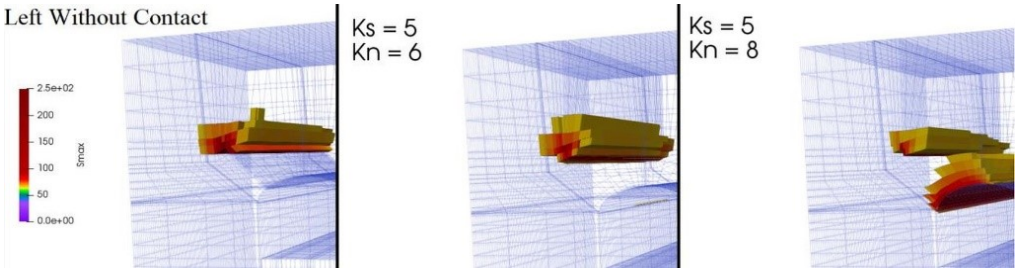


Рис. 4.14. Сравнение распределения σ_{max} при различных значениях жесткости контакта. Левый пример

Проанализируем для того же случая распределение минимальной компоненты главных напряжений σ_{min} (рис. 4.15). Вектора σ_{min} в зонах растяжения изначально были близки по направлению к моделируемой структурной неоднородности. При внедрении контактного элемента по плоскости структуры, по ее поверхности формируется зона растягивающих напряжений σ_{min}. Эта область также зависит от значений жесткости трещины:

— с увеличением значений нормальной жесткости, зона концентрации растягивающих напряжений σ_{min} по поверхности структуры постепенно исчезает;

— при одних и тех же значениях нормальной жесткости с увеличением тангенциальной жесткости объем зоны растягивающих напряжений увеличивается.

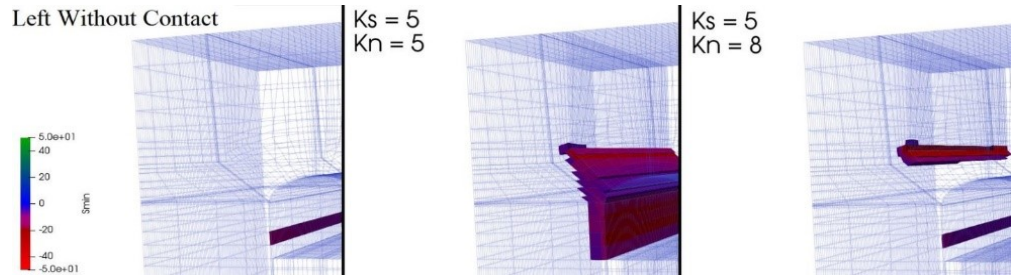


Рис. 4.15. Сравнение зон растягивающих напряжений по σ_{min} при различных значениях жесткости контакта. Левый пример

Ввиду замещения пустых элементов опорного варианта на слой контактных элементов, было принято решения оценивать поля напряжений по качественной картинке, а не по модулю значений. В случае действия максимальной компоненты напряжений по нормали к поверхности структуры были определены наиболее подходящие параметры жесткости $K_s = 1e^5$ и $K_n = 0{,}5e^7$.

В варианте с простиранием моделируемой структурной неоднородности в правой части кровли выработки вектора σ_{max} направлены по поверхности неоднородности. Вариация значений нормальной жесткости при неизменном значении тангенциальной жесткости практически не дает изменений в значениях максимальной компоненты напряжений. Однако при достижении значений нормальной жесткости свыше $1e^7$, зона концентрации на кончике структуры пропадает. Вариация значений тангенциальной жесткости при фиксированном значении нормальной жесткости дает схожие результаты (рис. 4.16).

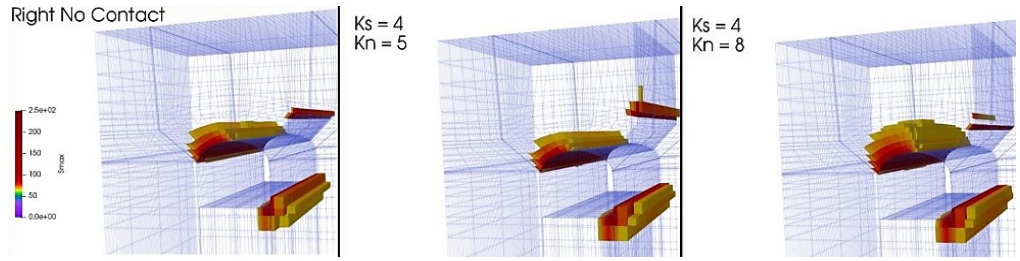


Рис. 4.16. Сравнение полей σ_{max} при различных значениях жесткости контакта. Правый пример

При неизменных значениях нормальной жесткости вариация тангенциальной дает рост зоны концентрации растягивающих напряжений σ_{min}. При значениях нормальной жесткости, превышающих $1e^6$, зона растяжений практически исчезает (рис. 4.17).

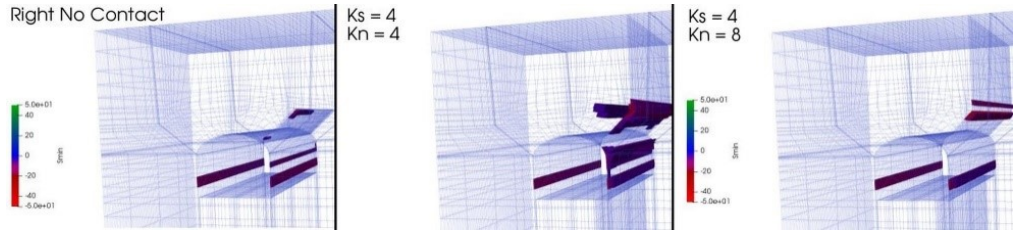


Рис. 4.17. Сравнение полей растягивающих значений σ_{min} при различных значениях жесткости контакта. Правый пример

В случае совпадения векторов максимальной компоненты напряжений наиболее близкой по качественной картине зоны концентрации растягивающих напряжений является вариант с $K_s = 1e^4$, $K_n = 0{,}5e^6$. При оценке сжимающих напряжений были приняты примерно те же значения.

На основе проведенных численных экспериментов проведена оценка деформационных параметров в диапазоне от $1e^0$ до $1e^{10}$ и их взаимное влияние на распределение напряжений в окрестности структурных неоднородностей. Выявлены наиболее адекватные характеристики контактного элемента, которые будут использованы при проведении прогнозного моделирования НДС на контактах естественных и техногенных неоднородностей. Также в определенной мере подтверждено соотношение нормальной и тангенциальной жесткости моделируемых структур, которое использовалось в нескольких проанализированных работах [153, 154, 148, 158–161].

4.3. Разработка разномасштабных 3D-моделей напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с дифференцированным и совместным учетом геомеханических и горнотехнических факторов для месторождений северо-западной части Арктической зоны РФ

Основные закономерности и факторы, влияющие на геомеханические процессы в массиве горных пород, достаточно хорошо исследованы. В то же время комплексный учет неравнокомпонентного начального поля напряжений, сложного рельефа дневной поверхности, геометрии рудных тел и основных структурных нарушений при формировании и развитии очистных пространств, трансформация параметров НДС для условий конкретного месторождения может быть оценена на современном уровне только при использовании численных методов.

Разработка геомеханических моделей массива горных пород, возможность прогноза НДС, сравнение расчетных и натурных данных, верификация рассматриваемой модели являются основными этапами, которые закладываются в системы комплексного геомеханического мониторинга на многих горных

предприятиях. Поэтому создание геомеханической модели массива, а также создание эффективного численного алгоритма являются актуальными и имеют практическую и научную значимость. Еще более актуальными задачи оценки и прогноза НДС по мере развития горных работ становятся в условиях месторождений, склонных и опасных по горным ударам.

Успешное решение задачи создания геомеханической модели означает возможность объяснить происходящие явления и прогнозировать развитие процесса при изменении какого-либо фактора. В зависимости от требуемой точности в модели учитывается определенный комплекс явлений, которые необходимо принять во внимание.

Физические процессы описываются при помощи дифференциальных уравнений и их системы, в которых должны учитываться сложные связи между параметрами. Поэтому решение уравнений математической физики представляет чрезвычайно сложную задачу. Основным, а не редко единственным способом, который позволяет это сделать, является применение численных методов решения. Поскольку решением этих уравнений является чаще всего не конкретное число, а некоторые функции, параметры, описывающие состояние исследуемого объекта и его изменение, такие решения и способ их получения называют численным моделированием. С помощью численного моделирования процессов проверяют правильность сделанных предположений и допущений, а также изучают следствие каждого из них. Исследуют влияние параметров на полученное решение.

В настоящее время численное моделирование является важнейшим и активно развиваемым способом изучения деформационных процессов в геологических средах. Развитию данного направления исследования способствует быстрый рост возможностей вычислительной техники. Разрабатываются новые алгоритмы вычислений и подходы к решению задач, усовершенствуются уже существующие.

Моделирование осуществляется путем численного решения уравнений математический физики или их системы, которые описывают соответствующий процесс или явления в рамках некоторой идеализации. Для этого исследуемая область разбивается на элементы или покрывается расчетной сеткой. Значения функций и переменных определяются в соответствующих узлах и ячейках или элементах.

Благодаря тому, что при численном моделировании воспроизводятся физические процессы, часто его называют численным экспериментом.

Разница в том, что для численного эксперимента требуется значительно меньше ресурсов, чем для лабораторного, его легко повторить, а также в том, что в результате численного эксперимента получают информацию о состоянии всех участков среды. Фактически это позволяет воспроизвести исследуемый процесс, в рамках заданной идеализации. Степень идеализации определяется постановкой задачи и законами, описывающими поведение среды в интересующих условиях.

Первой задачей в этой области является формулировка задачи, что включает детальное определение объекта исследования и его формализованное математическое описание. Для этого необходимо четко определить явления и процессы, которые предполагается исследовать и определить соответствующие свойства среды, при помощи которых их можно описать. Кроме того, нужно определить геометрию

объекта и его структуру, а также условия, в которых он находится, условия нагружения и длительность исследуемого процесса. От того, насколько удачной является формулировка задачи, в значительной мере зависит успех ее решения.

Очень важно оставить в рассмотрении лишь те явления и особенности деформирования, которые играют наиболее важную, ключевую роль в исследуемом процессе. Чем больше явлений мы попытаемся учесть, тем сложнее будет их описать, сложнее будут законы, больше уравнений и параметров, а в итоге, — труднее интерпретировать результаты и выявить закономерности, разобраться в причинах и следствиях. Поэтому очень часто наиболее информативными и ценными являются задачи достаточно простой постановки. Но простая постановка в данном случае должна учитывать важнейшие особенностей поведения среды в интересующих условиях.

Следующим шагом является выбор модели среды и определение ее параметров. Модель среды — это математическое выражение законов, взаимосвязей параметров внутреннего состояния среды через набор коэффициентов или функций. Чем сложнее модель, тем больше в ней параметров, которые нужно знать, т. е. определить экспериментальным путем. Модель поведения среды строится на основе обобщения и интерпретации экспериментальных данных.

Внутренняя структура и геометрия объекта также задаются исходя из рассматриваемого процесса и возможного влияния на исследуемые явления. В некоторых случаях целесообразно упростить описание внутренней геометрии и использовать усредненные параметры. В других случаях важно учесть наличие неоднородной структуры и имеющихся трещин. На определение всех этих факторов при формулировке задачи могут сказаться имеющиеся возможности и наличие необходимых данных.

В определенных случаях придется упростить задачу и отказаться от рассмотрения каких-то особенностей либо найти способ их замещения через дополнительные соотношения в модели.

Разработан комплекс взаимосвязанных геомеханических моделей Хибинской апатитовой дуги, дающий возможность обоснования отработки запасов удароопасных месторождений с минимальными рисками. Более полного учета всего комплекса геологических и горнотехнических факторов при разработке конечно-элементных моделей можно достичь путем уплотнения сетки конечных элементов в окрестности геологических структур, перепадов рельефа, элементов горной технологии и крепления горных выработок. Однако повышение детализации сетки конечных элементов для региональных моделей (десятки километров) и моделей месторождений (километры) с отображением особенностей геометрии нарушенных зон и жестких включений (десятки сантиметров и первые метры), а также техногенной нарушенности и крепления (сантиметры) приводит к увеличению масштаба конечно-элементной модели и росту времени расчетов в геометрической прогрессии, а также к необходимости увеличения используемых вычислительных мощностей. Эта проблема может быть решена путем создания иерархической системы вложенных моделей (рис. 4.18), когда для каждой модели определяется оптимальная детальность расчетов, а расчетные данные могут

передаваться как от мелкомасштабной модели к крупномасштабной, что используется при расчете граничных условий, так и в обратном направлении.

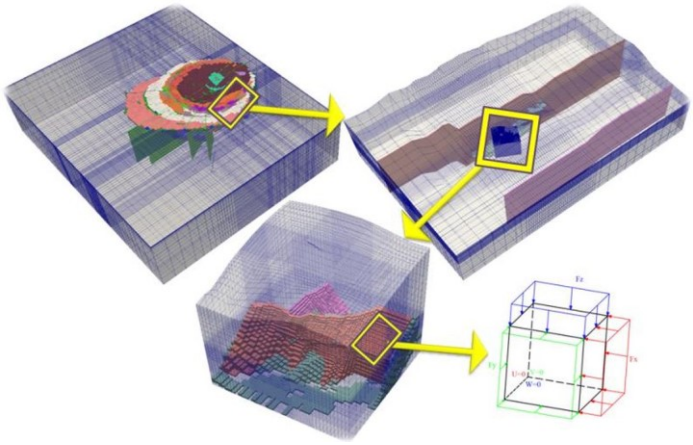


Рис. 4.18. Иерархичная система вложенных конечно-элементных моделей

В основе этой системы лежит принцип вложенности моделей — от модели горного массива к модели месторождения, отдельного блока и, в конечном итоге, отдельного элемента горной технологии (например, выработки). Граничные условия наследуются от модели к модели и задаются в виде узловых перемещений в смежных узлах моделей разного уровня.

4.3.1. Численная геомеханическая модель массива пород в окрестности месторождения Олений ручей как основа обеспечения безопасности подземных горных работ

В качестве исходных данных о геометрии рудных тел, крупных разломных структур, дневной поверхности, созданных и планируемых очистных обнажений, при подготовке численной конечно-элементной модели массива пород была использована модель месторождения Олений ручей в системе автоматизированного планирования, проектирования и сопровождения горных работ Mineframe. Также были изучены планы горизонтов с фактическим и проектным положением горных работ, результаты измерений напряжений по замерным станциям и результаты визуальных наблюдений.

Анализ геологических особенностей нижнего яруса месторождения Олений ручей показал, что рудные тела нижнего яруса не имеют выходов на дневную поверхность и выклиниваются по восстанию на абсолютных отм. +200 … 0 м, характеризуются сложной морфологией, линзуются и расщепляются как по простиранию, так и по падению. Еще одной особенностью месторождения является наличие крупных структурных нарушений с различными углами падения, формирующих блоки, которые могут отличаться как по направлению максимального сжатия, так и по абсолютным величинам σ_{max}.

В модели учтены различия в свойствах вмещающих пород, пород рудного тела, а также главный разлом, проходящий по висячему боку рудной

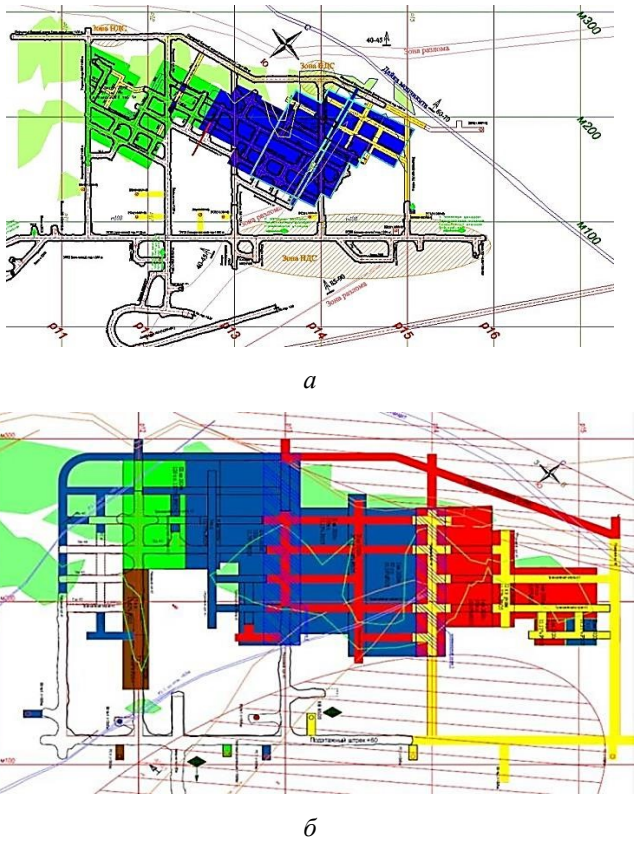
зоны, и разлом № 1, падающий под углом ≈45°. Физико-механические свойства пород представлены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Физико-механические свойства пород месторождения Олений ручей

Тип породы	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Объемный вес, т/м^3
Вмещающие породы	70	0,2	2,65
Рудное тело	40	0,35	3,0
Главный разлом	7	0,3	3,0
Разлом № 1	7	0,3	3,0

Анализ планов горных работ показал, что до отм. +100 м горные работы ведутся под углом к рудничной сетке координат, а ниже, начиная с отм. +80 м, очистная выемка и подготовительные выработки ориентированы по рудничной сетке (рис. 4.19).



а

б

Рис. 4.19. Проектное положение горных работ на месторождении Олений ручей: *а* — отм. +100 м; *б* — отм. +60 м

Исходя из того, что основной объем подземных горных работ планируется вести по рудничной сетке, было принято решение о формировании конечно-элементной модели по рудничной сетке координат.

Создание модели проводилось с использованием метода последовательных приближений. Основой моделирования служили разработанные ранее мелкомасштабные

модели: модель Хибинского массива и менее детальная модель месторождения Олений ручей, на границах которой были заданы силы в соответствии с параметрами гравитационно-тектонического поля напряжений по результатам измерений методом разгрузки.

При разработке модели Хибинского массива исходили из сложившихся представлений о региональных полях напряжений, основанных на многолетних исследованиях, включающих: инклинометрические измерения искривления стволов скважин, измерения напряжений методом разгрузки в пределах Хибинской апатитовой дуги, результатам визуального обследования выработок на отрабатываемых апатит-нефелиновых месторождениях.

В связи с недостаточным объемом данных натурных определений параметров поля напряжений месторождения Олений ручей к настоящему времени сложно дать однозначный ответ на вопрос о генеральном направлении действия максимального сжатия. Поэтому рассматривали два варианта нагружения модели:

— с действием σ_{max} на удалении от горных работ по простиранию рудной залежи;

— с действием σ_{max} на удалении от горных работ вкрест простирания рудной залежи.

Узловые перемещения, заданные в качестве граничных условий для новой крупномасштабной модели, были получены путем интерполяции. Корректировка граничных условий проводилась с учетом данных измерений НДС методом разгрузки, а также результатов обследования горных выработок.

По результатам натурных определений параметров поля напряжений методом разгрузки установлено, что уровень максимальных сжимающих напряжений σ_{max} варьирует в пределах 20÷40 МПа в интервале абсолютных высотных отм. +40÷240 м, а азимут меняется от 70 до 110° (табл. 4.10).

Таблица 4.10

Результаты измерений напряжений методом разгрузки в подземных выработках месторождения Олений ручей

Станция, №	Дата	Рудничные координаты			σ_{max}, МПа	$\sigma_{пр}$, МПа	σ_{min}, МПа	Азимут σ_{max}, град
		Разрез, м	Магистраль, м	Выс. отм., м				
1	12.2012	17+60	–450	+240	36	10	–2	75
2	12.2013	18+50	+105	+240	30	16	12	90
3	03.2018	10+35	+275	+100	21	11	4,6	110
4	03.2018	13+20	+112	+40	42	26	14	71

Изменение значений максимальной горизонтальной пригрузки модели с глубиной представлено на рис. 4.20. Горизонтальная пригрузка в перпендикулярном направлении задавалась с коэффициентом 0,5, соответствующим отношению между измеренными величинами σ_{max} и $\sigma_{пр.}$.

По мере пополнения БД натурных определений параметров поля напряжений месторождения Олений ручей величины и направление граничных условий могут и, с большой вероятностью, будут корректироваться.

Выполнено расширение конечно-элементной модели месторождения для проведения регионального прогноза удароопасности на весь период отработки месторождения в соответствии с «Техническим регламентом…» [162]. В соответствии с Регламентом

объектом подземной разработки будут являться запасы руды нижнего яруса месторождения в границах горного отвода:

— по высоте — в отм. +180/–600 м;

— в плане — в границах геологических разрезов 2–35.

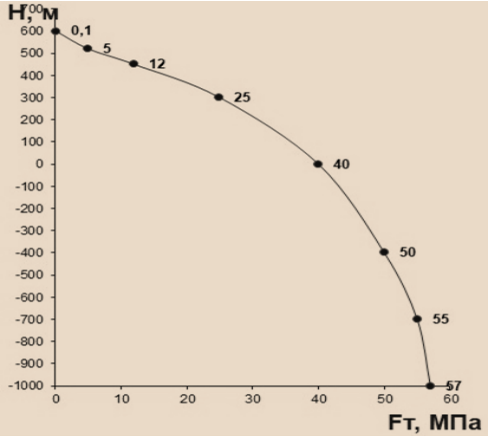


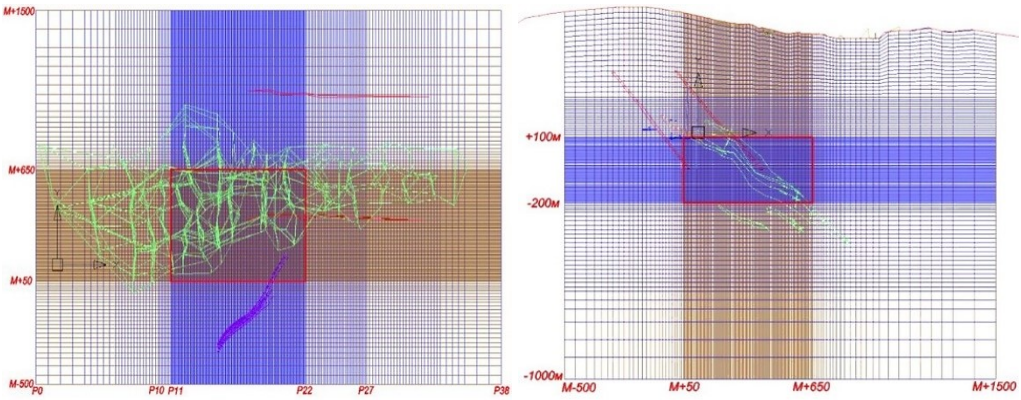
Рис. 4.20. Изменение максимальной горизонтальной пригрузки модели с глубиной

Исходя из данных условий была разработана объемная конечно-элементная модель, ограниченная в плане разрезами Р0–Р38 (3040 м) и магистралями М-500–М1500 (2000 м). Верхняя граница сетки конечных элементов совпадает с рельефом дневной поверхности, дно модели располагается на отм. 1000 м.

Область максимального сгущения сетки с размерами элемента 5×5×5 м^3 расположена в зоне ведения фактических горных работ и охватывает зону ведения проектных горных работ на несколько десятилетий вперед. В итоге полная размерность конечно-элементной модели составила 171×278×123 сечений и 5 847 174 элемента.

При создании модели было сымитировано актуальное рудное тело, разломные структуры (Главный разлом 3 и разлом 1) и фактическое положение горных работ. Размеры элементов 5×5×5 м^3 в области максимального сгущения обеспечивают достаточную детализацию при проведении прогнозных расчетов НДС как по разрабатываемым планам горных работ, так и для варьирования различного порядка и параметров очистных секций при текущей оценке геомеханической ситуации на отдельных участках месторождения.

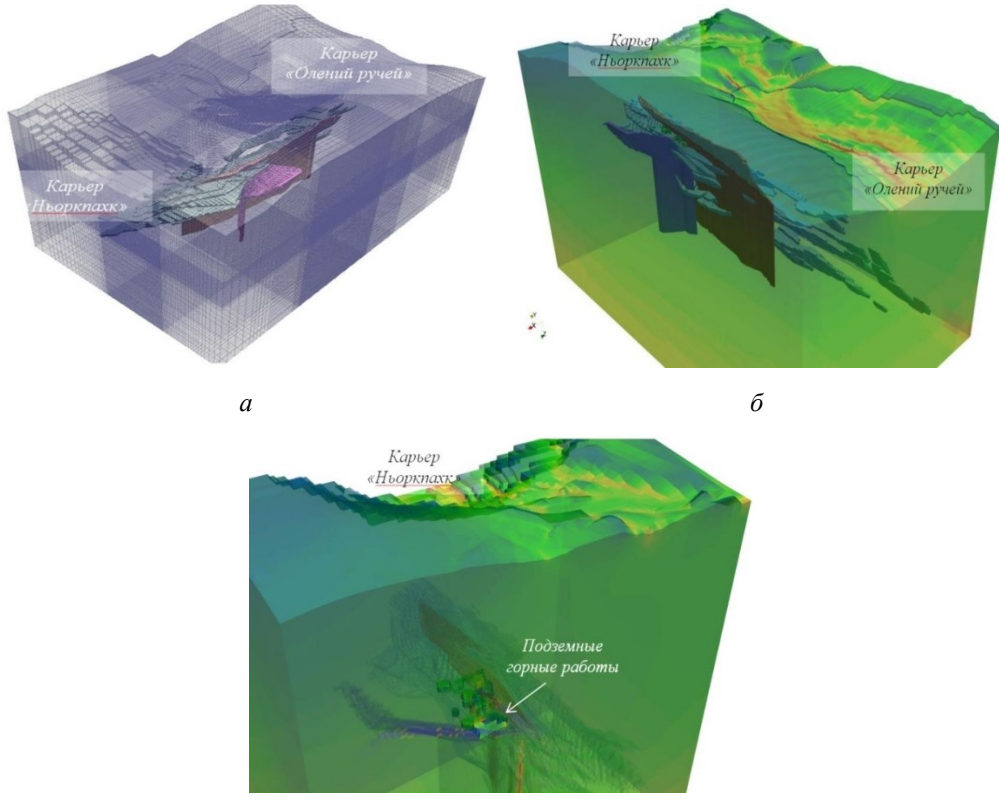
Увеличение элементов от зоны сгущения к границам модели происходит постепенно, и пользователь имеет возможность моделирования отработки запасов и определения тенденций трансформации параметров поля напряжений до отм. –600 м в пределах разрезов 4÷35. Кроме того, в программном комплексе Sigma GT реализована и автоматизирована функция локального моделирования, которая позволяет уплотнить сетку на интересующем пользователя участке месторождения в нужное количество раз по каждому из направлений и провести расчеты с той степенью детализации, которая необходима для конкретного исследования. В качестве начального приближения берутся расчетные параметры НДС из исходной модели. В приложении реализован выбор участка для локального моделирования как в координатах модели, так и в координатах рудника. На рис. 4.21 представлена сетка конечных элементов в плане и по типовому вертикальному разрезу с выделенной зоной максимального сгущения.



а *б*

Рис. 4.21. Разбиение модели месторождения Олений ручей: *а* — расположение сечений модели в плане; *б* — типовое вертикальное сечение с сеткой конечных элементов; ▭ — область максимального сгущения элементов

Объемный вид модели и результаты расчетов в 3D представлены на рис. 4.22, также приведены результаты с разрезом в районе ведения подземных горных работ.



а *б*

в

Рис. 4.22. Объемный вид разработанной модели: *а* — сетка; *б* — результаты расчетов для всей модели; *в* — результаты расчетов с разрезом вкрест простирания рудного тела в районе ведения подземных горных работ

Таким образом, новая разработанная конечно-элементная модель месторождения обеспечивает проведение регионального прогноза удароопасности на весь период отработки месторождения.

4.3.2. 3D-модель напряженно-деформированного состояния участка Гакман Юкспорского месторождения для рассмотрения перспективной отработки запасов комбинированным способом

Сгенерирована конечно-элементная 3D-модель массива горных пород включающего участок Гакман Юкспорского месторождения. Основой моделирования являются разработанные ранее мелкомасштабные модели: модель Хибинского массива и модель Кировского рудника. При разработке модели исходили из сложившихся представлений о региональных полях напряжений в Хибинах, опирающихся на многолетние натурные исследования на отрабатываемых апатит-нефелиновых месторождениях.

Модель участка Гакман получена с помощью автоматической процедуры «вырезания» из модели Кировского рудника (рис. 4.23). На границах заданы узловые перемещения, рассчитанные путем интерполяции. После чего осуществляли корректировку геометрии рудных тел, подземных очистных пространств и карьерной выемки в соответствии с переданными КФ АО «Апатит» исходными материалами. Для удобства представления и интерпретации результатов расчетов модель ориентирована по рудничной сетке Юкспорского месторождения и участка Гакман.

Для вмещающих пород и руд взяты усредненные физические свойства, представленные в табл. 4.11.

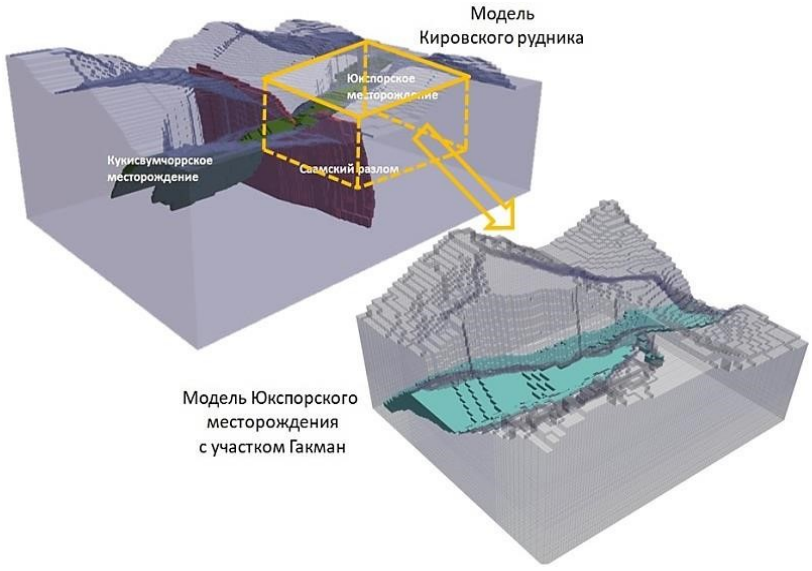


Рис. 4.23. Применение методики последовательных приближений для формирования модели участка Гакман

Таблица 4.11

Физико-механические свойства для горных пород Юкспорского месторождения

Показатели	Вмещающие породы	Породы рудного тела	Породы разломных структур	Мончекитовые дайки
Модуль упругости, ГПа	70	40	1,5	250
Коэффициент Пуассона	0,2	0,35	0,35	0,3
Плотность, т/м^3	2,65	3,00	3,00	3,00

Границы новой модели удалены на достаточное расстояние от зоны исследований в соответствии с принципом Сен-Венана. За счет формирования сетки конечных элементов с учетом фактических и проектных параметров открытых и подземных горных работ, а также геологических особенностей, модель позволяет проводить оценку НДС массива при отработке запасов исследуемого участка в течение продолжительного периода времени — 2020–2039 гг. В результате западная граница модели проходит по разрезу Р5Ю, а восточная — вблизи разреза 24Г, модель ограничена магистралями М+700 м и М-1000 м. Нижняя грань проходит по высотной отметке –300м, верхняя определяется рельефом дневной поверхности. Линейные размеры в плане 1960×1700 м (рис. 4.24), общая размерность модели составила 122×80×110 = 1 073 600 узлов. Максимальное сгущение сетки приурочено к зоне развития подземных горных работ в районе вероятных границ блока-целика, где минимальный размер элемента — 10×10×6 м. При размещении горизонтальных сечений опирались на фактические отметки подэтажей и откаточных горизонтов на Юкспорском месторождении.

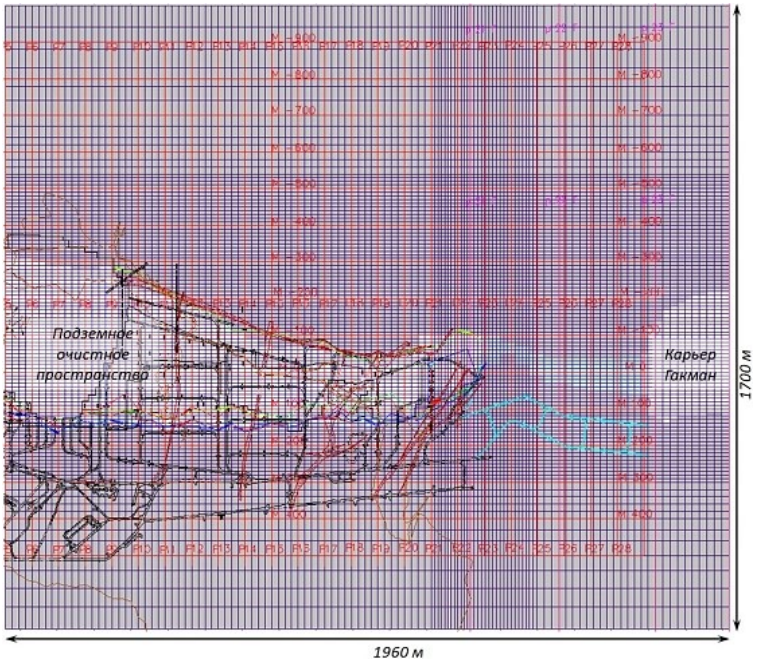


Рис. 4.24. Вид и параметры конечно-элементной модели в плане (гор. +320 м)

На рис. 4.25 приведено распределение максимальной и минимальной компоненты главных напряжений в 3D-модели с разрезом ее по простиранию в районе подземных очистных пространств и карьера «Гакман».

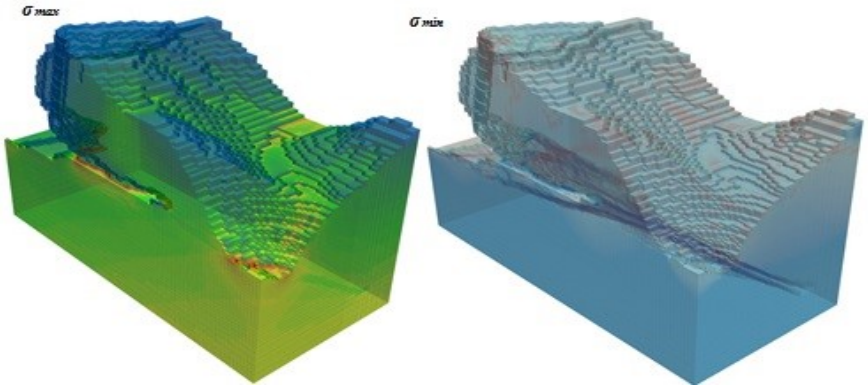


Рис. 4.25. Вид сгенерированной 3D-модели участка Гакман с результатами расчетов НДС в разрезе

4.3.3. Разработка модели месторождения Плато Расвумчорр для прогнозирования геомеханической ситуации при выемке прибортовых и подкарьерных запасов Центрального карьера

Месторождение апатит-нефелиновых руд Плато Расвумчорр находится в Кировском районе Мурманской области, в 10 км к востоку от г. Кировска. Месторождение с 1964 г. разрабатывалось открытым способом Центральным рудником, с 1997 г. начата подземная выемка запасов северо-западного фланга месторождения Расвумчоррским подземным рудником. Рельеф района сильно расчлененный. Месторождение приурочено к горам Расвумчорр и Восточный Расвумчорр с максимальными абсолютными отм. +1050 и +975 м соответственно.

На западе месторождение граничит с месторождением Апатитовый цирк, на востоке залежь по простиранию практически выклинивается, к северу по падению переходит в Эвеслогчоррскую залежь. Форма рудной залежи имеет пластообразно-линзообразную форму. Падение — северное-северо-восточное (азимут 5º). Мощность изменяется от 100 м (в раздувах до 200 м) в верхней части до выклинивания до первых метров на абсолютных отм. –100÷–200 м, составляя в среднем 62,5 м. Размеры рудной залежи составляют по простиранию 3200 м, по падению — 500÷800 м. Рудная залежь вмещает прослои пустых пород мощностью до 6 м.

Строение руд и вмещающих пород месторождения весьма сложное. В распространении руд отмечается зональность: более бедные сетчатые и линзовидно-полосчатые руды с прослоями блоковых руд приурочены к лежачему боку рудного тела. Висячий бок сложен богатыми пятнистыми и пятнисто-полосчатыми рудами. Средние показатели P_2O_5 в рудном теле в целом с глубиной уменьшается. Содержание P_2O_5 в рудах верхней контактной зоны колеблется в пределах 20–28 %, в нижней зоне — 4–11 %.

Рудная залежь пересекается продольными крутопадающими зонами шпреуштейнизации мощностью от 3…5 до 10...20 м. В целом превалируют

слаботрещиноватые и среднетрещиноватые породы. Встречаются зоны раздробленных трещинами и окисленных руд и пород. Доля их незначительна — 3–9 % и с глубиной уменьшается.

Анализ нарушенных зон и разломных структур позволил выделить те из них, которые могут оказать существенное влияние на НДС в окрестности планируемых горных работ. На рис. 4.26 представлен объемный вид геологической модели в ГГИС Mineframe с выделенными структурами для построения конечно-элементной модели на основе переданной КФ АО «Апатит» базы данных.

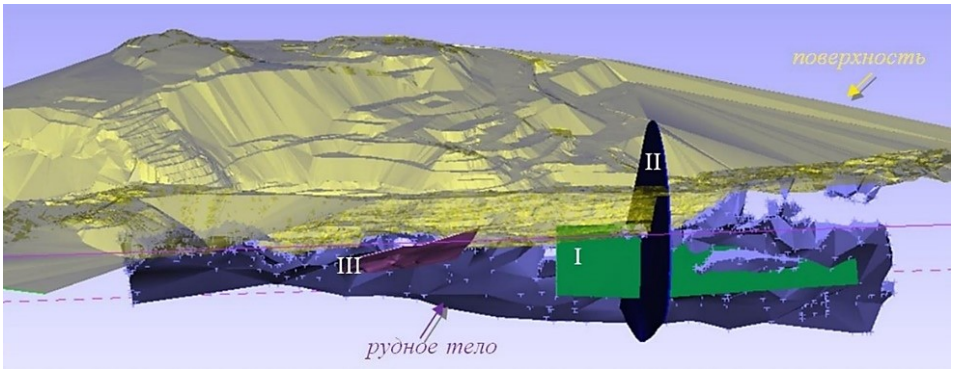


Рис. 4.26. Модель месторождения Плато Расвумчорр в ГГИС Mineframe с выделенными структурами для построения конечно-элементной модели

В модель включены:

1) дайка мончекитов D1 (Дразнящее эхо) (*I* на рис. 4.26) — крупнейший тектонический элемент восточной части изучаемого района, субвертикальная;

2) зона с интенсивным проявлением трещиноватости (*II* на рис. 4.26), развитая в восточной части месторождения, в пределах профилей 1В–11В, выделенная ранее по инженерно-геологическим скважинам. Характеризуется заметным снижением физико-механических показателей массива пород, уменьшением сцепления до 5÷10 МПа по трещинам;

3) ослабленная зона S10 (*III* на рис. 4.26), выделена и геометризирована в центральной части изучаемого района. Она имеет центриклинальное залегание.

Мощность зоны варьирует в пределах 3–6 м, протяженность по простиранию составляет около 400 м, по падению — около 320 м. Она подсекает траекторию автоуклона и с большой вероятностью пересечет выработки проектируемого добычного горизонта.

Геомеханические условия разработки любого месторождения определяются физико-механическими свойствами руд и вмещающих пород, тектоникой месторождения и напряженным состоянием пород в массиве (в условиях естественного залегания).

Месторождение сложено в основном хрупкими и прочными породами, при этом в массиве имеет место гравитационно-тектонический тип НДС с превышением действия собственного веса пород более чем в 2 раза $\sigma_{max} / \sigma_{верт.}^{ср.} > 2$. Причем с глубиной фиксируется рост действующих тектонических напряжений. Данные факторы

предопределили отнесение месторождения Плато Расвумчорр к склонным и опасным по горным ударам с глубины 300 м от дневной поверхности.

Результаты измерений параметров НДС прибортового массива пород карьера Центрального рудника ОАО «Апатит», выполненные в 2003–2005 гг. ГоИ КНЦ РАН, показали уровень σ_{max} 17–26 МПа на абсолютных высотных отм. +580–+595 м и незначительной глубине от начального рельефа (5–20 м) [162]. Обобщенные данные о максимальных сжимающих напряжениях по результатам измерений на Расвумчоррском руднике и их изменение с глубиной в руде и вмещающем массиве приведены в табл. 4.12 [163]. Часть измерений выполнена на месторождении Апатитовый цирк, часть — на месторождении Плато Расвумчорр.

Таблица 4.12

Обобщенные данные измерений НДС на Расвумчоррском руднике

Горизонт, м	Максимальные напряжения σ_{max}, (руда/порода) МПа	Азимут вектора σ_{max}, °	Наклон вектора σ_{max} к горизонту, °
+600	15–25/25–40	120±30	0±25
+530	20–30/30–50	120±30	0± 5
+470	25–35/35–55	110±30	0±25
+450	25–35/35–55	110±30	0±25
+420	30–40/40–60	110±30	0±25
+310	35–50/50–70	110±30	0±25

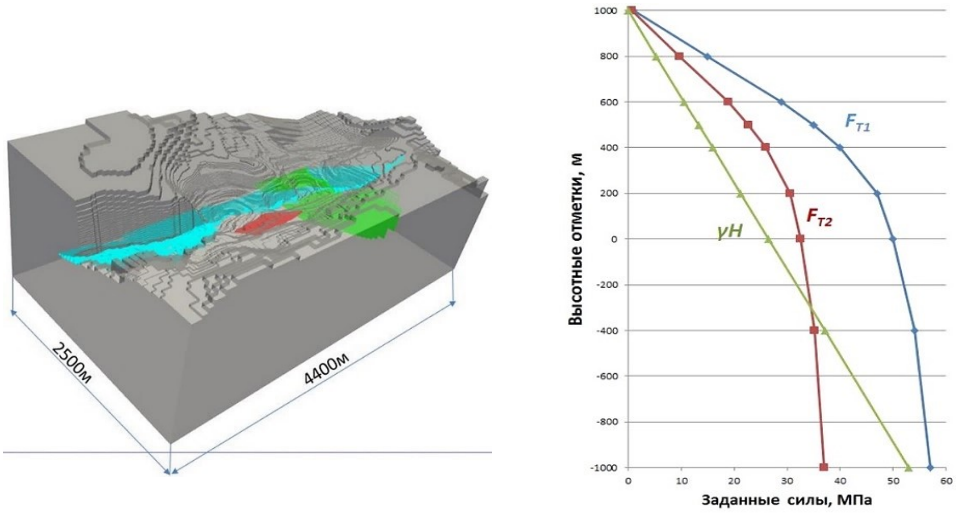
Полученные ранее результаты измерения напряжений [164], выполненные в подземных горных выработках околоствольного двора Центрального рудника на гор. +440 м (глубина от поверхности 600 м) засвидетельствовали величину σ_{max} = 78 МПа при субгоризонтальной ориентации максимальной компоненты главных напряжений по простиранию рудного тела.

В 2020–2021 гг. ООО «Геотехническое бюро» были проведены измерения напряжений на 3 замерных станциях в подготовительных выработках месторождения Плато Расвумчорр [165]. Определено направление действия максимальной компоненты, близкое к простиранию рудной залежи (азимут от 83° до 94°). При этом величины σ_{max} составили от 33 до 40 МПа, а величины промежуточной компоненты главных напряжений $\sigma_{пр.}$ — от 22 до 30 МПа; σ_{max} и $\sigma_{пр.}$ — субгоризонтальные с углом падения от 3 до 14°.

Таким образом, все полученные данные подтвердили сформировавшиеся ранее представления о типе и параметрах исходного НДС месторождения, а именно гравитационно-тектонический тип с субмагистральным действием максимальных сжимающих напряжений и соотношением максимальной и промежуточной компонент $\sigma_{пр.} = (0{,}6 \div 0{,}7)\ \sigma_{max}$. Минимальная компонента напряжений соответствует действию собственного веса пород γH и характеризуется существенной изменчивостью за счет больших перепадов естественного и техногенного рельефа дневной поверхности. Понятно, что в настоящее время в связи с отсутствием выработок параметры НДС существенной части моделируемого массива еще не изучены, однако указанные выше закономерности с высокой вероятностью распространяются и на эту область. По мере развития горных работ как косвенные, так и прямые данные о геомеханическом

состоянии массива будут пополняться и при необходимости учитываться в виде корректировки граничных условий.

В модель включены естественные и техногенные факторы, влияющие на НДС массива: рудные тела, крупные структурные нарушения, гористый рельеф дневной поверхности, сложная геометрия карьера «Центральный» и подземных горных работ Расвумчоррского рудника, параметры обрушения подработанной толщи пород (рис. 4.27 *а*). На боковых гранях модели заданы тектонические силы по нелинейному закону, коэффициент соотношения тектонических сил составляет 0,65: $F_{T1} = 0{,}65 \times F_{T2}$ (рис. 4.27 *б*). При задании граничных условий были учтены данные измерений параметров НДС на месторождении в 2021 г.



а *б*

Рис. 4.27. Модель месторождения Плато Расвумчорр: *а* — общий вид; *б* — графики задания сил

В итоге получены параметры техногенного поля напряжений с учетом фактической горнотехнической ситуации (рис. 4.28). Результаты расчетов хорошо коррелируют с данными измерения напряжений как вблизи подземных горных работ Расвумчоррского рудника, так и с параметрами НДС на участках перспективной выемки запасов. Определено местоположение зон повышенной концентрации напряжений — под элементами дна карьерной выемки.

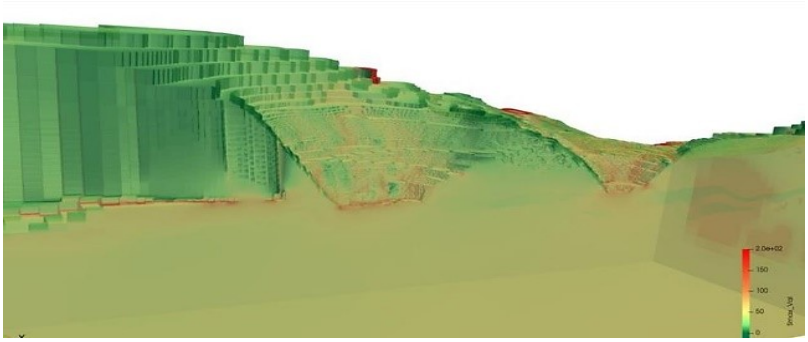


Рис. 4.28. Распределение σ_{max} в окрестности месторождения Плато Расвумчорр в разрезе по простиранию рудной залежи

Разработанная экспертная система с комплексом разномасштабных моделей будет использоваться для оперативных прогнозных геомеханических расчетов с учетом основных геологических и горнотехнических факторов, выявления зон повышенной удароопасности и служить основой при принятии решений по порядку и параметрам горных работ при выемке прибортовых и подкарьерных запасов месторождения Плато Расвумчорр в высотных отм. +700÷+250 м протяженностью более 3 км. Время предполагаемой эксплуатации системы — 15–20 лет.

Особенностью разработанной экспертной системы является адаптация интерфейса и самой модели к потребностям горного предприятия, что делает ее важным инструментом ИТР рудника при геомеханической оценке и обосновании текущих и перспективных горных работ.

4.3.4. Разработка объемной конечно-элементной модели Ждановского месторождения

В результате натурных исследований параметров НДС массива Ждановского месторождения сульфидных медно-никелевых руд определено, что поле напряжений является гравитационно-тектоническим с преобладанием тектонической составляющей, что предопределяет усложнение геомеханических условий по мере углубления горных работ и увеличивает актуальность прогнозов перераспределения напряжений в окрестности создаваемых обнажений.

Разработана 3D-модель, где граничные условия заданы на основе измерений напряжений in situ методом разгрузки, проведенных ГоИ КНЦ РАН в 2016÷2020 гг. Свойства пород и геометрия геологических и технологических объектов взяты из результатов лабораторных определений физико-механических и прочностных свойств образцов породных разностей, а также геологической и маркшейдерской документации.

Тектоническая пригрузка массива вводилась в виде узловых сил на боковых гранях модели. Для расчета абсолютных величин была проведена интерполяция полученных натурных данных в диапазоне проведенных измерений (–260÷–780) и экстраполяция на участках массива от –260 м до дневной поверхности и от –780 м до дна модели (рис. 4.29 *а*). При этом учитывали тенденции изменения напряжений с глубиной на других месторождениях Кольского региона.

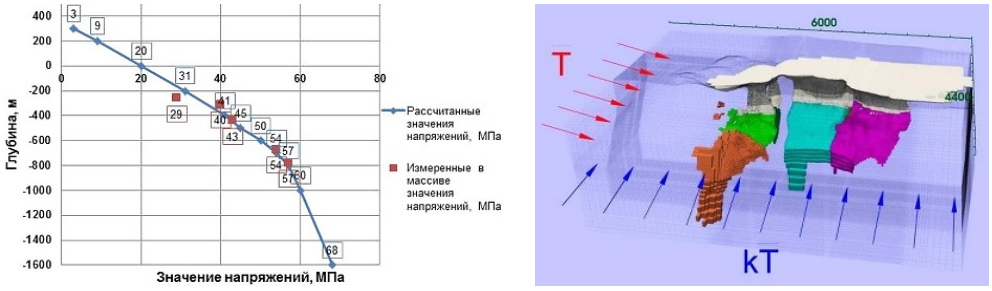
Определено соотношение максимальных и минимальных значений субгоризонтальных напряжений:

$$k = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0{,}25.$$

Расчетные величины напряжений σ_{max} были заданы в качестве граничных значений тектонических сил, действующих на грани в плоскости *XZ* модели. Для плоскостей *YZ* были заданы напряжения с учетом коэффициента *k* (рис. 4.29 *б*). Грани, противоположные граням с нагрузками, были закреплены по соответствующим направлениям. По нижней грани отсутствует возможность перемещений по всем направлениям ($ux = vy = wz = 0$).

Полученные результаты моделирования согласуются с данными натурных измерений и результатами визуального обследования горных выработок. Параметры расчетного НДС массива подтверждают высокую вероятность проявления

динамических форм горного давления ниже отм. –400 м, что соответствует глубине 700 м от дневной поверхности.



а *б*

Рис. 4.29. Изменение расчетных и полученных in situ значений σ_{max} с глубиной (*а*); схема тектонического нагружения модели (*б*)

Выявлены особенности распределения напряжений в окрестности очистных пространств Центрального рудного тела, заключающиеся в более высоком уровне сжатия в восточной части Центрального рудного тела и вмещающих его пород, что связано с геометрией вышележащих карьерных выемок; дополнительном приросте сжимающих напряжений на участках выемки рудного тела с малой мощностью (рис. 4.30).

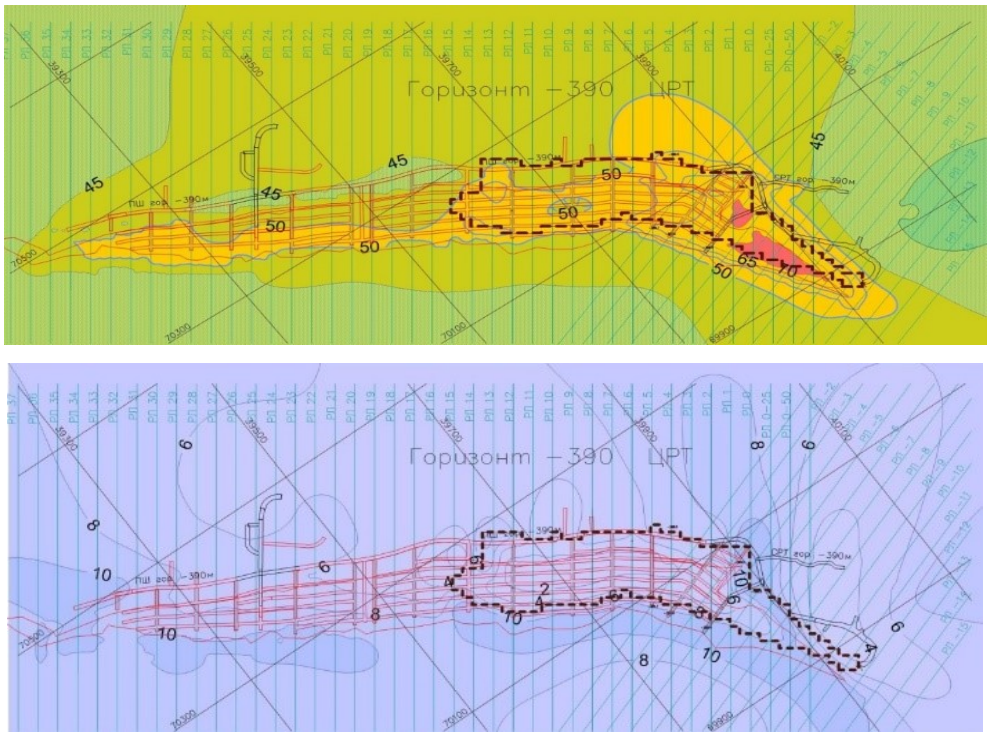


Рис. 4.30. Распределение напряжений на горизонте –390 м. Пунктиром показаны границы очистного пространства гор. — 370 м

Таким образом, на основе натурных определений параметров поля напряжений, лабораторных исследований физико-механических свойств пород массива Ждановского

месторождения, учета комплекса геологических и технологических факторов разработана геомеханическая 3D-модель, позволяющая оценивать изменения НДС при развитии подземных горных работ до глубины 1 тыс. м от дневной поверхности. Полученные параметры НДС массива подтверждают высокую вероятность проявления динамических форм горного давления ниже отм. –400 м. Выявлены особенности распределения напряжений в окрестности очистных пространств Центрального рудного тела, заключающиеся в более высоком уровне сжатия в восточной части Центрального рудного тела и вмещающих его пород и дополнительном приросте сжимающих напряжений на участках выемки рудного тела с малой мощностью.

4.3.5. Развитие расчетного модуля ПО Sigma GT для моделей повышенной размерности, более 10 млн элементов

Более детальное моделирование НДС массива горных пород с внедрением контакт-элементов на границах нескольких структурных неоднородностей приводит к повышению размерности конечно-элементных сеток моделей и, соответственно, увеличению времени расчетов на порядок и более. Наряду с использованием ПО Sigma GT сотрудниками отдела геомеханики Горного института КНЦ РАН, оно также регулярно используется на горных предприятиях (КФ АО «Апатит», АО «СЗФК», АО «Кольская ГМК») для текущего прогнозирования геомеханической ситуации. Поэтому расчет варианта распределения НДС должен производиться за приемлемое время (не более 1 ч), т. е. должна сохраняться некая интерактивность взаимодействия пользователя с программным продуктом. Для сокращения времени счета использовали параллельные вычисления.

Зависимость времени расчета задачи от масштаба конечно-элементной сетки является кубической, а не линейной. На сегодняшний день решаемые задачи приблизились к границам вычислительных мощностей, выше которых уже будет невозможно производить расчеты на современных персональных компьютерах. Например, объединенная модель месторождений Кукисвумчорр и Юкспор включает в себя порядка 10 млн конечных элементов и требует как минимум 32 ГБ оперативной памяти; разработанная модель месторождения Плато Расвумчорр составляет 16 млн элементов с пиковой загрузкой оперативной памяти персонального компьютера более 50 ГБ.

Проблемы внедрения алгоритма по включению трехмерных контактных элементов в программный комплекс:

1) увеличение вычислительных мощностей компьютеров, решающих задачи. На данный момент в Горном институте КНЦ РАН имеется и используется вычислительный кластер с производительностью 3,9–4,8 терафлопс и объемом оперативной памяти 384 ГБ на один из четырех узлов, это позволяет решать масштабные задачи моделирования НДС массивов горных пород месторождений. Однако непосредственно на предприятии горный инженер не обладает доступом к подобному оборудованию, что ограничивает возможности использования программного комплекса SigmaGT;

2) применение параллельных алгоритмов для уменьшения времени расчета задачи. На сегодняшний день активно развиваются различные технологии параллельных

вычислений. На рынке представлено множество программного обеспечения с открытым исходным кодом. Этот подход осложнен необходимостью модификации готовых алгоритмов с учетом конкретной технологии распараллеливания. Каждая такая технология предоставляется в виде низкоуровневого API (программный интерфейс), что влечет высокие временные издержки на изучение и их освоение;

3) полученная при внедрении слоев трехмерных контактных элементов глобальная матрица жесткости является вырожденной, т. к. содержит одинаковые строки, следовательно, ее определитель будет равняться нулю. При решении такой системы уравнений следует учитывать нулевое пространство матрицы (пространство содержащее «нулевые» элементы).

Исходя из вышеперечисленного было принято решение по внедрению программного обеспечения с API более высокого уровня. Наиболее подходящим для поставленных целей оказался портативный переносимый инструментарий для научных расчетов PETSC – Portable, Extensible Toolkit for Scientific Computation. Библиотека разработана для параллельного решения линейных и нелинейных систем уравнений, возникающих при дискретизации уравнений в частных производных. Пакет содержит большой набор параллельных линейных и нелинейных решателей, которые можно использовать во многих языках программирования Fortran, C, C++, Python. В настоящее время с использованием библиотеки PETSC проведено распараллеливание расчетных процессов при решении систем линейных уравнений в ПО Sigma GT, что позволило сократить время счета в 10 и более раз.

5. ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОГО ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Возрастание антропогенных нагрузок на окружающую среду происходит в том числе и при выемке полезных ископаемых. Это обусловлено усложнением экологических, геомеханических и геологических условий разработки месторождений, что связано прежде всего с истощением наиболее богатых и легкодоступных для освоения участков и увеличением глубины горных работ. При этом растет себестоимость добычи полезных ископаемых и увеличиваются затраты на обеспечение их безопасности. Геомеханическое обоснование горных работ для конкретных геологических и горнотехнических условий позволяет сохранять эффективность горного производства и минимизировать геодинамические риски.

Основными задачами геомеханического обоснования являются определение оптимального порядка развития горных работ, оценка устойчивости участков массива и элементов горной технологии, разработка оптимальных вариантов разгрузочных мероприятий и крепления, обеспечивающих безопасность горного производства.

5.1. Геомеханическое обоснование безопасной отработки запасов глубоких горизонтов удароопасных месторождений Хибинского массива

Хибинский массив является крупнейшей сырьевой базой апатита, не имеющей аналогов в мире. В настоящее время разработку 6 Хибинских месторождений (Кукисвумчоррское, Юкспорское, Апатитовый цирк, Плато Расвумчорр, Коашвинское и Ньоркпахкское) ведет КФ АО «Апатит», месторождение Олений ручей отрабатывает АО «СЗФК». В целом за период освоения добыто около 2,5 млрд т руды.

Важнейшей с точки зрения геомеханического состояния характеристикой Хибинского массива является его принадлежность к тектонически напряженным массивам. Характерными признаками тектонически напряженных массивов являются специфические проявления горного давления в выработках, дискование керна, азимутальные искривления стволов скважин, что обусловлено действием горизонтальной составляющей тензора напряжений значительно превышающей вертикальную. Для отрабатываемых месторождений Хибинского массива это подтверждено инструментальными измерениями напряжений методом разгрузки.

Все апатитовые месторождения Хибин отнесены к склонным и опасным по горным ударам на глубине ведения подземных горных работ [109, 166–167]. При этом неизбежное углубление горных работ и их интенсификация в последние годы приводят как к повышению фонового уровня напряжений, так и к увеличению по площади и абсолютным величинам зон концентрации напряжений в окрестности продвигающихся фронтов горных работ и элементов горной технологии. Следствием таких изменений НДС являются проявления горного давления в выработках вплоть до динамического заколообразования и горных ударов. С другой стороны, на отдельных участках массива имеет место избыточная разгрузка массива, что способствует формированию и развитию зон близких к критическим растягивающих напряжений и разрушению

целиков между выработками по имеющимся неоднородностям и ослабленным зонам. Из этого следует, что безопасное ведение горных работ на глубоких горизонтах Хибинского массива требует соответствующего геомеханического обоснования. Решение данной задачи возможно только при применении комплекса натурных и численных методов. Результаты натурных исследований дают необходимую первичную информацию о напряженном состоянии массива пород, устойчивости горных выработок, камер, целиков и других объектов геотехнологии. В свою очередь численные методы, опираясь на полученные данные, позволяют осуществлять прогноз напряженного состояния при различных вариантах ведения горных работ, а также производить оценку эффективности региональных и локальных мероприятий по разгрузке массива. Расчеты НДС выполнены в программном комплексе Sigma GT, разработанном в Горном институте КНЦ РАН [168].

5.1.1. Выбор оптимального по геомеханическим условиям порядка развития горных работ на месторождении Олений ручей

В соответствии с действующим проектом на отработку запасов на месторождении Олений ручей предусмотрено применение двух систем разработки: с открытым выработанным пространством и подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды. Очистная выемка производится с оставлением междукамерных целиков (МКЦ). С увеличением глубины геомеханические условия ухудшаются, поэтому при планировании горных работ на нижележащих горизонтах необходимо обоснование порядка ведения работ, места разрезки, а в случае дополнительных разрезок — размеров МКЦ.

5.1.1.1. Исследование напряженного состояния массива горных пород месторождения Олений ручей по результатам визуального осмотра горных выработок

В 2019 г. выполнен ряд циклов визуального обследования горных выработок подземного рудника «Олений ручей», доступных для посещения, с целью выявления участков с внешними признаками удароопасности, оценки степени опасности, аналитической обработки полученных результатов. Наблюдения проводились на отм. +140, +120, +100, +80, +60, +40, 0 м, а также по Автоуклону № 2 до отм. –17 м, Конвейерному и Вентиляционному уклонам.

Подавляющее большинство выработок закреплено торкрет-бетоном или комбинированными видами крепи. На участках, где во время проходки отмечались проявления повышенного горного давления, выполнялись профилактические мероприятия (бурение разгрузочной строчки шпуров с последующим креплением торкрет-бетоном), показавшие достаточно высокую эффективность в сохранении устойчивости контура выработки. Тем не менее при попадании выработок в зону опорного давления от очистных работ и связанного с этим изменения параметров тензора напряжений проявления горного давления отмечаются и в ранее закрепленных выработках.

Гор. +140 м — отмечено незначительное динамическое заколообразование по Полевому штреку в районе Р-10+30, а также на участках протяженностью 1–2 м, приуроченных к границе отбойки.

Гор. +120 м — здесь так же, как и на отм. +140 м, в нарезных выработках (ТС-81 ТШ-26) отмечены участки протяженностью 2–3 м с аналогичными нарушениями, приуроченными к границе вышележащей отбойки +140 м. Кроме того, в Полевом штреке, в районе Р8+40, на участке протяженностью 15 м отмечается

незначительное динамическое заколообразование, обусловленное пересечением выработкой пологонаклонной разломной структуры, а также на участке протяженностью 45 м (до забоя) — динамическое заколообразование по сопряжению кровли с западной стенкой (рис. 5.1, 5.2).

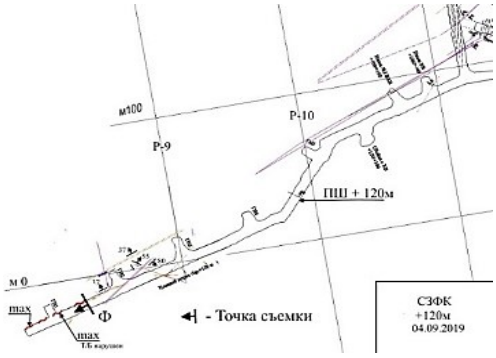


Рис. 5.1. Полевой штрек +120 м



Рис. 5.2. Полевой штрек гор. +120 м, от ГН-1 (Р-8) на юг

На гор. +100 м практически все выработки закреплены. Проявления внешних признаков удароопасности незначительны. Наиболее отчетливо наблюдаются в незакрепленных выработках штрекового направления (Подводящая к РС-3 и Подводящая к ВВ-3) (рис. 5.3). Отмечаются отдельные фрагменты нарушения торкрет-бетона по ТШ-18 и ТС-7 (рис. 5.4, 5.5).



Рис. 5.3. Бл. 12–15, гор. +100 м, Подводящая к ВВ-3

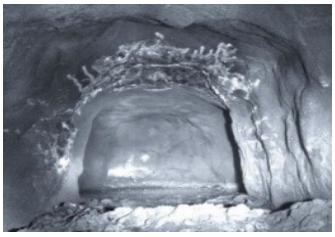


Рис. 5.4. Гор. +100, ТС-7, от ТШ-18 на северо-запад



Рис. 5.5. Гор. +100 м, ТШ-18, от ТС-7 на ЮЗ

Гор. + 80 м — динамическое заколообразование наблюдается преимущественно в выработках штрекового направления на участках, расположенных в зоне опорного давления от очистных работ вышележащего гор. +100 м (рис. 5.6):

— ТШ-51 — участок протяженностью 20 м от отрезного орта № 53 на север. Отмечается незначительное динамическое заколообразование по кровле (рис. 5.7);

— ТШ-52 — участок протяженностью 10 м от ТС-56 на север, динамическое заколообразование по кровле, приурочен к лежачему боку разломной структуры. Отмечается куполение с мощностью отслоений до 0,6 м (рис. 5.8);

— Разрезной орт 54 — участок протяженностью 5 м от ТШ-53 на запад, контролируется двумя параллельными тектоническими трещинами.

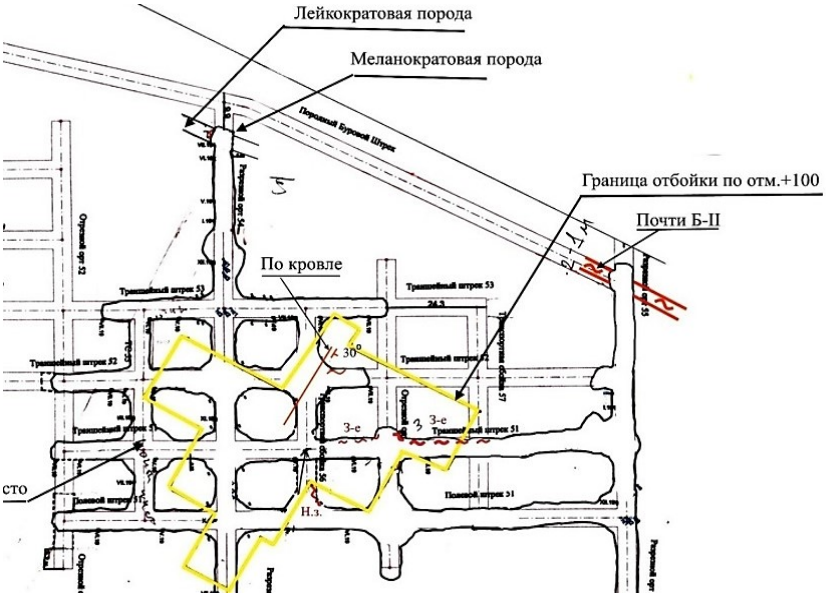


Рис. 5.6. Гор. +80 м

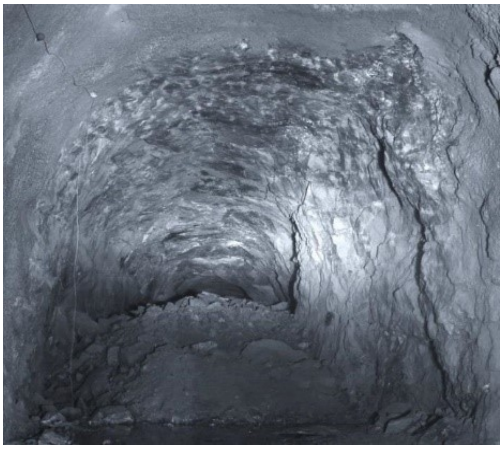


Рис. 5.7. ТШ-51, от Разрезного орта 55 на юг

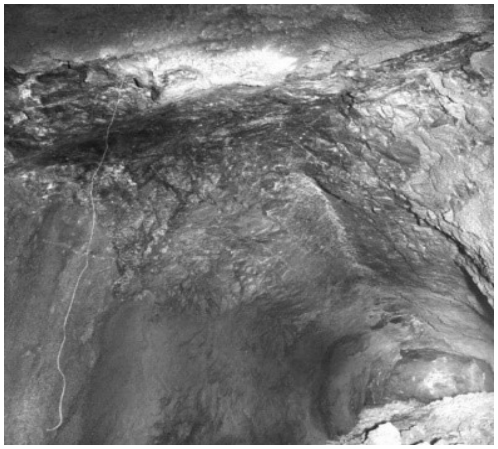


Рис. 5.8. Бл. 12–15, гор. +80 м, ТШ-53, от Разрезного орта 54 на север

На отдельных участках отмечено резкое затухание проявлений (в течение нескольких суток) на одних отрезках и интенсификация проявлений на других во время проходки нарезных выработок. Так, при обследовании забоя по Разрезному орту 54 29.05.2019 г. отмечалось динамическое заколообразование, место выглядело свежим. При повторном обследовании 4.06.2019 г. выработка отстоялась, кровля запыленная, на подошве не обнаружено свежих заколов.

Гор. +60 м — внешних признаков удароопасности в доступных для посещения выработках не обнаружено.

Гор. +40 м — заезд на гор. +40 м. Отмечено незначительное динамическое заколообразование, приуроченное к зоне влияния мончикитовой дайки. На сопряжении

данной выработки с Подэтажным штреком отмечается нарушение торкрет-бетона с фрагментами динамического заколообразования по кровле.

Гор. +0 м — по наблюдениям при проходке выработок в штрековом направлении (ЭТШ, камеры УПП) динамическое заколообразование по кровле и ее восточному сектору отмечалось на всем протяжении (рис. 5.9, 5.10). На отдельных участках наблюдалась миграция зоны максимальных разрушений по углу наклона, контролируемая дизъюнктивными структурами (рис. 5.11). В выработках ортового направления отмечались участки с незначительным динамическим заколообразованием протяженностью до 5 м. Как правило, проявление внешних признаков приурочено к зонам влияния разломных структур (например, заезд в камеру КОСО) (рис. 5.12).

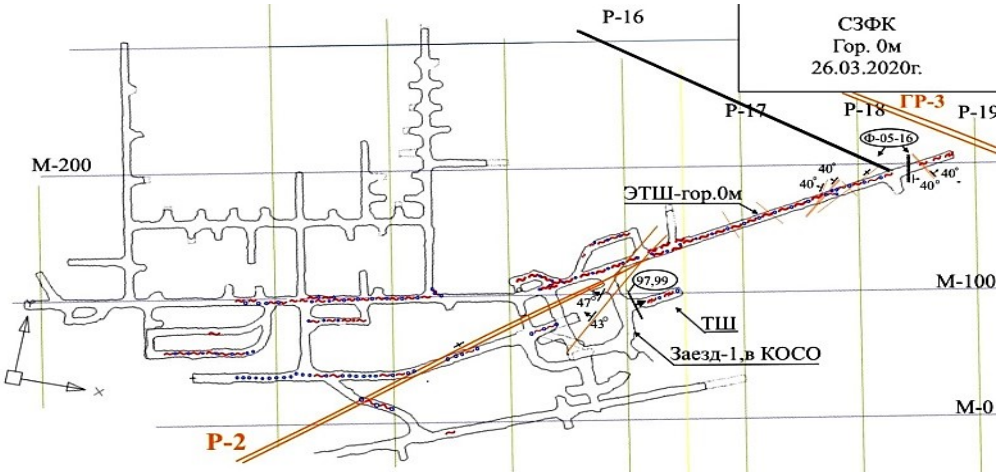


Рис. 5.9. Гор. 0 м

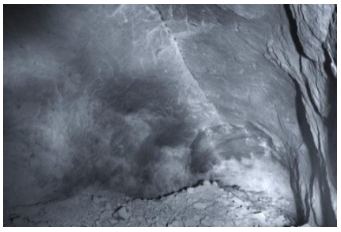


Рис. 5.10. Камера УПП, Забой на Р-16



Рис. 5.11. ЭТШ+0, от УПП на север



Рис. 5.12. Заезд в камеру КОСО

Автоуклон № 2 — проходка велась в незначительных объемах, внешние признаки установлены в районе ПК 22-50 протяженностью 15 м по кровле и ее восточному сектору.

Конвейерный уклон — динамическое заколообразование по кровле на участке протяженностью 10 м от ПК-4+50 на юг (до забоя).

По результатам визуального осмотра горных выработок можно отметить следующее.

1. В целом ситуация по фактору горного давления стабильна, без ярких очагов разрушений в динамической форме.

2. Наличие внешних признаков удароопасности приурочено преимущественно к динамически активным разломам (Р1), а также к зоне опорного давления от очистных работ вышележащего горизонта.

3. Наибольшему разрушению подвергаются выработки штрекового направления, в блоках, контролируемых лежачим крылом разлома Р1 и частично Р2.

5.1.1.2. Оценка состояния приконтурного массива месторождения Олений ручей на основе контроля разрушения скважин

В рамках решения задачи по исследованию геомеханического состояния массива горных пород с использованием комплекса инструментальных натурных и численных методов было проведено обследование состояния вееров скважин, предназначенных для отбойки.

Метод контроля разрушения скважин (КРС) позволяет получить оперативную информацию о состоянии приконтурной части массива во время проходки выработок без нарушения технологического цикла. При интенсивных проявлениях внешних признаков удароопасности в районе замерной станции и невозможности безопасного осуществления инструментальной оценки допускается визуальная оценка протяженности «дорожки» и расположения максимума разрушения для определения категории удароопасности [167]. При определенных навыках результаты, полученные таким способом, вполне удовлетворяют требованиям обеспечения безопасного ведения работ в выработках с внешними признаками удароопасности.

При этом привлекать для бурения замерных скважин под метод КРС технические средства, не связанные с добычей, не всегда возможно. Поэтому в качестве одного из вариантов КРС предлагается использовать веера взрывных скважин.

В районе очистных работ выполняется бурение вееров скважин буровзрывных работ (БВР) на опережение, параметры которых удовлетворяют требованиям, предъявляемым к замерным станциям для метода КРС, и захватывают сектор, в котором в подавляющем большинстве случаев имеет место концентрация сжимающих напряжений на контуре выработки.

Для апробации данного способа получения информации был выбран гор. +100 м на участке, расположенном в зоне влияния очистных работ отм. +120 м, где со значительным опережением обурены веера БВР (рис. 5.13). Результаты наблюдения представлены в табл. 5.1. Анализ данных показывает приуроченность скважин с «дорожками» к зоне опорного давления от очистных работ вышележащего гор. +120 м (ТШ-110).

По ТШ-18 веера не обурены, но характер нарушения крепления указывает на наличие повышенного горного давления (рис. 5.14, 5.15).

Контрольные наблюдения за состоянием скважин БВР на предмет выявления «дорожек» как признака уровня действующих напряжений в исследуемой точке были проведены на гор. +80 м (рис. 5.16).

«Дорожки» в веерах скважин БВР обнаружены по ТШ-52, который закреплен торкрет-бетоном, состояние крепления в целом удовлетворительное (рис. 5.17).

Места обнаружения скважин с «дорожками» расположены под угловыми зонами очистных работ по отм. +100 м. Максимальное развитие «дорожек» наблюдается в скважинах, обуренных под углами 60÷70°. Данные наблюдения подтверждают результаты, полученные на гор. +100 м.

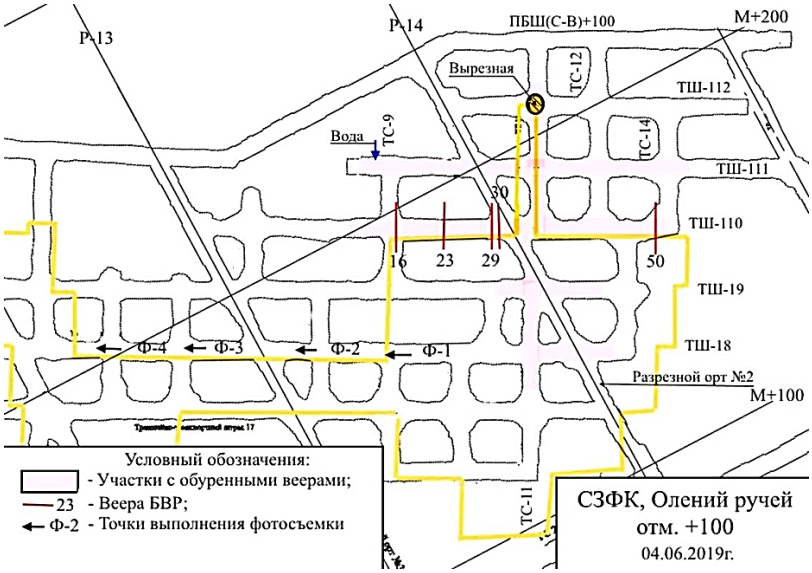


Рис. 5.13. Отм. +100, район оценки напряженного состояния массива методом КРС по скважинам БВР

Таблица 5.1

Наличие дорожек в скважинах ТШ-110

Наименование выработки	№№ веера	№№ скважины	Угол наклона скважины	*L*	Хр	Угол наклона «дорожки»	Наличие «дорожки»
ТШ-110	30	–		–	–		Нет
	29	3	70	1,5	0,3	10-ЮЗ	+
		4	78	1,5	0,3	10-ЮЗ	+
		5	84	1,5	0,3	10-ЮЗ	+
	28	3	70	2,0	0,2	10-ЮЗ	+
		4	78	2,0	0,2	10-ЮЗ	+
	27	2	61	1,0	0,15	20-ЮЗ	+
		3	70	1,0	0,15	20-ЮЗ	+
	26	2	61	0,5	0,10	20-ЮЗ	+
		3	70	0,5	0,10	20-ЮЗ	+
		4	78	0,5	0,10	20-ЮЗ	+
	25	1	61	0,5	0,10	20-ЮЗ	+
		2	71	0,5	0,10	20-ЮЗ	+
		3	81	0,5	0,10	20-ЮЗ	+
	24	1	61	---	---	–	Намечена
		2	71	---	---	–	Намечена
		3	81	---	---	–	Намечена
	23	1	61	0,3	0,00	30-ЮЗ	+
	22	–		-	-		Нет
	16	2	69	---	---		Намечена
	50	8	89	+	+	15-З-В	+
		9	94	+	+	15-З-В	+
		10	99	+	+	15-З-В	+
		11	104	+	+	15-З-В	+
		12	113	+	+	15-З-В	+
		13	122	+	+	15-З-В	+
		14	130	+	+	15-З-В	+



Рис. 5.14. Блок 12/15, отм. +100 м, ТШ-18, от РО-2 на ЮЗ



Рис. 5.15. Блок 12/15, гор. +100 м, ТШ-18, от ТС-9 на ЮЗ

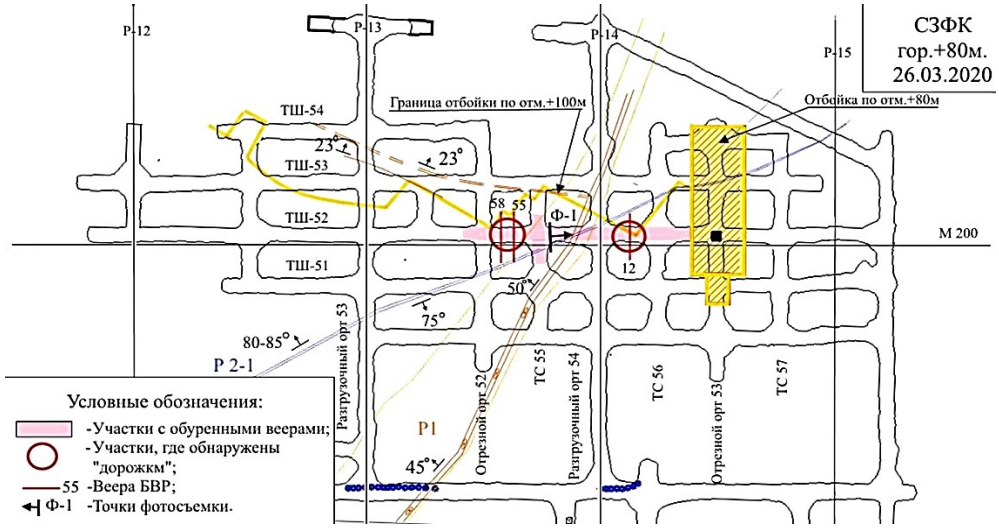


Рис. 5.16. Отм. +80 м, район оценки напряженного состояния массива методом КРС по скважинам БВР



Рис. 5.17. Гор.+80 м, ТШ-52, от ТС-55 на север

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы.

1. Замерные станции, обуренные под метод КРС, можно использовать неоднократно при условии изменения поля напряжений в сторону увеличения его абсолютных значений или существенного изменения угла наклона результирующей максимальной компоненты тензора напряжений.

2. Учитывая методологическую оправданность и технологичность применения вееров скважин БВР в качестве замерных станций под метод КРС, а также возможность контроля состояния массива на значительных площадях в сжатые сроки без дополнительных затрат данный вариант рекомендуется для оперативной оценки состояния массива службой ППГУ на участках ведения очистных работ.

3. Значения длины «дорожек», их начала, окончания, расположения максимума разрушений оценивались по данным глазомерной съемки с определенного расстояния наблюдателя от объекта, и не могут считаться абсолютными. Однако само наличие «дорожек» и системное изменение их параметров от веера к вееру подтверждает принципиальную полезность полученных результатов. Для получения более корректных результатов желательно выполнять работы с платформы и инструментально.

5.1.1.3. Контроль напряженного состояния целиков месторождения Олений ручей методом сейсмической томографии

По плану горных работ основной объем очистной выемки в 2019 г. на месторождении Олений ручей приходился на подэтажи + 120, +100 и +80 м в пределах разрезов 11÷16. При этом на гор. +100 м было запланировано развитие очистной выемки от двух разрезок, т. е. в процессе ведения горных работ образуется целик, размер которого при их развитии сокращается (рис. 5.18). В соответствии с действующими федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности порядок их отработки должен «обеспечивать планомерное извлечение запасов, по возможности, без образования целиков». Поэтому в случае необходимости такого порядка работ проводится его геомеханическое обоснование, а также контроль в процессе выемки запасов.

Для оценки геомеханической ситуации по мере отработки запасов были проведены численные расчеты НДС, которые показали незначительную пригрузку в породах формируемого целика, при этом значения σ_{max} не превышают половины предела прочности на сжатие пород (рис. 5.19).

Для контроля НДС пород в целике использовали метод сейсмической томографии, позволяющий получить скоростную картину для участка массива, по которой можно судить о зонах пригрузки и разгрузки массива в пределах исследуемой области. На гор. +100м организован сейсмографический полигон. Выбор места и конфигурация полигона основаны на сохранности этого участка в течение времени, необходимого для проведения нескольких циклов измерений. По мере продвижения отбойки с запада и востока к выбранному участку прогнозируется трансформация поля напряжений.

В выработках ТС 7 и ТШ 17 размечены репера приемников, а в ТС 8 и ТШ 19 — источники сейсмических сигналов. Среднее расстояние между реперами составляет 3 м и менялось в большую или меньшую сторону для обеспечения удовлетворительного акустического контакта с породой. На рис. 5.20 показана схема

наблюдений и траектория сейсмических лучей. Плотность сейсмических лучей высокая, что обеспечивает необходимую детальность исследования участка.

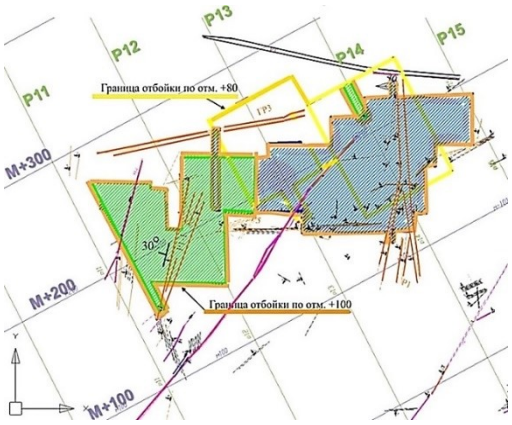


Рис. 5.18. План развития очистных работ на гор. +100 м на 2019 г.



Рис. 5.19. Распределение напряжений σ_{max} на гор. +100 м при фактическом состоянии горных работ на октябрь 2019 г.

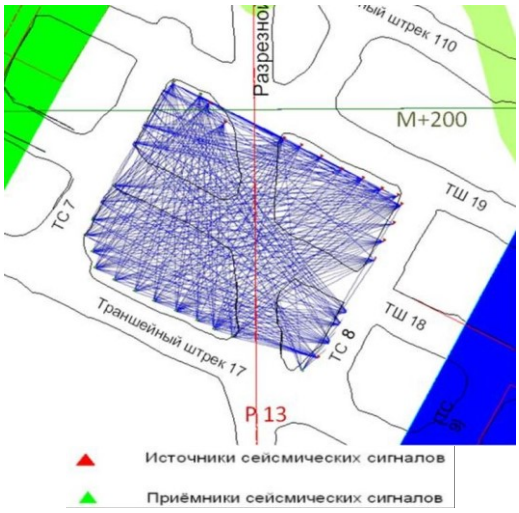


Рис. 5.20. Схема наблюдений сейсмотомографического полигона

Измерения выполняли с помощью 24-канальной сейсмостанции SmartSeis фирмы Geometrics. Возбуждение упругих колебаний осуществлялось механическим способом с помощью удара кувалды по стенке выработки. Для получения приемлемого полезного сигнала применялось накопление 10 раз. Частота полезного сигнала — 300–700 Гц. Основные помехи связаны с работой буровых станков, т. к. их частота попадает в диапазон полезного сигнала. Всего исследуемый участок пересекают 400 лучей, что, несмотря на выбраковку нескольких трасс, обеспечивает надежность измерений.

Обработка сейсмических данных выполнена с помощью специализированной программы XTomo-LM. Томографическая обработка состояла из двух этапов: решение прямой и обратной задач. Решение прямой задачи заключалось в расчете траекторий и времен пробега волн для однородной скоростной модели. На стадии

решения обратной задачи невязки между теоретическими и измеренными временами пробега волн использовались для расчета поправок к опорной модели. Решение обратной задачи проводилось методом наиболее гладкого решения.

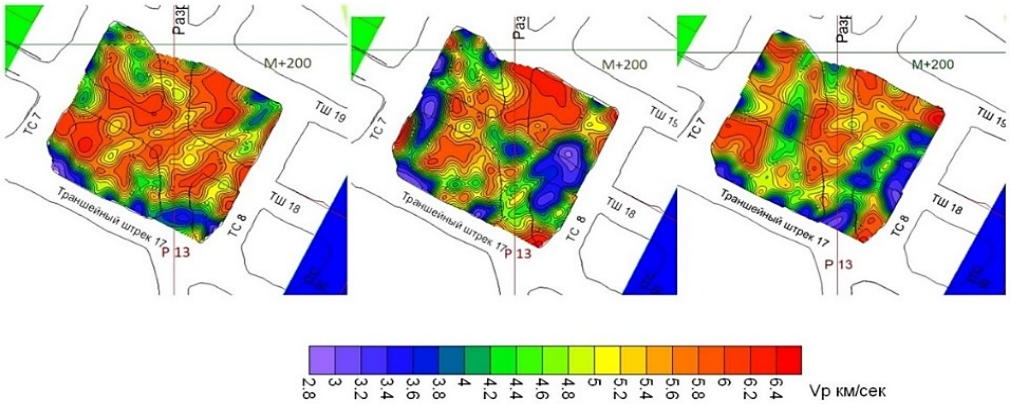
После первой разрезки был проведен первый цикл наблюдений 21.05.2019 г., результаты которого представлены на рис. 5.21 *а*.

По результатам первого цикла сейсмотомографических измерений исследуемый участок массива характеризуется неоднородной структурой скоростного поля. Скорости продольных волн меняются в интервале от 3 до 6,4 км/сек. Области низких скоростей продольных волн приурочены к сопряжениям и стенкам выработок, что с большой вероятностью связано с разрушением пород в приконтурной зоне. Наибольшая по протяженности низкоскоростная зона находится вдоль ТШ 17. Внутри контролируемого участка скорости продольных волн имеют значения более 5,5 км/сек, что подтверждает действие повышенных сжимающих напряжений.

Отсутствие визуальных проявлений горного давления объясняется качественным креплением выработок. По результатам первого цикла сейсмотомографических измерений можно сделать вывод о том, что массив пород находится в напряженном, но устойчивом состоянии.

После подвигания отбойки с востока и разрезки на западе от полигона был проведен второй цикл наблюдений 07.07.2019 г. Измерения выполнены по схеме, аналогичной первому циклу. Результаты второго цикла представлены на рис. 5.21 *б*. Видно, что по всей площади полигона появились области с низкими скоростями продольных волн. Увеличение скоростей продольных волн произошло на участке ТШ 19 и на сопряжении ТШ 17 с ТС 8 и ТС 7.

Третий цикл измерений выполнен 20.09.2019 г. (рис. 5.21 *в*) после развития очистных работ на горизонте с двух сторон от полигона и уменьшения целика. Обработка результатов показала выравнивание скоростной картины с уменьшением градиента значений в целом по полигону и локальной пригрузкой зон у ТС 7 и зоны сопряжения ТШ 19 с ТС 8.

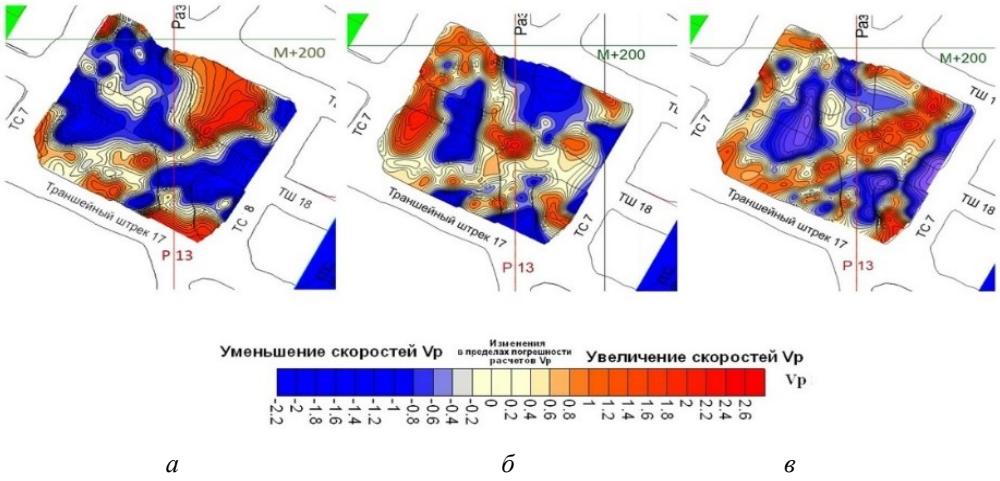


а *б* *в*

Рис. 5.21. Скоростная модель участка массива гор. +100 м: *а* — 21.05.2019; *б* — 07.07.2019; *в* — 20.09.2019

Проведено построение разностных картин для полигона, которые показывают изменение скоростей от цикла к циклу. На рис. 5.22 представлено сравнение результатов: первого цикла измерений со вторым; второго с третьим; общие изменения, произошедшие

между первым и третьим циклами измерений. То есть видна динамика распределения скоростей продольных волн на участке измерений по мере развития горных работ.



а *б* *в*

Рис. 5.22. Разностная скоростная модель участка сейсмотомографических измерений: *а* — 21.05.2019–07.07.2019; *б* — 07.07.2019–20.09.2019; *в* — 21.05.2019–20.09.2019

Можно отметить, что между первым и вторым циклом изменения скоростей были более значимыми — происходило как увеличение, так и уменьшение абсолютных скоростей продольных волн на величину до 2,2 км/сек. При этом наибольший рост отмечен в восточной части полигона у ТШ 19, где граница очистной выемки приблизилась к полигону.

Между вторым и третьим циклом измерений отличия менее существенные. Здесь, наоборот, наиболее значимый рост скоростей отмечается в западной части полигона, где за период между наблюдениями граница горных работ продвинулась от второй разрезки в сторону полигона, также увеличение скоростей произошло на сопряжении выработок 3 разрезной орт и ТШ 18. Опираясь на разностную скоростную модель, за период 21.05.2019–20.09.2019 гг. можно сделать вывод о том, что разностная картина менее контрастная. Произошло снижение скоростей, а, следовательно, увеличение нарушенной зоны на стенке ТС 8 и небольшая пригрузка по стенке ТС 7. Наибольшее увеличение скоростей фиксируется в диагональной зоне между северо-восточной и юго-западной частью полигона.

Проведенные исследования подтвердили результаты численного моделирования. В блоке-целике наблюдается перераспределение напряжений без заметной тенденции к их увеличению. Выработки в районе полигона не претерпели каких-либо существенных изменений. Имеются незначительные визуальные проявления горного давления на сопряжениях отдельных выработок в виде отслаивания торкрет-бетона.

Таким образом, применяемая методика сейсмотомографических наблюдений позволяет получить детальную картину динамики изменения параметров состояния пород в массиве с линейными размерами до первых сотен метров, а относительная малая трудоемкость дает возможность проводить мониторинг области активного ведения горных работ и своевременно выявлять удароопасные участки. В комплексе

с другими натурными и численными методами результаты сейсмотомографических исследований позволяют планировать необходимые профилактические мероприятия и способствуют повышению безопасности горных работ.

5.1.1.4. Определение оптимального места разрезки на глубоких горизонтах месторождения Олений ручей относительно разломной структуры, пересекающей рудное тело

К основным геологическим особенностям нижнего яруса месторождения Олений ручей, выявленным за последние годы, можно отнести отсутствие выдержанных по содержанию полезной компоненты рудных тел, а также наличие крупных структурных нарушений с различными углами падения [169]. Разломными структурами, существенным образом влияющими на формирование поля напряжений в районе ведения подземных горных работ, являются Главный разлом, расположенный в висячем боку рудной залежи, и Разлом 1, секущий рудное тело и разделяющий отрабатываемый участок на два блока. Эти разломы (зоны шпреуштейнизации) в существенной мере определяют и положение зон повышенной геодинамической опасности, выявленных службой прогноза и предупреждения горных ударов рудника. На рис. 5.23 представлен план горных работ на 2020 г. по гор. +80 м с нанесенными зонами шпреуштейнизации и положением зон повышенной геодинамической опасности.

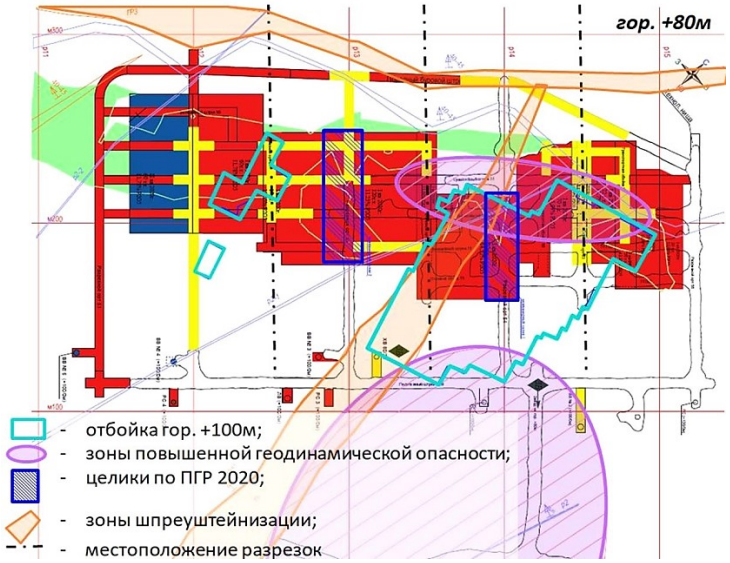


Рис. 5.23. Ситуационный план развития горных работ на гор. +80 м

При анализе плана горных работ выявлено, что формируемые целики при имеющихся фактических обнажениях не выполняют функцию поддержки, т. к. находятся на 80 % под очистной выемкой, кроме того, они являются концентраторами сжимающих субгоризонтальных напряжений. Опирание подработанного массива на целики в висячем боку рудной залежи препятствует

частичному обрушению подработанных пород в очистное пространство и созданию предохранительной породной подушки.

Расчеты НДС с использованием разработанной геомеханической 3D-модели подтвердили, что данный порядок горных работ ведет к повышению удароопасности участков массива между сближающимися фронтами. В целике 1 наблюдается постепенная пригрузка до величин $\sigma_{max} \geq 0{,}5\ \sigma_{сж.}$, следовательно, высока вероятность проявлений горного давления в динамической форме (рис. 5.24). НДС целика 2 осложняется наличием разломной зоны, диагонально пересекающей формируемый целик. Между данной структурой и подвигающимся фронтом работ от разрезки наблюдается концентрация напряжений с величинами σ_{max} до 55 МПа. Чем ниже отметка подэтажа, тем выше вероятность реализации динамических событий в создаваемых целиках, вплоть до горных ударов.

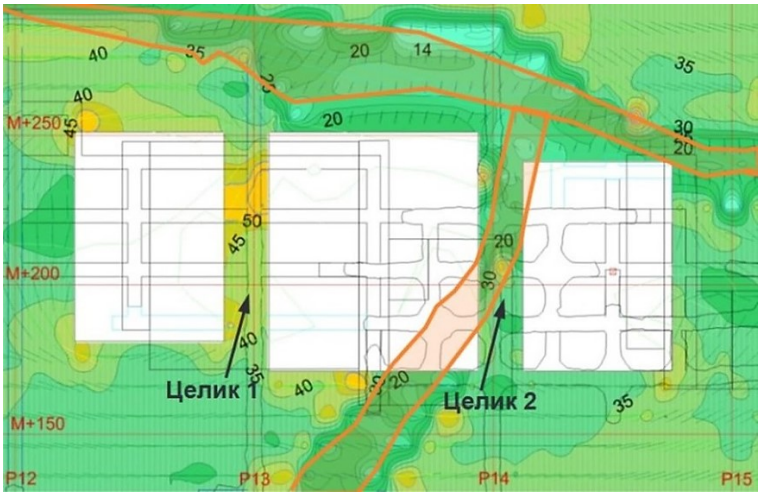


Рис. 5.24. Распределение напряжений σ_{max} на гор. +80 м при моделировании ситуации в соответствии с рудничным планом горных работ

Для сравнения рассмотрен вариант с развитием работ расходящимися фронтами от единой разрезки в районе Разлома 1. При этом поле напряжений в окрестности создаваемых обнажений более однородное, без дополнительных концентраторов сжимающих напряжений (рис. 5.25).

Наличие в массиве двух крупных разломных структур существенным образом влияет на формирование поля напряжений в районе ведения подземных горных работ. В общем случае, особенно, если для разломной структуры характерно вертикальное падение, горные работы следует вести от нее расходящимися фронтами. Иначе при приближении к разломной зоне предприятие вынуждено вести работы на уменьшающийся целик, что приводит к концентрации напряжений в целике и, соответственно, негативно влияет на безопасность горных работ.

Для рассматриваемого участка месторождения поле напряжений имеет более сложный характер за счет взаимного влияния нескольких разломных структур. Рассмотрим геомеханическую ситуацию при двух вариантах разрезки относительно Разлома 1 (Р 1) и последующем развитии горных работ:

— I вариант — разрезка в районе разлома Р 1;

— II вариант — разрезка на определенном удалении 40–80м от Р 1.

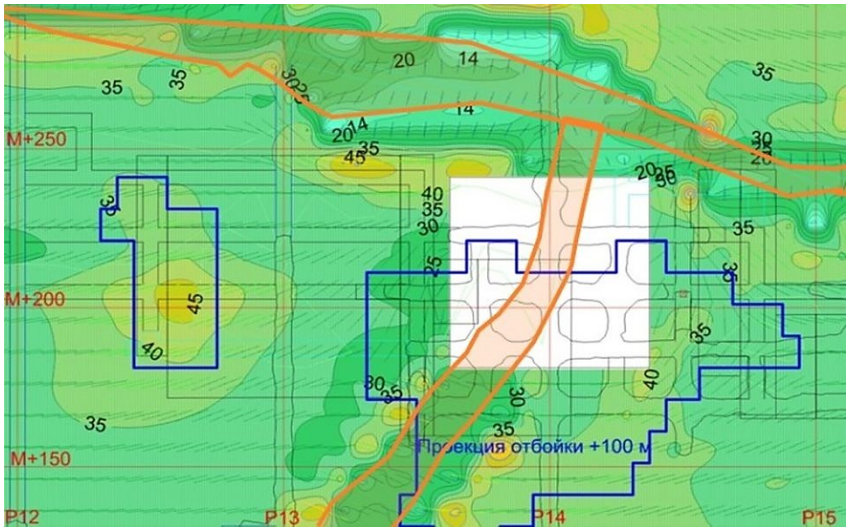


Рис. 5.25. Распределение напряжений σ_{max} на гор. +80 м при моделировании ситуации для предлагаемого порядка горных работ с одной разрезкой в районе Разлома 1

Для каждого из вариантов просчитаны две стадии развития очистной выемки — непосредственно разрезка и продвижение от нее очистных работ приблизительно на 40 м в каждую сторону (рис. 5.26).

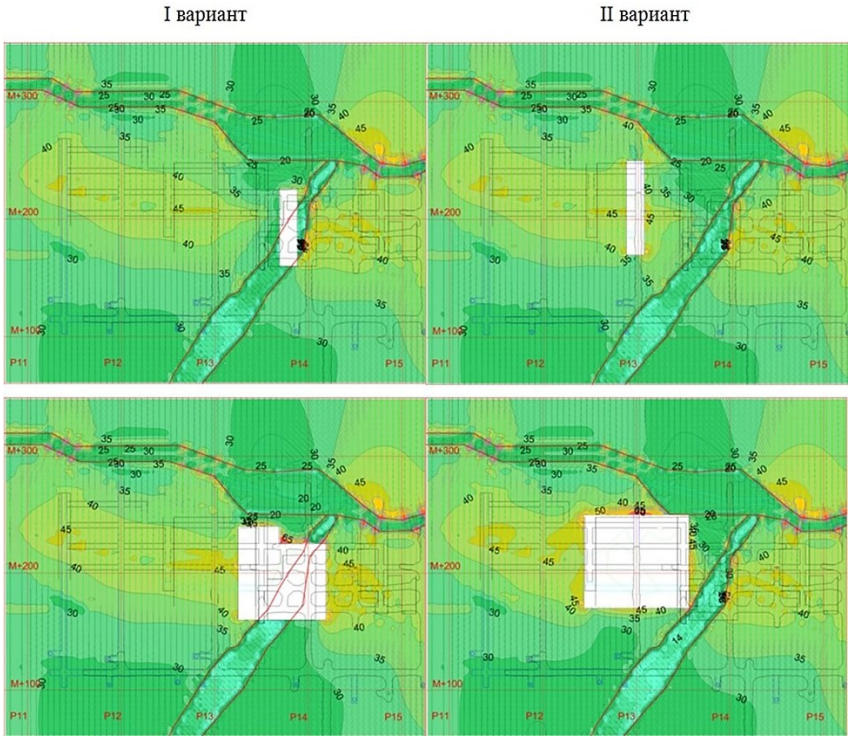


Рис. 5.26. Распределение напряжений σ_{max} при разных положениях разрезки относительно разлома Р 1

Результаты моделирования показали, что для варианта I при продвижении восточного фронта работ за разлом значения напряжений σ_{max} вблизи него

составляют около 45 МПа при исходных величинах в этом районе 40–45 МПа (в среднем — 42,5 МПа), т. е. пригрузка массива составляет около 5 %.

Для варианта II значения σ_{max} у фронта работ, приблизившегося к Р 1, составляют 40–50 МПа (в среднем — 45 МПа) при исходных величинах 30–35 МПа (в среднем — 32,5 МПа), т. е. прирост составляет более 35 %.

При этом в теле разлома и в породах между фронтом работ и разломом формируется зона растягивающих напряжений по минимальной компоненте главных напряжений σ_{min} (рис. 5.27), т. е. имеет место усиление контрастности поля напряжений у фронта горных работ, что может негативно сказываться на устойчивости горных пород и способствовать их разрушению. Кроме того, в данном случае больше площадь зоны концентрации σ_{max}.

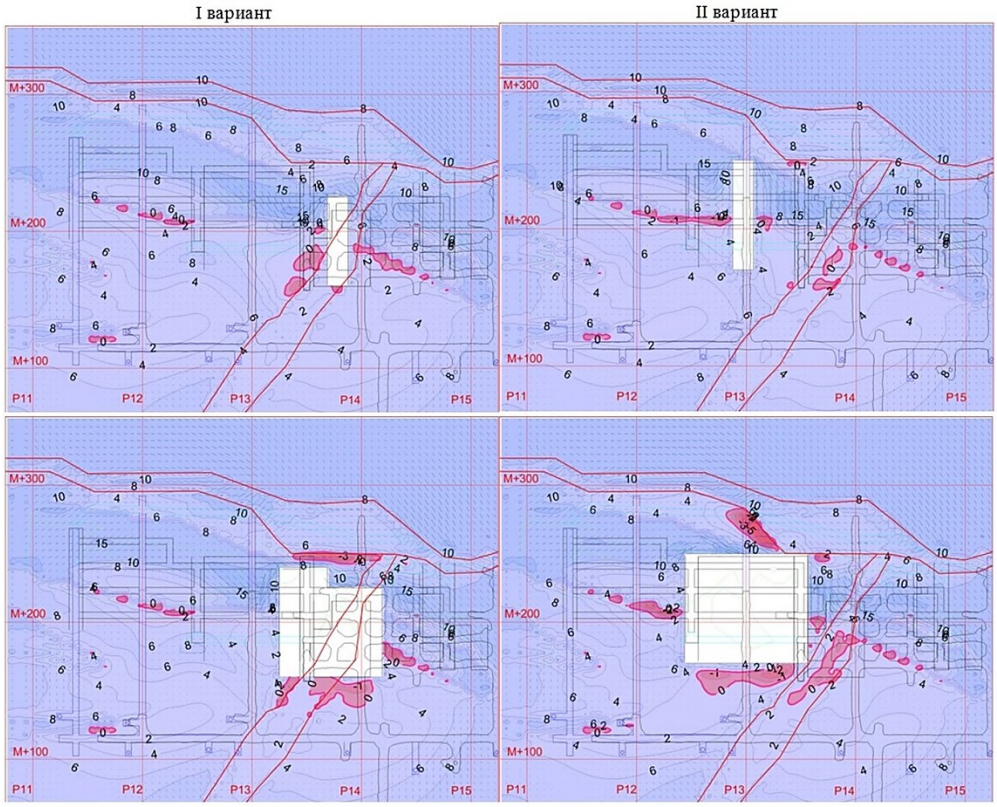


Рис. 5.27. Распределение напряжений σ_{min} при разных положениях разрезки относительно разлома Р 1

Важным является также тот факт, что при реализации I варианта быстрее растет зона растягивающих напряжений σ_{min} в подработанных породах висячего бока, что будет способствовать частичному обрушению подработанной толщи пород и заполнению создаваемых обнажений обрушенными породами.

Таким образом, результаты многовариантных расчетов НДС показали:

— целесообразность перехода на систему с подэтажным обрушением руды и развития работ от единой разрезки к флангам ниже 0 отметки;

— осуществление разрезки на подэтажах по разломной структуре Р 1.

Предлагаемый вариант развития горных работ позволит минимизировать геомеханические и геодинамические риски, что обеспечит планомерную

добычу полезного ископаемого и снизит затраты на разгрузочные мероприятия и крепление горных выработок.

5.1.2. Геомеханическая оценка параметров взаимного влияния открытых и подземных горных работ на участке Гакман Юкспорского месторождения

5.1.2.1. Анализ геомеханических условий западной части участка Гакман Юкспорского месторождения в зоне совместного ведения открытых и подземных горных работ

Участок Гакман является восточной частью Юкспорского апатит-нефелинового месторождения Хибин, отработку которого ведет КФ АО «Апатит». Одним из вариантов отработки запасов данного участка является открытый способ с одновременным ведением подземных горных работ в западной части месторождения, т. е. при таком варианте после введения карьера «Гакман» в эксплуатацию отработка Юкспорского месторождения будет вестись комбинированным способом.

Рудное тело на участке Гакман имеет сложную морфологию, предопределенную наличием брекчий и пережимов, серией оперяющих разломов и трещин, выполненных вторичными материалами. На геомеханическое состояние участка Гакман наиболее существенное влияние оказывают разломы Гакмана и Юкспорйокский.

По результатам многолетних измерений на Юкспорском месторождении в массиве установлено действие гравитационно-тектонического поля напряжений с неравномерным распределением тектонических сил [170–171]. Это обусловлено блочным строением массива горных пород. Инструментальными исследованиями зафиксирован наибольший уровень субгоризонтальных сжимающих напряжений в нетронутом массиве, достигающий 50–70 МПа и в 2–3 раза превышающий действие собственного веса пород ($\sigma_т > 2\gamma H$). Коэффициент между максимальной и промежуточной компонентой главных напряжений на Юкспорском месторождении составляет 0,5÷0,7. Направление действия максимальной компоненты главных напряжений на Юкспорском месторождении субгоризонтально и диагонально к простиранию рудного тела. Анализ данных инструментальных измерений параметров напряженного состояния массива на Юкспорском месторождении показывает тенденцию увеличения действующих тектонических напряжений с глубиной.

В то же время следует отметить, что фактические данные о параметрах НДС непосредственно участка Гакман отсутствуют. На измерительной станции, наиболее приближенной к исследуемому участку (около 500 м), значение максимальной компоненты напряжений составило 25 МПа с небольшим отклонением вектора σ_{max} от горизонтальной плоскости. В дальнейшем для принятия обоснованных технических решений планируется пополнение базы данных измерений напряжений для данной части Юкспорского месторождения.

Фактором, существенно меняющим абсолютные величины и направление исходных напряжений, являются горные работы, которые в настоящее время ведутся подземным способом с применением системы подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды. Наиболее опасные зоны концентрации напряжений приурочены к области опирания подработанной толщи пород. У границы отбойки в висячем боку рудной залежи формируется зона опорного давления с коэффициентом

концентрации до 3–4 и существенным изменением направления действия σ_{max}. Фиксируется увеличение абсолютных величин действующих напряжений до значений, способных привести к разрушению выработок в динамической форме.

Участок Гакман находится полностью под необрушенной налегающей толщей пород. Подземные работы здесь ведутся в зоне трехстороннего опирания подработанных пород, что препятствует планомерному обрушению до дневной поверхности и увеличивает шаг обрушения, несмотря на разветвленную сеть ослабленных шпреуштейнизированных структур [170]. В настоящее время максимальная подработка налегающей толщи составляет здесь более 150 м.

На рис. 5.28 приведена проекция на разрез по простиранию рудной залежи, отражающая горнотехническую ситуацию с учетом проектных границ карьерной выемки.

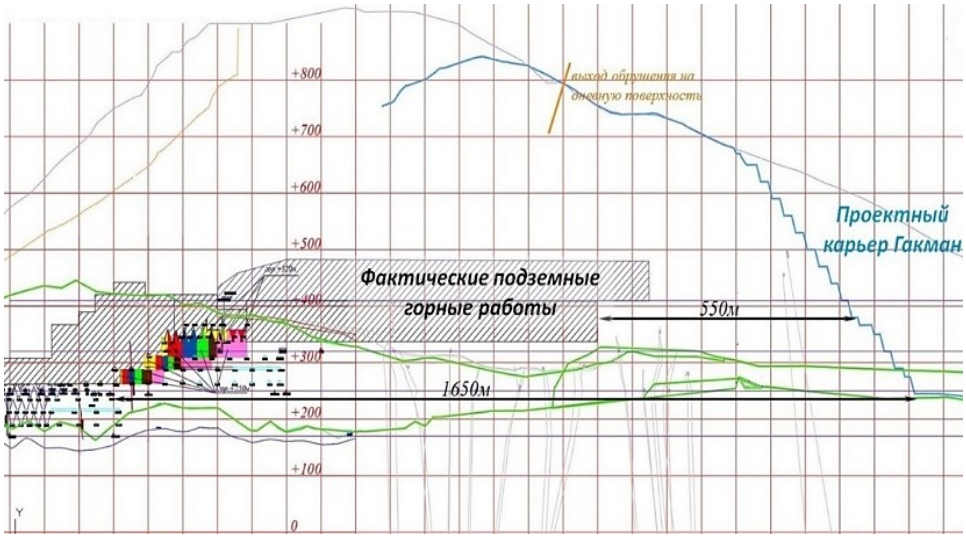


Рис. 5.28. Горнотехническая ситуация на Юкспорском месторождении с учетом проектных границ карьерной выемки (проекция на разрез по простиранию рудной залежи)

Формирование карьера создаст дополнительный фактор влияния на геомеханическое состояние исследуемого участка. Поэтому важной задачей при проектировании совместного ведения подземных и открытых горных работ на ограниченном участке массива, особенно в удароопасных условиях, является определение параметров зоны взаимного влияния создаваемых обнажений. До достижения границ этой зоны горные работы могут развиваться независимо. А для ведения работ в пределах блока-целика необходимо уточнение геологических и геомеханических условий и разработка специального регламента.

5.1.2.2. Постановка задач прогнозного численного моделирования для оценки параметров взаимного влияния открытых и подземных горных работ на участке Гакман

Нормативными документами предусматривается планомерное извлечение запасов в удароопасных условиях по возможности без образования целиков, острых углов и выступов фронта очистных работ. Оптимальным по геомеханическим условиям является развитие горных работ от центра рудной залежи к флангам либо от одного фланга к другому. Однако в реальности практически невозможно избежать ситуации, когда между очистными пространствами (подземными и открытыми)

возникает необходимость отработки участка, являющегося по сути блоком-целиком. Выемку запасов блока-целика необходимо регламентировать как с точки зрения технологии, так и с позиций обеспечения безопасности горных работ.

По определению блок-целик — это участок рудной залежи между встречными фронтами очистных работ (как открытых, так и подземных) с размерами, при которых начинается их взаимное влияние. Основной задачей является определение зоны этого взаимного влияния. В данном случае — это взаимное влияние развивающихся подземных горных работ на Юкспорском месторождении и проектного карьера «Гакман».

Зона взаимного влияния должна устанавливаться с определенным запасом, поэтому необходимо взять те условия, при которых воздействие на массив горных пород будет максимальным. Понятно, что в случае карьерной выемки следует рассматривать ее положение на конец отработки, а подземные горные работы с определенным шагом подвигать к карьеру. Предлагаемый подход заключается в определении размера блока-целика исходя из 10 % увеличения концентрации напряжений в массиве между фронтом подземных горных работ и западным бортом карьера по сравнению с начальным уровнем напряжений на данном участке массива.

Второй задачей является выбор параметров подземных горных работ, при которых обеспечивается баланс приемлемого уровня напряжений в зонах их концентрации с полнотой выемки запасов. При этом важно учитывать, что избыточная разгрузка массива может негативно сказаться на устойчивости элементов борта карьерной выемки, увеличив вероятность деформаций и прорастания трещин отрыва за счет действия растягивающих напряжений, особенно в геологически и технологически нарушенных зонах.

Третьей задачей является оценка возможных параметров обрушения подработанной толщи пород и влияние обрушения до поверхности на НДС массива пород блока-целика.

В табл. 5.2 представлены задачи и расчетные варианты, которые сгруппированы в 5 блоков и позволяют найти оптимальное решение.

Вариант 0.1 с фактическим состоянием горных работ позволил оценить адекватность результатов расчетного поля напряжений. Для этого полученные параметры НДС сравнивали с результатами в модели Кировского рудника, принятой за основу прогнозной оценки НДС при планировании горных работ на Кукисвумчоррском и Юкспорском месторождениях. Также проводилось сравнение с данными измерений напряжений методом разгрузки. Следует отметить полученное диагональное направление действия σ_{max} к элементам залегания рудного тела, что соответствует общим представлениям и результатам измерений напряжений. Абсолютные величины и расположение зон концентрации напряжений также удовлетворительно коррелируют с натурными данными. В качестве примера приведем распределение σ_{max} на гор. +320 м, где видны вышеперечисленные особенности (рис. 5.29). При этом фоновый уровень максимальных главных напряжений 35÷40 МПа, зоны концентрации сосредоточены в висячем боку рудной залежи под границей вышележащей отбойки, у фронта горных работ в породах рудного тела наблюдается переориентировка векторов σ_{max}.

Таблица 5.2

Решаемые задачи с перечнем необходимых расчетных вариантов

Положение ОГР	Номер блока	Варианты	Решаемые задачи	Примечания
Без карьера Гакман	0	0.1. Фактическое состояние ПГР	Оценка адекватности конечно-элементной модели. Определение основных закономерностей распределения напряжений на участке Гакман при учете гравитационно-тектонического типа НДС	Основа для формирования вариантов — утвержденный план горных работ на 2020 г.
		0.2. Прогноз при развитии ПГР на конец 2021 г.		
С карьером Гакман на конец отработки	I	1.1. Фактическое состояние ПГР	Определение размеров блока-целика при приближении к карьерной выемке ПГР гор. +320 м и вышележащих	При постановке вариантов 1,3÷1,6 опираемся на существующие опережения вышележащих горизонтов к нижележащим
		1.2. Прогноз при развитии ПГР на конец 2021 г.		
		1.3–1.6. Пошаговое развитие ПГР гор. +320 м — с постепенным сокращением расстояния до борта карьера до 150 м		
	II	2.1. Развитие ПГР гор. +250 м до р. 17+36; гор. +170 м до р. 14	Определение силы влияния развития ГР на гор. +250 и +170 м при существующих отставаниях на геомеханическое состояние пород блока-целика и устойчивость западного участка борта карьера	Вариант с определенными размерами блока-целика на гор. +320 м является основой для расчетных блоков II–IV
		2.2. Развитие ПГР гор. +250 м до р. 21; гор. +170 м до р. 17+36		
	III	3.1. Формирование фронта работ по подэтажам с отставаниями, равными высоте подэтажа (угол 45°)	Определение оптимальных опережений вышележащих горизонтов (подэтажей) к нижележащим	Вариант 3.2 рассчитывается только в случае, если при 3.1 отсутствуют критические значения напряжений и деформаций как в блоке-целике, так и в прибортовом массиве
		3.2. Формирование фронта работ по подэтажам с отставаниями, дающими угол 60–70°		
	IV	Учет прогнозного обрушения подработанной толщи пород до дневной поверхности	Определение влияния обрушения до поверхности на НДС массива блока-целика	

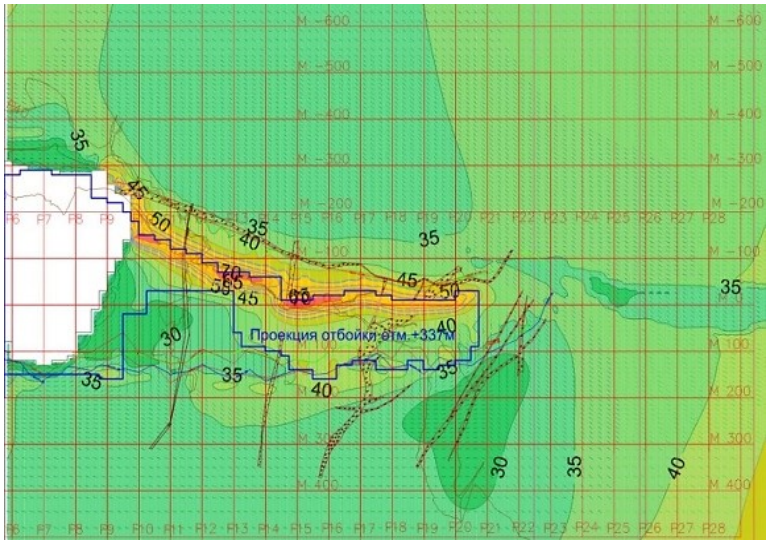


Рис. 5.29. Распределение σ_{max} при фактическом состоянии горных работ на гор. +320 м

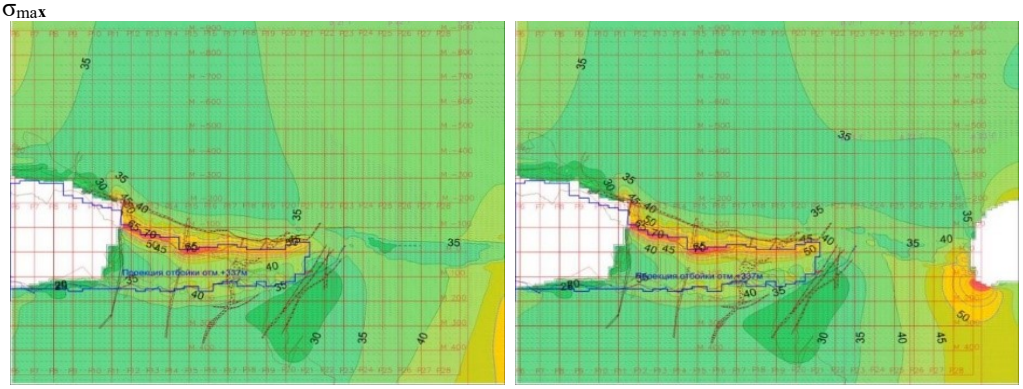
5.1.2.3. Определение размеров блока-целика при приближении к карьерной выемке подземных горных работ гор. +320 м

Для оценки трансформации НДС при формировании карьерной выемки сравним расчетные варианты 0,2 и 1,2, а именно распределение компонент главных напряжений на горизонтах, расположенных выше дна карьерной выемки, при конфигурации горных работ на конец 2021 г. без учета и с учетом карьера «Гакман» (рис. 5.30).

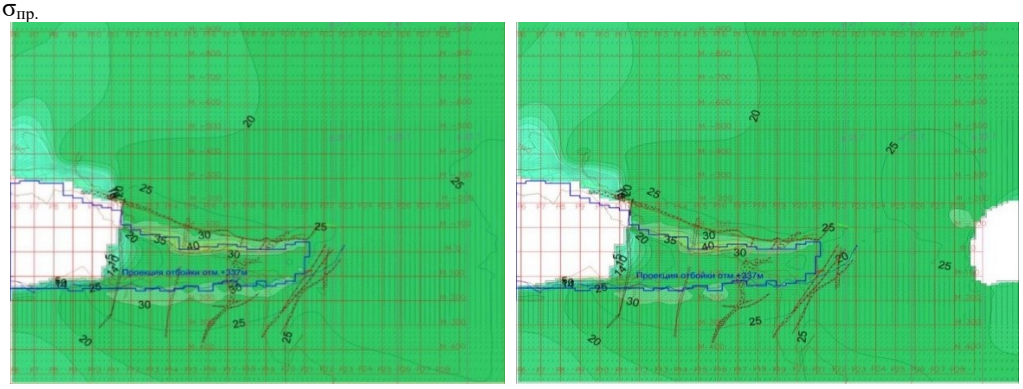
Как видно, еще до моделирования карьера в зоне его проектирования наблюдается повышенный уровень напряжений σ_{max}. Это связано с особенностями распределения исходного НДС при его гравитационно-тектоническом типе для гористого рельефа, заключающимися в более высоком уровне сжимающих напряжений в долинах. При формировании техногенного рельефа (создании карьерных выемок) зона максимальной концентрации сжимающих напряжений формируется под дном карьерной выемки. Для юго-западного участка борта складываются оба этих фактора. Кроме того, важное значение имеет соотношение направления действующих σ_{max} и формы карьера, которая в данном случае имеет в юго-западной части более узкий, вогнутый в массив участок.

Обрушение подработанных пород снижает в большей мере вертикальную компоненту, определяемую собственным весом пород. Поэтому наибольшая разгрузка массива при обрушении подработанной толщи характерна для участков с наибольшими высотными отметками исходного рельефа дневной поверхности. Также видно, что более низкий уровень σ_{max} приурочен к породам рудного тела за пределами влияния подземных горных работ. Исходный уровень промежуточной компоненты $\sigma_{пр.}$ приблизительно равен 25 МПа, что на некоторых участках может быть значимым в плане проявлений горного давления при концентрации напряжений в окрестности элементов горной технологии. Минимальная компонента σ_{min} характеризуется в основном небольшим уровнем сжатия. Зоны растягивающих напряжений уменьшаются по площади с увеличением глубины и расположены в основном в подработанном массиве, а также под элементами рельефа.

σ_{max}



$\sigma_{пр.}$



σ_{min}

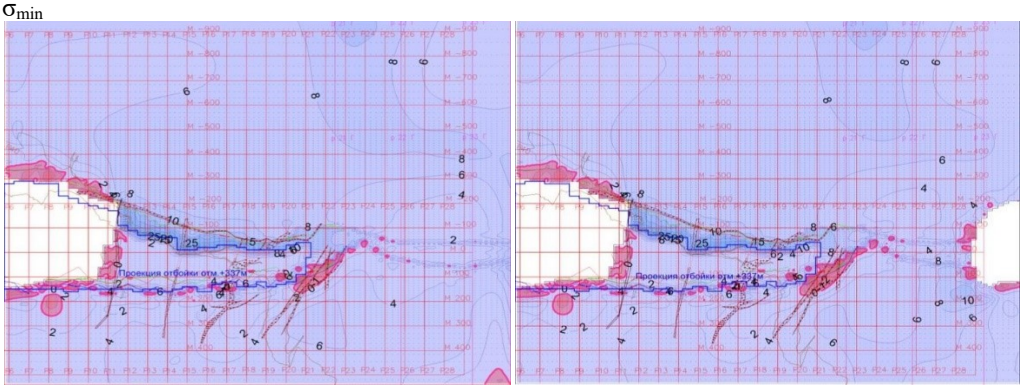


Рис. 5.30. Распределение компонент главных напряжений на отм. +320 м при конфигурации горных работ на конец 2021 г. без учета и с учетом конечного положения карьера «Гакман»

При моделировании карьера отмечено, что он практически не влияет на зону ведения подземных горных работ, если они остаются в прежних границах. В окрестности же самой карьерной выемки происходят существенные изменения НДС. В первую очередь это образование зоны концентрации максимальных напряжений у вытянутого юго-западного участка борта, который приходится как раз на область повышенных исходных напряжений в долине Гакмана; промежуточная компонента характеризуется умеренным сжатием; по минимальной компоненте фиксируются локальные зоны незначительных по абсолютным величинам растягивающих напряжений, не превышающих предела прочности пород на растяжение. Область влияния карьерной выемки, по приближенной оценке, распространяется на 300÷350 м от борта.

Особенностью ведения горных работ на Юкспорском месторождении является существенное отставание горных работ гор. +250 и +170 м от гор. +320 м. Это связано с тем, что на гор. +320 м и вышележащих развитие горных работ велось от двух разрезок. В связи с повышением уровня геодинамических рисков в зоне стыковки подземных горных работ на глубоких горизонтах принято решение и осуществляется выемка запасов на гор. +250 и +170 м Юкспорского месторождения от единой разрезки, которая удалена на значительное расстояние от участка Гакман. Поэтому в первую очередь блок-целик будет формироваться на гор. +320 м.

Для определения размера блока-целика промоделировано пошаговое развитие подземных горных работ гор. +320 м — с постепенным сокращением расстояния до борта карьера до 150 м (варианты 1.3–1.6). Размер 150 м выбран как минимально возможный исходя из опыта выполнения регламентов на отработку стыковочных зон между подземными и открытыми горными работами на Хибинских апатитовых рудниках. Кроме того, в действующих нормативных документах КФ АО «Апатит» [109] приближенная величина блока-целика $L_{\text{min}ориент}$ с определенным запасом принята равной 250 м.

Уточненный расчет размера блока-целика проводится исходя из 10 % изменения уровня напряжений в породах целика между сближающимися фронтами по сравнению с начальным уровнем напряжений на данном участке массива. Поэтому на каждом шаге расчетов НДС при развитии подземной очистной выемки определяли средний уровень напряжений и сравнивали его с исходными величинами НДС. 10 %-й критерий взят исходя из точности натурных определений параметров напряженного состояния массива, на основании которых задавались граничные условия при формировании моделей.

На рис. 5.31 приведен график изменения средних по блоку-целику значений напряжений σ_{max} при приближении фронта подземных горных работ к борту карьера. Исходная величина напряжений при расстоянии 385 м — 35 МПа. Соответственно напряжения, увеличенные на 10 %, составят примерно 38,5 МПа. Таким образом, ширина блока-целика, исходя из критерия 10 % увеличения напряжений, составляет около 240 м.

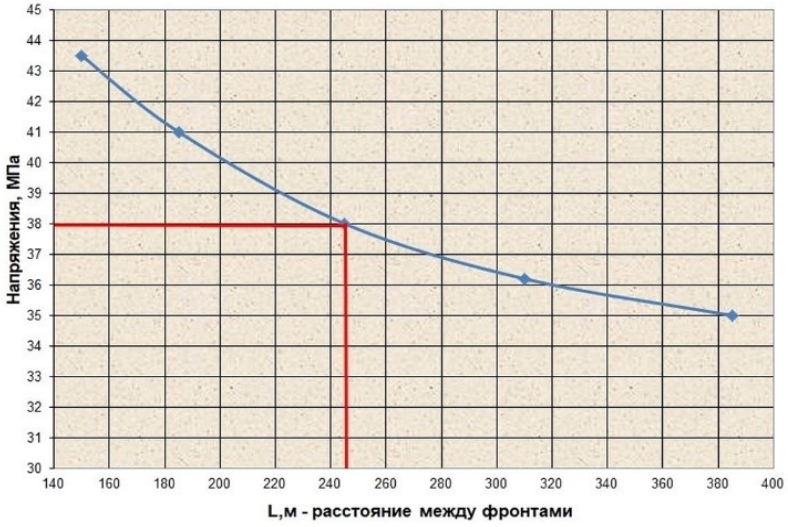


Рис. 5.31. Зависимость максимального главного напряжения от расстояния между очистными фронтами (синяя кривая). Красной линией показан 10 %-й уровень увеличения напряжений по сравнению с исходным и соответствующий ему размер блока-целика

На рис. 5.32 на основе нескольких расчетных вариантов проиллюстрированы изменения в распределении σ_{max} при приближении горных работ гор. +320 м к карьеру «Гакман», где видно, как между подземным очистным пространством и бортом карьера происходит постепенный рост действующих напряжений и слияние зон их концентрации.

Таким образом, границей максимального продвижения подземных горных работ к карьерной выемке на гор. +320 м можно считать разрез 21+160 м Гакмана. В пределах блока-целика работы должны будут вестись по специальному регламенту, где определяется оптимальный порядок ведения работ в данной зоне (блоке-целике), расположение и размер стыковочной секции, технология горных работ при отработке стыковочной секции; расчет прогнозных категорий состояния горных выработок по мере развития горных работ и разработка мероприятий по поддержанию выработок и порядку контроля состояния массива. Для качественного выполнения этих задач необходимо уточнение параметров поля напряжений участка Гакман и характеристик элементов геологической нарушенности массива.

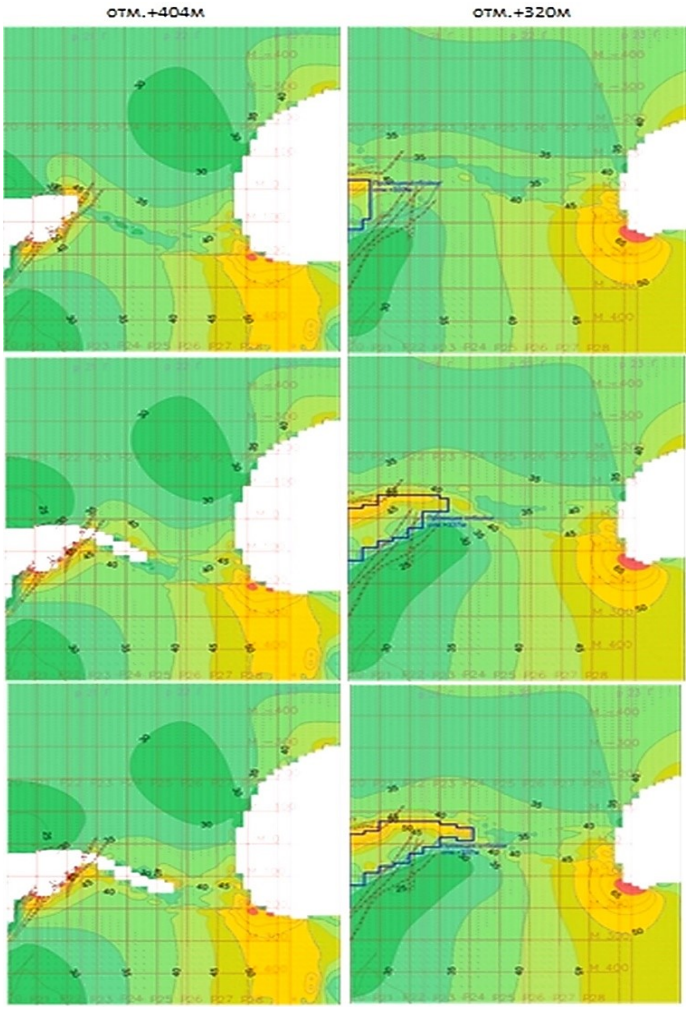


Рис. 5.32. Распределение σ_{max} при поэтапном приближении горных работ гор. +320 м к карьеру «Гакман»

5.1.2.4. Определение оптимальных опережений вышележащих подэтажей к нижележащим для гор. +320, +250 и +170 м

Для оценки влияния развития подземных горных работ на гор. +250 и +170 м на геомеханическое состояние пород блока-целика и устойчивость западного участка борта карьера «Гакман» рассматривали развитие горных работ на гор. +250 и +170 м (II блок расчетов) при существующих отставаниях подэтажей.

Рассчитаны варианты:

развитие ПГР гор. +250 м до р. 17+36; гор. +170м до р. 14;

развитие ПГР гор. +250 м до р. 21; гор. +170м до р. 17+36.

Анализ результатов показал уменьшение площади зоны концентрации в висячем боку рудной залежи под отбойкой гор. +320 м при сокращении отставания от него нижележащих этажей. Под отбойкой гор. +250 м наиболее высокий уровень максимальной компоненты главных напряжений фиксируется на узком участке рудной залежи в районе разрезов 17+36÷20, где формируется зона концентрации σ_{max} под вышележащей отбойкой, охватывающая около 50 % рудного тела. В то же время продвижение горных работ гор. +250, +170 м до р. 17+36Ю практически не оказывает значимого влияния на геомеханическое состояние прибортового массива и породы блока-целика.

Величины опережения очистных работ на вышележащем подэтаже по отношению к нижележащему определяются величинами защитных углов, которые, в свою очередь, зависят от прочностных свойств пород, параметров действующего в массиве пород поля напряжений и ориентации большинства защищаемых выработок.

Для Юкспорского месторождения $\alpha_м \leq 45°$, где $\alpha_м$ — защитный угол в вертикальной плоскости по простиранию рудной залежи (рис. 5.33) [109].

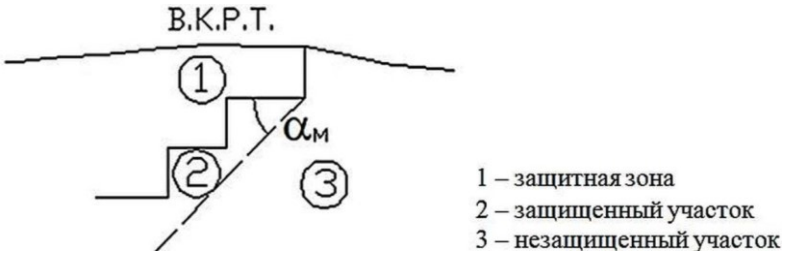


Рис. 5.33. Формирование защитного угла в вертикальной плоскости по простиранию рудной залежи

Понятно, что укручение данного защитного угла обеспечивает определенный прирост запасов до достижения горными работами границ блока-целика. Поэтому при отсутствии пригрузки и сохранении определенных функций защиты массива от действия высоких сжимающих напряжений угол $\alpha_м$ может быть увеличен.

Рассматривали подход подземных горных работ к блоку-целику с формированием единого фронта по трем горизонтам (+320, +250, +170 м) с опережениями вышележащих подэтажей к нижележащим, определяющими угол в вертикальной плоскости 45 и 70° соответственно.

На рис. 5.34 приведены вертикальные сечения по магистрали 0 м, секущие очистное пространство на разных высотных отметках, где красной линией показана проекция сформированного фронта горных работ. Прирост максимальных сжимающих напряжений в блоке-целике при увеличении угла $\alpha_м$ здесь составляет около 5 %. Очистные

пространства на гор. +250 м и тем более +170 м больше удалены от карьерной выемки и, соответственно, в меньшей степени влияют на геомеханическое состояние пород блока-целика.

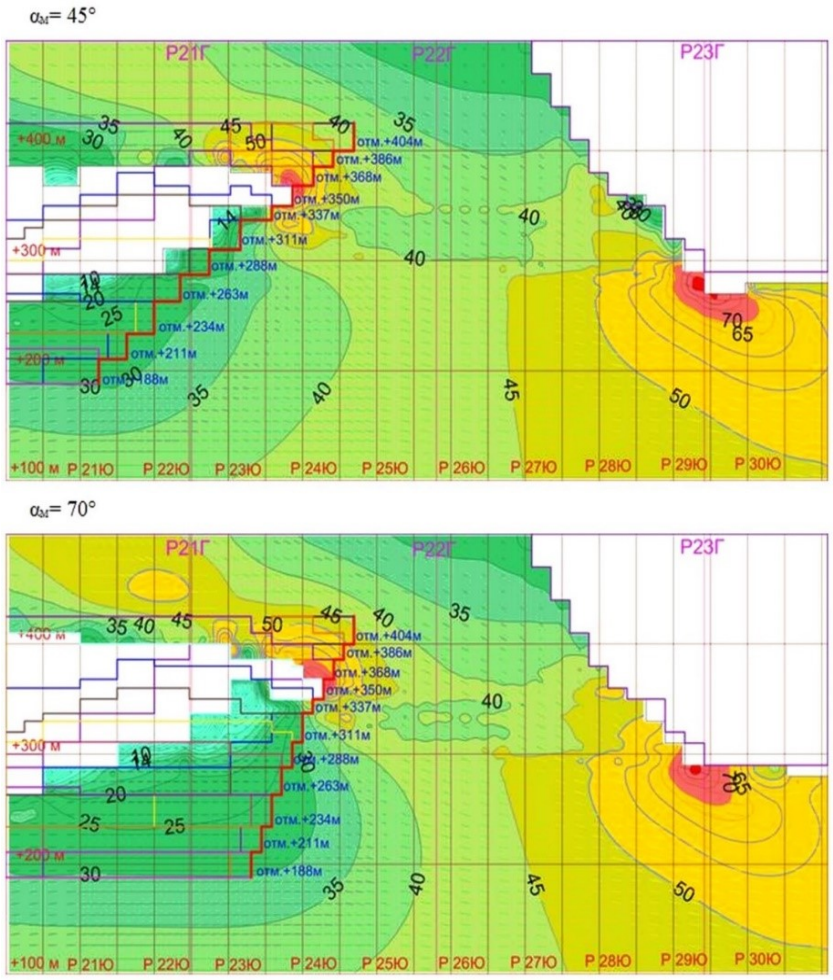


Рис. 5.34. Распределение σ_{max} в разрезе по магистрали М+0 м (±10 м) при различных величинах защитных углов

Площади зон пригрузки и разгрузки массива у ступенчатого фронта подземных горных работ являются сопоставимыми. Поэтому можно сделать вывод о допустимом по геомеханическим условиям укручении фронта подземных горных работ до 70°. Полученная величина защитного угла является ориентировочной и должна уточняться на основе результатов данных натурных исследований поля напряжений участка Гакман и других инструментальных определений.

Как отмечалось при анализе факторов, влияющих на геомеханическое состояние исследуемой области, участок Гакман полностью находится под необрушенной толщей пород. Подземные горные работы развиваются в зоне трехстороннего опирания в условиях тектонического сжатия массива при глубине разработки около 500 м, что препятствует планомерному обрушению до дневной

поверхности и увеличивает шаг обрушений [172], несмотря на разветвленную сеть ослабленных шпреуштейнизированных структур. В настоящее время кромка обрушения на дневной поверхности находится в районе разрезов 20÷21 Юкспора и максимальная подработка налегающей толщи составляет более 150 м.

С целью учета вероятного продвижения зоны обрушенных пород были определены области критических растягивающих напряжений, в которых возможно прорастание трещин отрыва до дневной поверхности. Использовали критерий разрушения по абсолютным значениям растягивающих напряжений с учетом ориентации их площадок и тектонической нарушенности пород [173].

После этого были просчитаны варианты с моделированием прогнозного обрушения подработанной толщи пород. В результате обрушения состояние блока-целика практически не меняется — происходит незначительное снижение действующих напряжений.

Таким образом, допустимая по геомеханическим условиям величина защитного угла, формируемого в вертикальной плоскости (по магистрали) фронтом горных работ гор. +320, +250 и +170 м, составляет не более 70°. Предлагаемые параметры должны уточняться на основе дополнительных натурных исследований поля напряжений участка Гакман и характеристик элементов геологической нарушенности массива, зон шпреуштейнизации.

5.1.3. Защита выработок в тектонически напряженном массиве Кукисвумчоррского месторождения

Подземные горные работы на Кукисвумчоррском месторождении ведутся с применением системы подэтажного обрушения и развиваются от центра к флангам с созданием опережений по висячему боку и по вышележащим подэтажам.

На протяжении нескольких лет проходка отрезных и буро-доставочных штреков на верхнем подэтаже гор. +170 м сопровождалась проявлениями горного давления в динамической форме. Для данного участка характерен высокий уровень сейсмической активности, неоднократно устанавливалась 1 степень удароопасности. Проходка выработок ведется в условиях проявления горного давления в динамической форме, что требует отстаивания выработок, проведения дополнительных разгрузочных мероприятий, усиленного крепления, что значительно увеличивает затраты на отработку запасов блока и снижает скорость проходческих и очистных работ.

Задача обеспечения безопасности выработок при отработке запасов гор. +170 м Кукисвумчоррского месторождения решалась на основе прогнозных расчетов НДС с использованием численного моделирования геомеханической ситуации. Для решения поставленной задачи был разработан ряд локальных моделей, включающих в себя бл. 4/7 гор. +170 м Кукисвумчоррского месторождения с возможностью моделирования поэтапной проходки выработок.

Промоделировано НДС массива пород Кукисвумчоррского месторождения при фактическом состоянии горных работ. На гор. +170 м наиболее удароопасным является верхний подэтаж, где наиболее выражено влияние фронта

горных работ гор. +250 м. Уровень максимальных сжимающих напряжений выше у северного фронта работ (рис. 5.35), что связано с особенностями гористого рельефа.

Проходка выработок для развития отрезки по висячему боку осуществляется в протяженной зоне опорного давления с концентрацией напряжений, ориентированных в направлении, обуславливающем большую удароопасность штреков (рис. 5.36).

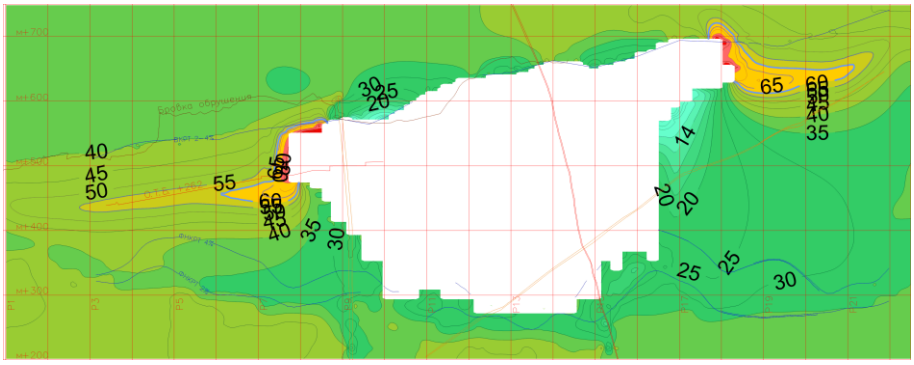


Рис. 5.35. Распределение σ_{max} на верхнем подэтаже гор. +170 м при фактическом состоянии горных работ

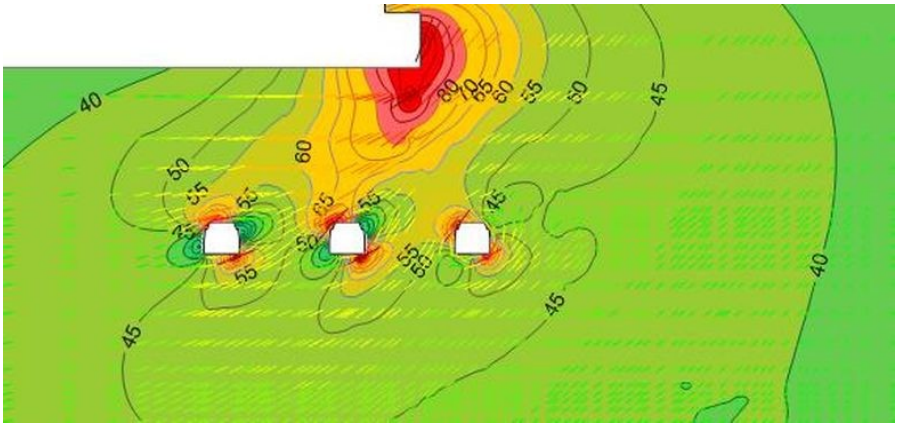


Рис. 5.36. Распределение σ_{max} на разрезе вкрест простирания рудного тела при фактическом состоянии горных работ

Это является основной причиной проявлений горного давления в динамической форме для выработок штрекового направления. Параметром НДС, который прежде всего должен учитываться при разработке разгрузочных мероприятий, является направление максимальной компоненты сжимающих напряжений σ_{max}. Существенный эффект разгрузки массива достигается при создании полостей, перпендикулярных действию σ_{max} [174].

Снизить геодинамические риски возможно в первую очередь путем уменьшения количества отрезных штреков. Для этого целесообразно проходить отрезные штреки субпараллельно контакту рудного тела, что позволит в рассматриваемом блоке: ограничиться двумя отрезными штреками вместо трех-четырех; избежать ступенчатого

фронта горных работ, являющегося дополнительным фактором пригрузки нижележащего подэтажа; снизить потери руды в треугольниках висячего бока.

Еще одним мероприятием, которое будет способствовать смещению зоны концентрации в висячий бок и уменьшению размеров пригруженного массива в зоне активного ведения проходческих работ, является дополнительная отбойка треугольника висячего бока вышележащего горизонта.

Также было запланировано бурение строчки глубоких скважин для разгрузки массива. Моделирование данной ситуации показывает положительный эффект (рис. 5.37). В области, где сымитированы разгрузочные мероприятия, фиксируется уменьшение действующих сжимающих напряжений до величин ниже половины прочности пород на сжатие ($\sigma_{д.} < 0{,}5\ \sigma_{сж.}$). Однако в значительной степени результат зависит от комплекса факторов, в том числе от качества выполненных работ.

Данное мероприятие реализовано к концу II кв. 2021 г. За июль – ноябрь 2021 г. зафиксировано снижение сейсмической активности по защищенному участку массива.

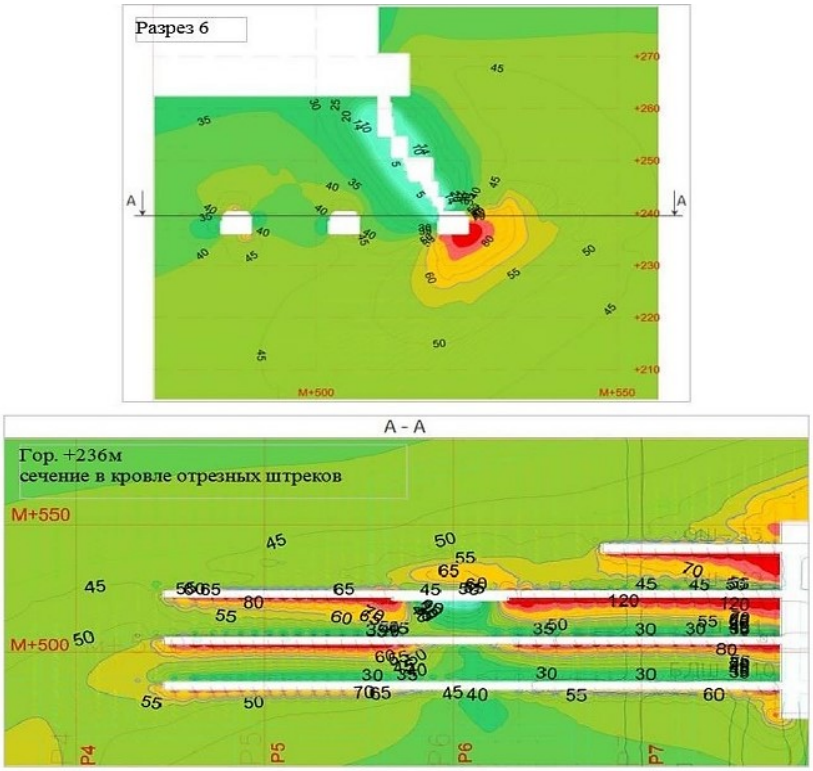


Рис. 5.37. Эффект разгрузки массива при моделировании отрезной щели

Таким образом, на основании анализа геомеханической ситуации и результатов проведения численных экспериментов обоснован комплекс мероприятий по снижению геодинамических рисков и защите выработок от действия высоких тектонических напряжений. Установлено, что наибольшее влияние на удароопасность выработок оказывают действующие в массиве сжимающие напряжения и их направление. При разработке мероприятий учтено направление максимальной компоненты

сжимающих напряжений σ_{max}. Подтвержден существенный эффект разгрузки массива при создании полостей, перпендикулярных действию σ_{max}. Обоснованы условия максимальной эффективности бурения строчки глубоких скважин с вышележащего горизонта для разгрузки выработок нижележащего. Ведется контроль геомеханического состояния участка массива.

5.1.4. Анализ геомеханической ситуации на откаточном горизонте Кировского рудника

При проходке Квершлага № 1 ЮВС-2 на отм. +10 м отмечалось интенсивное динамическое заколообразование и стреляние. 05.09.2019 г. было выполнено комиссионное визуальное обследование Квершлага № 1 и прилегающих выработок.

По результатам наблюдений отмечено: в незакрепленной набрызгбетоном части массив выполнен трещиноватыми породами; наблюдается интенсивный капеж; сформирован купол по северо-западному сектору кровли с мощностью отслоений более 1 м; на момент обследования звуков, характерных для интенсивного динамического заколообразования, не отмечено (рис. 5.38); на контуре выработки, включая забой, отсутствуют признаки концентрации напряжений; для контроля обурен шпур длиной 1,5 м; «дорожки» или «отстреливания» пластин породы от контура при забуривании шпура не отмечено.



Рис. 5.38. Квершлаг № 1 ЮВС-2 на отм. +10 м

Квершлаг № 1 ЮВС-2 пройден по вмещающим породам лежачего бока, представленным массивным средне- и крупнозернистым ийолит-уртитом с пегматоидными включениями. В районе северо-восточного сопряжения с Посадочной площадкой ЮВС-2 наблюдается серия вертикальных трещин. Далее, до пересечения выработкой М+200, геологическое строение массива

соответствует I-й категории по устойчивости. По прогнозу за М+200 м ожидается (и при данном обследовании подтверждено) пересечение выработкой пологонаклонной, с падением на северо-восток зоны трещиноватости с повышенной обводненностью (Зона-I, с видимой мощностью до 30 м) (рис. 5.39). Данная зона была вскрыта ранее Конвейерным уклоном № 2 на отм.+25,0 м.

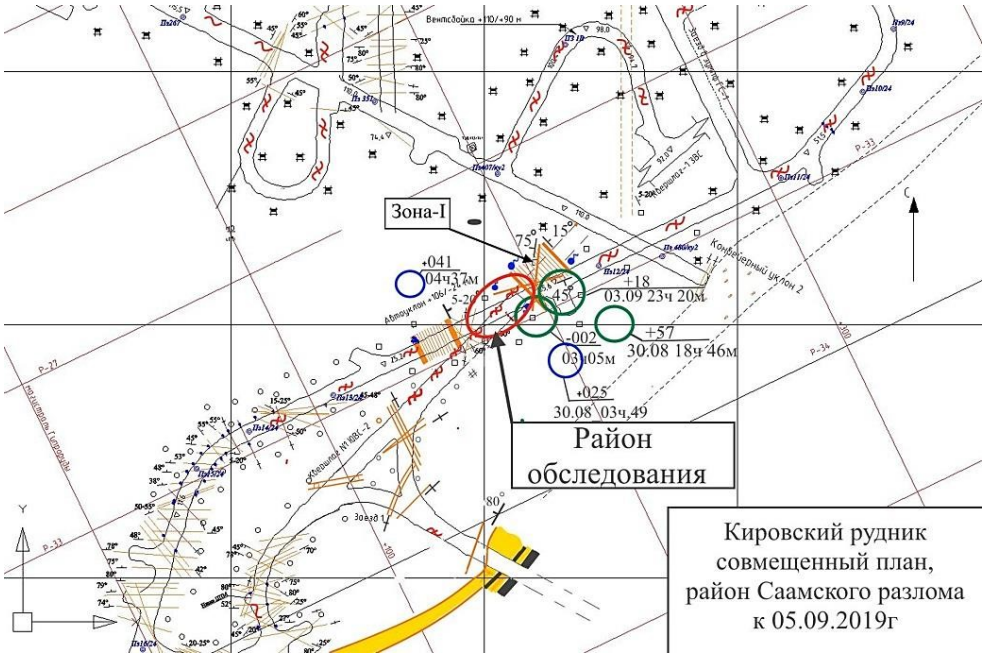


Рис. 5.39. Совмещенный план отм. +108 и +10 м

Обследованный участок выработки расположен в зоне влияния Саамского разлома и ориентирован параллельно ему. По данным СППГУ при проходке Квершлага № 1 отмечалось интенсивное динамическое заколообразование по северо-западному сопряжению кровли со стенкой (категория состояния — «Д»). При приближении к зоне раздробленных пород степень проявления внешних признаков удароопасности возросла, а динамическое заколообразование перешло в стреляние, о чем свидетельствуют видео-материалы, представленные для ознакомления.

Проходка велась с выполнением профилактических мероприятий (бурение разгрузочной строчки шпуров) и применением комбинированного крепления штанг с сеткой и набрызгбетоном.

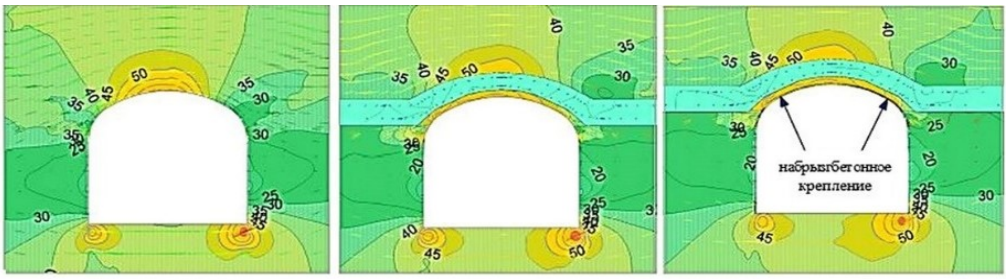
При проходке Автоуклона +106/–24 на участке, приуроченном к лежачему боку Зоны-I, также отмечалось интенсивное динамическое заколообразование по кровле.

Квершлаг № 1 ЮВС-2 пересекается с Автоуклоном +106/–24 под острым углом, расстояние между контурами по вертикали — около 20 м. На момент обследования выработка перешла линию пересечения с Автоуклоном и вскрыла зону трещиноватости.

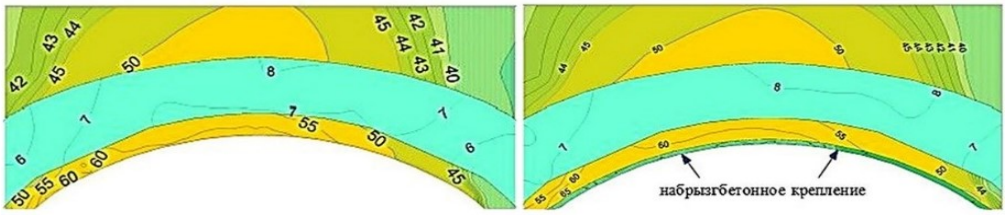
Анализ данных сейсмичности массива (АСКСМ-Кр) косвенно (из-за отсутствия информации о взрывных работах) указывает на приуроченность событий к местам проведения проходческих работ в высоконапряженном массиве в зоне влияния Саамского разлома. После взрывов происходит перераспределение

напряжений, реализуемое в виде сейсмических событий разного энергетического уровня. Более детальный анализ возможен при наличии полной информации о сейсмособытиях без ограничений по координатам, идентификаторам и другим параметрам (из SQL-базы данных), в том числе и по взрывным работам с указанием места и времени производства работ.

Проведены расчеты НДС для состояния горных работ на III квартал 2019 г. С использованием полученного поля напряжений создана локальная модель в районе обследования и промоделирована проходка выработки, соответствующей по направлению Квершлагу № 1 ЮВС-2. Рассмотрены варианты: однородного массива, массива с пологой ослабленной зоной в кровле выработки без крепления; с креплением 50 мм набрызгбетонной крепью. Форма зоны объясняется геометрией сетки конечных элементов. На рис. 5.40 представлено распределение напряжений σ_{max} для сечения — вид на северо-восток для просчитанных трех вариантов.



а



б

Рис. 5.40. Распределение σ_{max}: *а* — в окрестности выработки; *б* — над кровлей

Как видно, зона концентрации напряжений в кровле выработки смещена к северо-западной стенке, значения на контуре достигают 65 МПа. При моделировании структуры зона концентрации σ_{max} увеличивается по площади, а ее смещение к левой стенке становится более выраженным.

При этом абсолютные величины напряжений остаются практически неизменными. После имитации крепления зона концентрации еще немного увеличивается по площади. Уровень напряжений в набрызгбетонной крепи в кровле выработки от 25 до 30 МПа. Для набрызгбетонной крепи предел прочности на сжатие $\sigma_{сж.(б)} = 35$ МПа, т. е. крепь должна сохранять свою устойчивость, тем более в случае ее усиления штангами с сеткой.

По результатам анализа ситуации в районе Квершлага № 1 ЮВС-2 можно сделать следующий вывод: интенсивное динамическое заколообразование, наблюдавшееся

в Квершлаге № 1 ЮВС-2 на участке от северо-западного сопряжения с Посадочной площадкой ЮВС-2 до пересечения зоны трещиноватости, обусловлено высоким уровнем сжимающих напряжений блока, заключенного между серией вертикальных трещин на юго-западе и пологонаклонной зоной трещиноватости на северо-востоке, при приближении к которой на уменьшающийся целик со стороны лежачего крыла и наблюдалось усиление внешних признаков удароопасности.

Необходим контроль качества выполнения профилактических мероприятий службой ППГУ, а именно соотношения линии заложения строчки с зоной максимальных разрушений на контуре выработки; в выработках категории «Д» контроль должен быть ежедневным.

5.2. Обоснование безопасного развития горных работ на удароопасном редкометальном месторождении Ловозерского массива

В полевых условиях проводилось комиссионное визуальное обследование выработок, которые, по данным службы ППГУ, находятся в сложных условиях по фактору горного давления. Наблюдения сопровождались фотосъемкой наиболее характерных участков. Данные работы проводились в январе, феврале, марте, июне и октябре 2021 г.

5.2.1. Анализ данных по пласту II-4 «Малиньиты»

Внешние признаки удароопасности наиболее интенсивно проявляются в западной части рудного горизонта (участок «Кедыквырпах») с постепенным усилением с северо-востока на юго-запад.

Наибольшему негативному воздействию горного давления подвержены выработки штрекового направления, особенно в зоне влияния разломных структур (рис. 5.41).



Рис. 5.41. ЗРШ-13 от РВ-23-15 на запад

Существенное влияние на формирование НДС массива горных пород оказывает также рельеф, представленный на Западном крыле сильно расчлененными формами (1-й цирк Раслака) с резкими перепадами высот (до 300–400 м). Как следствие,

выработки, расположенные в непосредственной близости от проекции подошвы цирка, попадают в зону опорного давления консольного зависания покрывающих пород (рис. 5.50, зоны 1 и 2).

В выработках ортового направления, расположенных в непосредственной близости от зон № 1 и 2, внешние признаки удароопасности в интенсивной форме проявляются в межблоковых целиках на участках, примыкающих к очистному пространству (рис. 5.42).



Рис. 5.42. Восстающий 24-1 от ЗРШ на юг

При проходке скреперного орта 24/13, заложенного вне зоны влияния очистных работ, также установлены участки, где отмечались внешние признаки удароопасности, вплоть до интенсивного динамического заколообразования (рис. 5.43, 5.44).

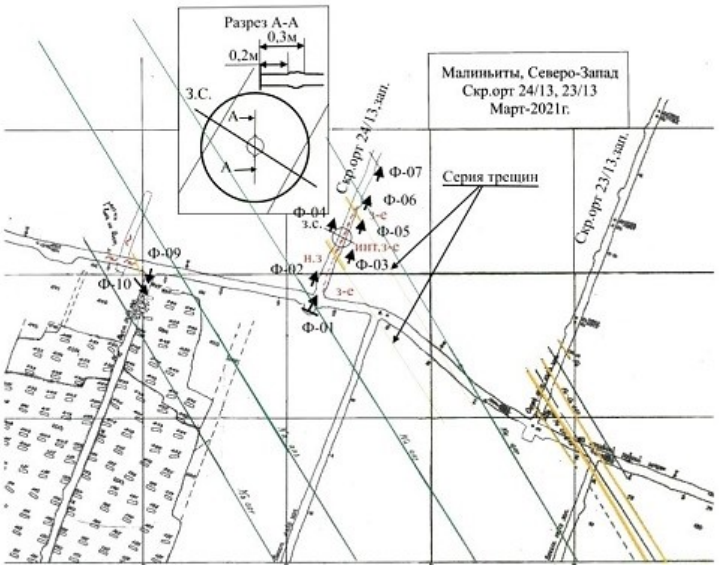


Рис. 5.43. Выкопировка с плана



Рис. 5.44. Скреперный орт 24/13 от ЗРШ-13 на север

В то же время при проходке скреперного орта 23/13, расположенного к востоку от скреперного орта 24/13, внешних признаков удароопасности не обнаружено (рис. 5.45).



Рис. 5.45. Скреперный орт 23/13 от КСЛ на север

Анализ геологических данных позволяет предполагать влияние на перераспределение напряженного состояния массива на данном участке серии параллельных, маломощных, крутопадающих трещин, залеченных вторичными минералами группы цеолита, являющихся концентраторами в исходном поле напряжений.

В выработках штрекового направления, пройденных вне зоны влияния очистных работ (Геологоразведочные штреки 15 и 22, а также Западный рудный штрек 25 гор. +280 м) локализация участков повышенного горного давления обусловлена высокими

значениями исходного поля напряжений в зоне влияния разломных структур более низкого порядка (рис. 5.46).

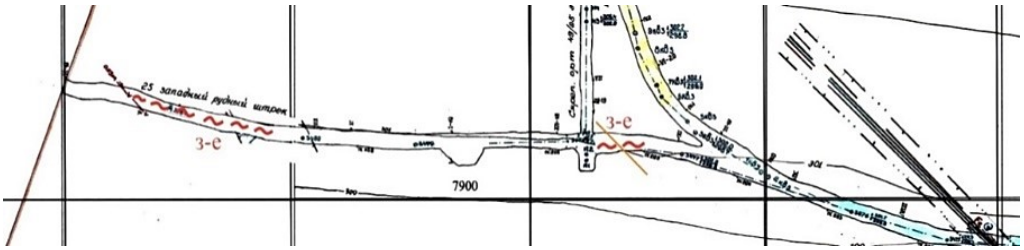


Рис. 5.46. ЗРШ-25, выкопировка из плана: ~ ~ — динамическое заколообразование

Динамическое заколообразование наблюдается преимущественно по кровле выработок, что указывает на преобладание тектонической составляющей исходного поля напряжений над гравитационной (рис. 5.47–5.49).



Рис. 5.47. Геологоразведочный штрек 15



Рис. 5.48. Геологоразведочный штрек 22



Рис. 5.49. ЗРШ-25

В данных выработках наблюдается устойчивая тенденция к усилению проявлений внешних признаков удароопасности с севера на юг.

На основании проработки собранного материала выделены участки с повышенной удароопасностью пласта II-4 «Малиньиты» (рис. 5.50).

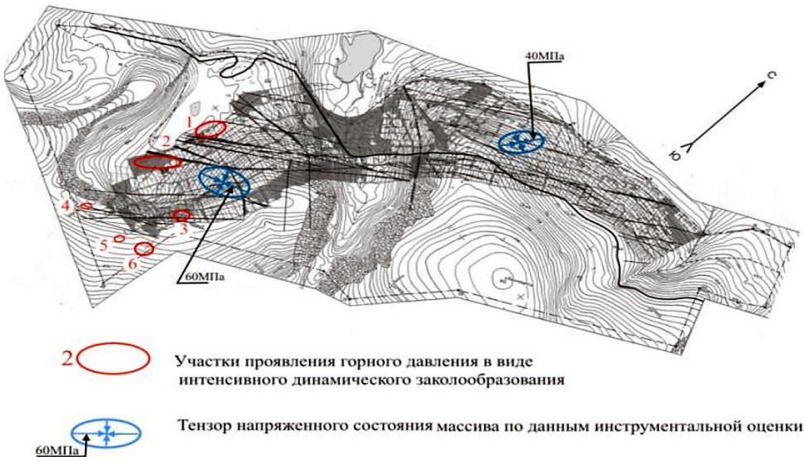


Рис. 5.50. Схема расположения участков с повышенным уровнем действующих субгоризонтальных напряжений пласта II-4 «Малиньиты»

5.2.2. Анализ данных по пласту II-4 «Уртиты»

Обследования, выполненные в предыдущие годы, не выявляли существенных проявлений внешних признаков удароопасности в выработках пласта 1–4 «Уртиты». В 2021 г. при отработке бл. 1/14 на уменьшающийся целик отмечалось динамическое заколообразование в забое и его сопряжении с кровлей (рис. 5.51).



Рис. 5.51. Бл. 1/14 к западу от скреперного орта 1/14

Для оценки категории удароопасности в забое обурены замерные станции, методом КРС установлена категория «опасно». Принято решение о приостановке работ на данном участке. Для обеспечения безопасных условий труда при отработке запасов на соседнем бл. 2/14 были разработаны специальные мероприятия.

По результатам аналитической обработки результатов обследования выработок бл. 1/14 и прилегающих к нему, а также геолого-маркшейдерской

документации, выдвинуто несколько возможных гипотез формирования зон повышенного горного давления.

1. Местоположение в зоне влияния мощного пологонаклонного Главного разлома (рис. 5.52), в лежачем боку которого отрабатывался бл. 1/14.

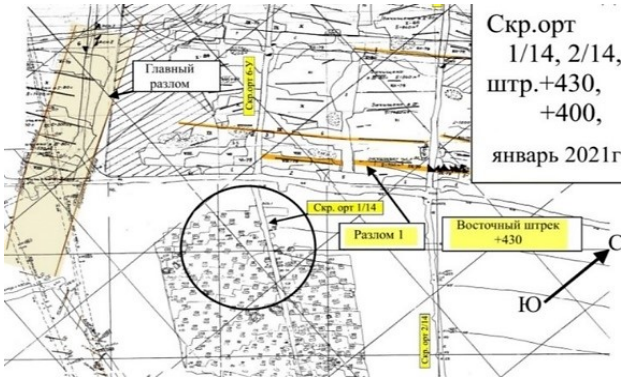


Рис. 5.52. «Уртиты», бл. 1/14 и 2/14. Выкопировка с маркшейдерского плана

2. Уменьшение мощности подштрекового целика.

3. Нахождение в зоне влияния крутопадающей разломной структуры (разлом 1), пересекающей скреперные орты 6У, 7У и др. и проходящей параллельно Восточному штреку +430 в непосредственной близости от него. Породы, выполняющие данный разлом, характеризуются значительной дезинтеграцией, провоцирующей эпизодически вывалы обломков крупных размеров преимущественно изометрической формы (рис. 5.53).



Рис. 5.53. Скреперный орт 7, вид на Разлом 1

Наблюдения за состоянием массива на бл. 2/14, проведенные в несколько этапов, показали, что значительных дополнительных вывалов по Разлому 1 не обнаружено. По главному разлому наблюдается интенсивный капеж, который ранее не отмечался.

Массив, примыкающий к забою бл. 2/14, сохраняет устойчивость, значительных нарушений по фактору горного давления не отмечено (рис. 5.54).



Рис. 5.54. «Уртиты», бл. 2/14, забой

Вывалы, наблюдаемые у межблокового целика, представлены заколами изометрической формы, не характерными для динамического заколообразования, и обусловлены геологической нарушенностью массива (рис. 5.55).

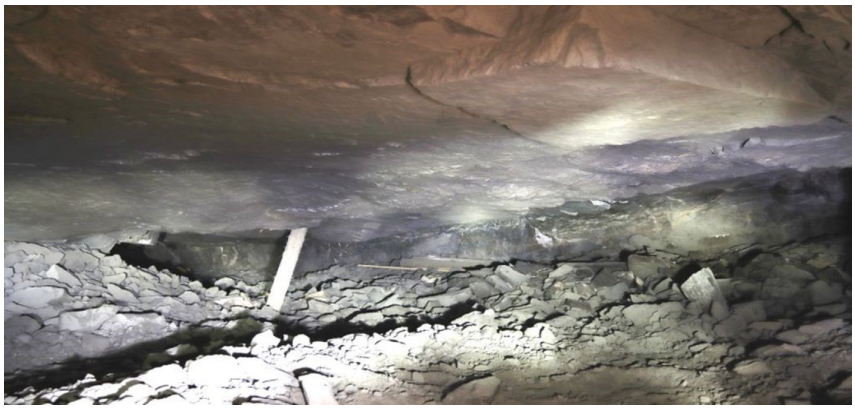


Рис. 5.55. «Уртиты», бл. 2/14, межблоковый целик с бл. 1/14

Необходимо отметить, что мощность подштрекового целика на бл. 1/14 при остановке работ составляла около 20 м, на бл. 2/14 на момент последнего обследования превышала 40 м (рис. 5.56). Учитывая данные обстоятельства, следует продолжать контроль за состоянием массива согласно разработанным мероприятиям.

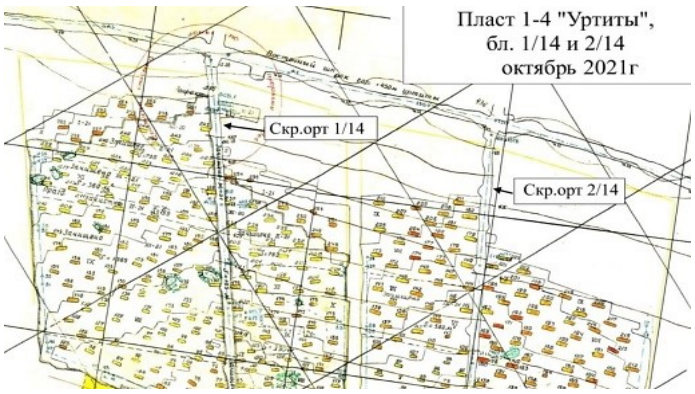


Рис. 5.56. «Уртиты», бл. 1/14 и 2/14. Выкопировка с маркшейдерского плана

5.2.3. Анализ состояния внутриблоковых целиков

Продолжено обследование состояния внутриблоковых целиков при ведении очистных работ по простиранию. Сделан сравнительный анализ изменения состояния внутриблоковых целиков на бл. 46/22 и 47/25 с данными предыдущих наблюдений (рис. 5.57–5.63).

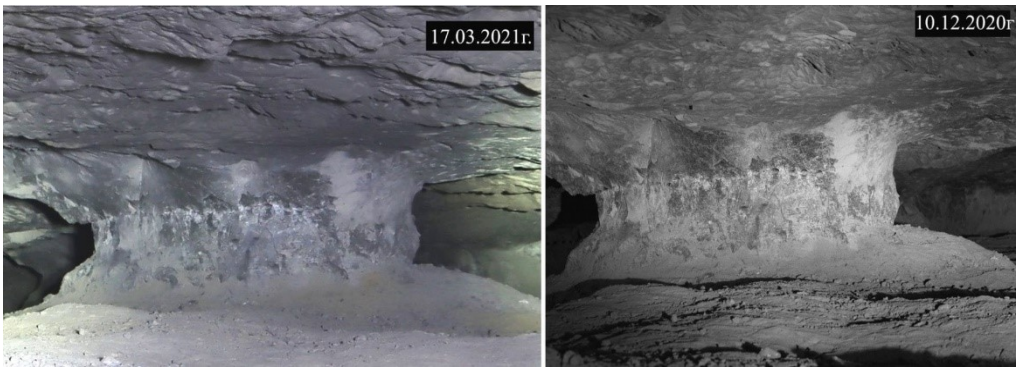


Рис. 5.57. Бл. 46/22 (на выкопировке с маркшейдерского плана Ф-55)

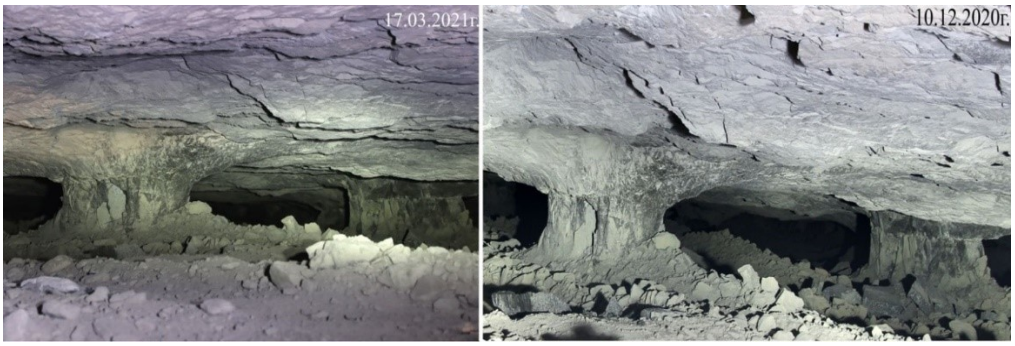


Рис. 5.58. Бл. 47/25 (на выкопировке с маркшейдерского плана Ф-01)



Рис. 5.59. Бл. 47/25 (на выкопировке с маркшейдерского плана Ф-05)



Рис. 5.60. Бл. 47/25 (на выкопировке с маркшейдерского плана Ф-86)

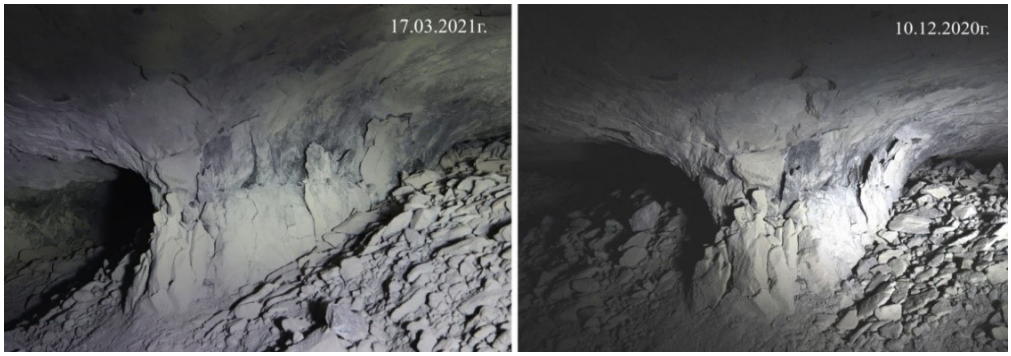


Рис. 5.61. Бл. 47/25 (на выкопировке с маркшейдерского плана Ф-87)



Рис. 5.62. Бл. 47/25 (на выкопировке с маркшейдерского плана Ф-88)

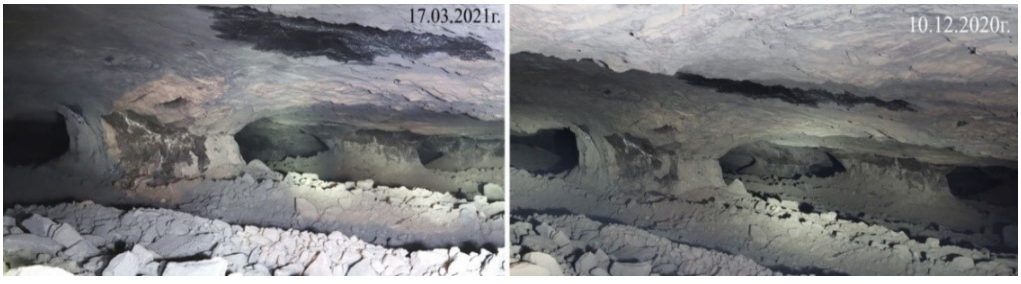


Рис. 5.63. Бл. 47/25 (на выкопировке с маркшейдерского плана Ф-89)

Расположение объектов наблюдения отмечено на рис. 5.64 и 5.65.

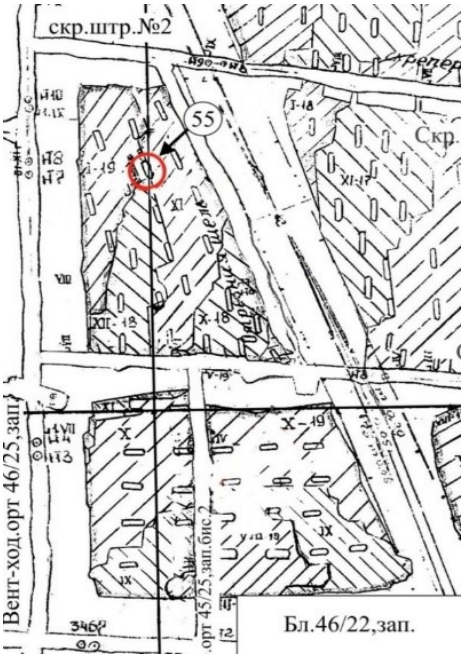


Рис. 5.64. Бл. 46/22. Выкопировка с маркшейдерского плана

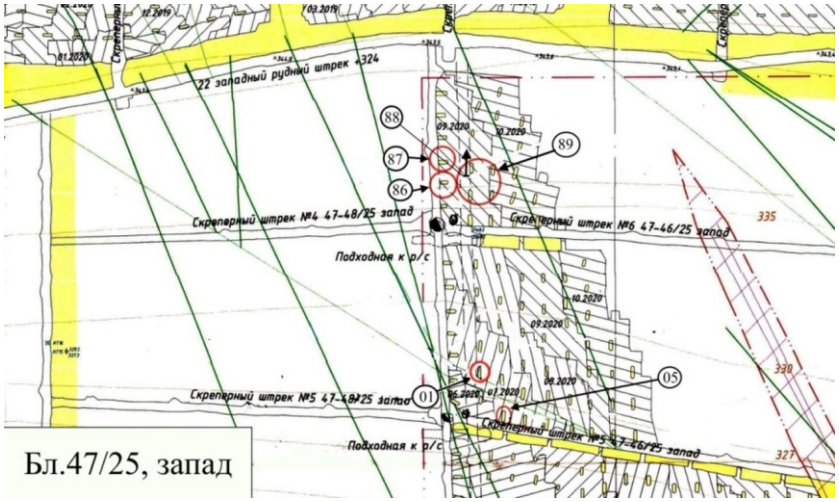


Рис. 5.65. Бл. 47/22. Выкопировка с маркшейдерского плана

Результаты сопоставительного анализа показывают удовлетворительную устойчивость внутриблоковых целиков. Значительного уменьшения их геометрических параметров не наблюдается. Наибольшему нарушению подвержены целики, примыкающие к скреперным ортам или штрекам, где сказывается интенсивное механическое воздействие скреперами и извлекаемой породой (рис. 5.59, 5.60).

В 2021 г. инструментальный контроль удароопасности массива горных пород методом КРС выполнялся на станциях, обуренных под метод КРС, которые были заложены как в очистных блоках, так и в одиночных выработках, проходка

которых велась за пределами зоны влияния очистных работ. Категория удароопасности — «опасно» установлена в очистном забое бл. 1/14 пласта 1–4 «Уртит». По данным сейсмостанций «Ловозеро» и «Ильма» на руднике Карнасурт с ноября 2020 г. по октябрь 2021 г. отмечалось плавное нарастание плотности сейсмических событий на Умбозерском участке. А также на бл. 1/14 и 2/14 пласта 1–4 «Уртит», что, возможно, объясняется активизацией Главного разлома, в связи с проявившейся в этом году фильтрацией, снизившей коэффициент сцепления по берегам разлома (рис. 5.66).



Рис. 5.66. Распределение сейсмических событий. Проекция на пласт II-4 «Малиньиты»

В целом зоны сейсмической активности (с учетом пониженной точности пеленгации эпицентров событий по двум работающим станциям) тяготеют к районам ведения добычных работ, изменяющих конфигурацию очистного пространства, и, как следствие, приводят к перераспределению исходного поля напряжений.

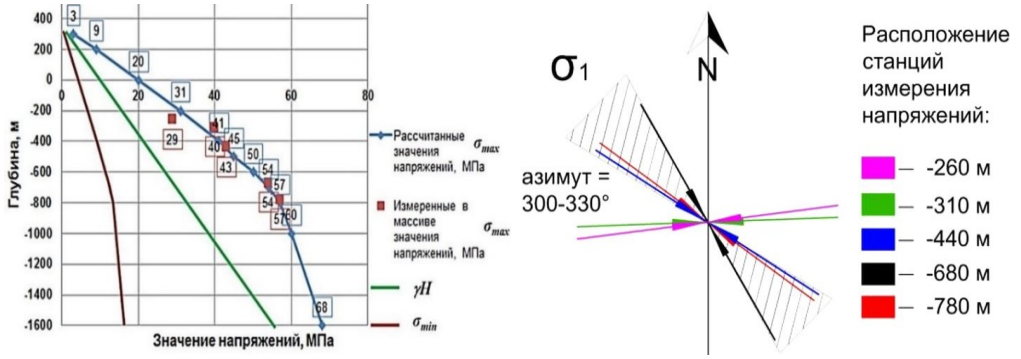
5.3. Определение параметров безопасной отработки запасов Ждановского месторождения медно-никелевых руд

Комплексное геомеханическое сопровождение горных работ на руднике «Северный» осуществляется ГоИ КНЦ РАН 6 лет. За это время сложилось однозначное представление о типе НДС разрабатываемых рудником месторождений — это гравитационно-тектонический тип с существенным превышением горизонтального сжатия над вертикальным. Результаты измерений подтвердили неравномерность распределения тектонических напряжений, обусловленную блочным строением и изменчивостью свойств горных пород. Данные обследования горных выработок показали характер разрушения в выработках на различных участках ведения горных работ.

Выявлено несколько особенностей поля напряжений. Так, соотношение действующих тектонических напряжений по отношению друг к другу (рис. 5.67 *а*) отличается от других месторождений Кольского полуострова — минимальные тектонические напряжения составляют 0,3÷0,4 от максимальных тектонических напряжений, $\sigma_{min} = (0{,}3 \div 0{,}4) \times \sigma_{max}$. За счет этого второй по уровню действия компонентой напряжений является гравитационная. Анализ изменения тектонических напряжений с глубиной показал, что рост абсолютных величин

горизонтальных сжимающих напряжений аппроксимируется параболической зависимостью, т. е. увеличение $\sigma_{т.}$ на больших глубинах постепенно замедляется.

По результатам измерений НДС направление действия максимальных тектонических напряжений варьирует в достаточно широких пределах (рис. 5.67 *б*). В то же время многолетние обследования горных выработок говорят о том, что проявления горного давления фиксируются в основном в выработках штрекового направления, из чего можно сделать вывод о превалирующем направлении максимального тектонического сжатия вкрест простирания рудного тела.



а *б*

Рис. 5.67. Параметры НДС по результатам измерений напряжений методом разгрузки: *а* — изменение компонент действующих напряжений с глубиной; *б* — вариация направления действия σ_{max}

5.3.1. Результаты визуального обследования незакрепленных подземных выработок рудника «Северный»

Визуальное обследование действующих горных выработок Ждановского месторождения рудника «Северный» проводилось с целью выявления участков с внешними признаками удароопасности, оценки геодинамического состояния массива, включающего рудное тело, выявления факторов, влияющих на возникновение очагов повышенного горного давления. Обследование сопровождалось фотосъемкой участков с наиболее характерными нарушениями приконтурной части выработок.

Были обследованы:

— Центральное рудное тело на отм. –410 и –425 м;

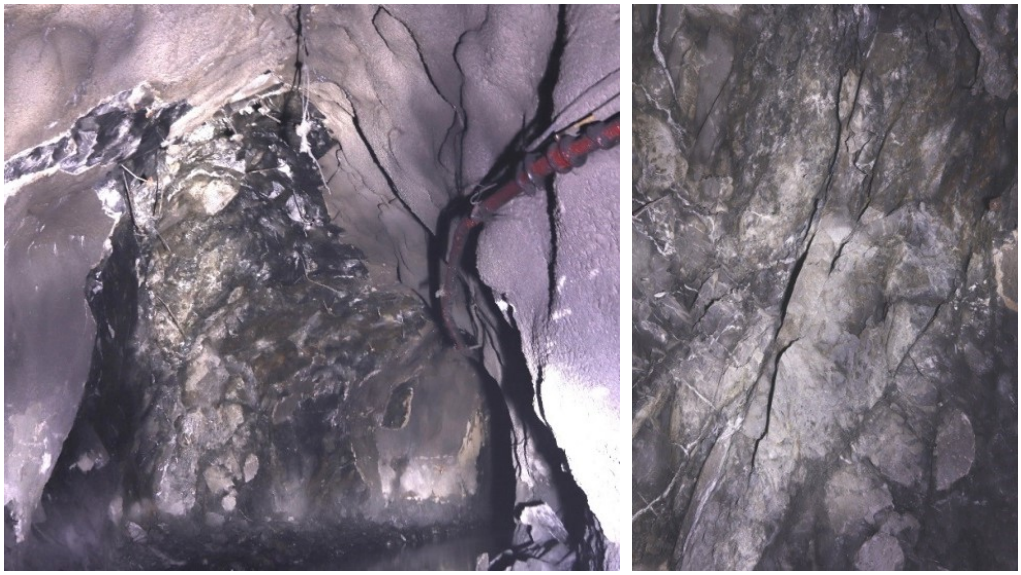
— Западное (юго-западное) рудное тело: –335, 330, –355 м и Автосъезд –355/–375;

— Восточное (юго-восточное) рудное тело: –260 и –280 м.

Центральное рудное тело

Горизонт –410 м. Обследованы все доступные для осмотра на момент наблюдения выработки. На восточном крыле горизонта очистные работы завершены. Состояние приконтурной части Полевого штрека –410 м и ортов до границы отбойки определяется в основном особенностями геологического строения массива. Участков

с явными признаками повышенного горного давления не установлено, за исключением Полевого штрека в интервале Р –3÷–4, где геологическая нарушенность осложняется повышенным горным давлением (рис. 5.68).



а *б*

Рис. 5.68. Полевой штрек, направление от Р-5 на северо-запад: *а* — общий вид; *б* — кровля

На западном крыле ведутся очистные работы. Наиболее неблагоприятное состояние массива, обусловленное повышенным горным давлением, отмечено в буро-доставочных штреках, расположенных в зоне опорного давления от южной границы по отм. –390 (БДШ-2 и БДШ-3) (рис. 5.69).



Рис. 5.69. БДШ-2, направление от орта 23 на запад

Горизонт –425 м. На гор. –425 м внешние признаки удароопасности наиболее явно проявляются также в выработках штрекового направления к западу от очистных работ и расположены под очистной выемкой гор. –41 0 м (рис. 5.70).

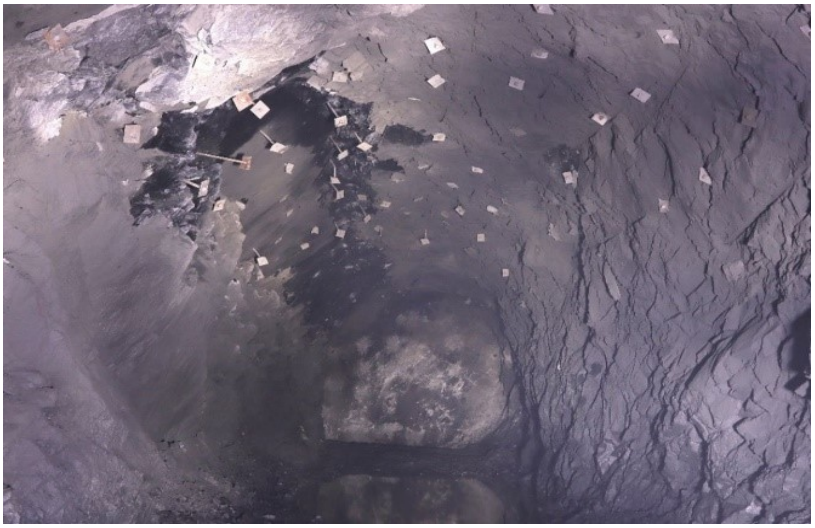


Рис. 5.70. БДШ-м2, направление от орта 4+30 на запад

Состояние Полевого штрека –425 м по фактору горного давления в целом удовлетворительное. Динамическое заколообразование на участке протяженностью 20 м в интервале Р –3÷–4 обусловлено как высоким уровнем тектонических напряжений, так и существенной трещиноватостью массива горных пород (рис. 5.71).

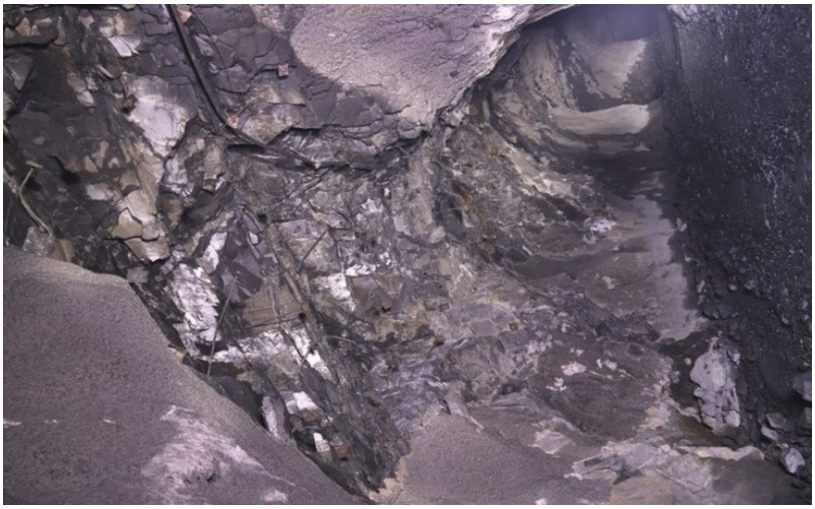


Рис. 5.71. Полевой штрек, направление от Р –4 на запад

Данный участок по параметрам НДС массива хорошо коррелирует с аналогичным участком на гор. –410 м, что отражается на расположении зон динамических разрушений по отношению к ориентации выработок.

Нарушение целостности приконтурной части массива буро-доставочных штреков, проходящих в лежачем боку вблизи контакта рудного тела, обусловлено наличием согласно залегающей крутонаклонной тектонической зоны, представленной слабо связанными рассланцованными породами (рис. 5.72).

Нарушение контура Насосной на отм. –425 м по ее южной стенке и сопряжению с кровлей обусловлено возможной подвижкой по крутопадающему разлому мощностью 0,15–0,20 м, выполненному вторичным, слабо связанным материалом (рис. 5.73). Данный дизъюнктив также является концентратором напряжений в массиве. На этом участке складываются неблагоприятные условия как по геологическому строению (серии параллельных, взаимно пересекающихся трещин), так и по технологической изрезанности целика значительным количеством выработок, в том числе и рудного тела «Северное». По южной стенке обурена разгрузочная строчка скважинами диаметром 102 мм, с расстоянием между центрами в среднем 0,4 м. Проработки межскважинных целиков не наблюдается.



Рис. 5.72. БДШ-0, направление от орта 7 на запад



Рис. 5.73. Насосная, направление от ПВ ВВ 5+6 на запад

Юго-западное рудное тело

Горизонт –335 м. Выработки данного горизонта по фактору горного давления в целом сохраняют устойчивость, Участков с интенсивными формами проявления горного давления не выявлено. Наиболее отчетливо динамическое заколообразование проявляется в выработках штрекового направления, расположенных в западном секторе (рис. 5.74).

В подавляющем большинстве случаев нарушения приконтурной части выработок обусловлено особенностями геологического строения массива. Незначительное

динамическое заколообразование отмечается в одиночных выработках, расположенных в непосредственной близости от фронта очистных работ (рис. 5.75).



Рис. 5.74. Полевой штрек –335м, направление от орта 17 на восток



Рис. 5.75. Заезд на гор. –330 м, направление от Разрезного БДШ на юг

Горизонт –355 м. Выработки гор. –355 м сохраняют устойчивость по фактору горного давления. Участков с интенсивными формами проявления горного давления не установлено. Отмечаются локальные участки незначительного динамического заколообразования по кровле, спровоцированные в большей степени неоднородностью геологического строения массива.

Нарушение приконтурной части массива, имеющее место на Автосъезде –355/–375 обусловлено слабосцементированным заполнителем тектонических нарушений (рис. 5.76).



Рис. 5.76. Автосъезд, от отм. –363 м

Юго-восточное рудное тело

Горизонты –260, –280 м. Выработки на отм. –260, –280 м в целом сохраняют устойчивость по фактору горного давления. Отмечены только отдельные локальные участки с незначительны динамическим заколообразованием (рис. 5.77).



Рис. 5.77. Гор. –260 м, БДШ-1, направление от орта 38+12 на восток

Основной причиной нарушения выработок на данных горизонтах является геологическая нарушенность массива.

Результаты анализа параметров и характера распределения проявлений внешних признаков удароопасности на контуре выработок позволяют заключить следующее.

Нарушение приконтурной части по фактору горного давления в основном, как и прежде, отмечается в выработках штрекового направления, разрушения

в выработках ортового направления фиксируются только на отдельных участках в непосредственной близости от границ очистного пространства.

Максимальному разрушению в динамической форме подвергаются выработки, расположенные в зоне опорного давления от границы очистных работ по вышележащему горизонту (подэтажу).

В большинстве случаев важным фактором, влияющим на параметры нарушеннности приконтурной части выработок, является геологическое строение массива, а именно естественная трещиноватость, образованная во время формирования рудного тела, и эпигенетические дизъюнктивы тектонического характера.

Во время обследования отмечено существенное снижение суммарной протяженности участков проявлений горного давления в интенсивной форме. Это связано в первую очередь с тем фактом, что на момент обследования были отработаны стыковочные зоны (целики) на горизонтах Центрального рудного тела, которые в предыдущие периоды наблюдений являлись наиболее опасными элементами конфигурации горнотехнической ситуации по негативному проявлению горного давления.

В буро-доставочных выработках ЦРТ с проявлениями горного давления прослеживается следующая закономерность в расположении сектора нарушения на контуре выработки: в выработках висячего бока внешние признаки горного давления наблюдаются на сопряжении северной стенки с кровлей; в выработках лежачего бока — на сопряжении южной стенки с кровлей. При этом максимальному разрушению подвержены выработки, расположенные под границей отбойки по висячему боку.

Основываясь на полученных результатах, можно дать следующие рекомендации для минимизации негативного влияния высокого уровня тектонических напряжений.

Вести отработку запасов месторождения без блоков-целиков, что будет способствовать уменьшению общего объема зон с критическими параметрами НДС массива.

Необходимо вести отрезку штреками до сбойки с вышележащим горизонтом с ежесуточным контролем состояния приконтурной части, дальнейшую отработку осуществлять с применением ортовой подготовки.

Требуется дальнейшее детальное изучение параметров зоны опорного давления от очистных работ вышележащих горизонтов (подэтажей), характера влияния дизъюнктивных нарушений на перераспределение напряжений с обязательным нанесением их на планшеты. Особое внимание необходимо обратить на серпентинизированные разломные структуры в лежачем боку, залегающие согласно с рудным телом. По ним наблюдаются подвижки, провоцирующие обрушение породы значительных объемов.

Для дальнейшего анализа требуются данные регулярных наблюдений, включающие детальную фиксацию геологической и технологической ситуации и фотосъемку выработок с наиболее характерными формами проявления горного давления. Периодичность полного визуального обследования всех действующих выработок должна быть не реже двух раз в год лицами, ответственными за ведение работ в условиях повышенного горного давления и работниками, прошедшими специальное обучение. Результаты обследования должны оформляться актами и наноситься на планы масштаба 1:1000. Ежесуточный контроль должен быть организован за выработками, проходка которых осуществляется в зоне опорного давления от очистных работ по вышележащему горизонту, в блоках-целиках и при ожидании пересечения выработками крупных разломных структур. Все случаи

внезапного обрушения значительных объемов породы должны обследоваться комиссией с участием лиц, ответственных за ведение горных работ на удароопасных участках и представителей научно-исследовательской организации, курирующей данные работы на предприятии.

Рекомендуется разработка проекта и организация сейсмического мониторинга для выявления геодинамически активных зон, влияющих на изменение конфигурации исходного поля напряжений и являющихся причиной значительных по объему вывалов в выработках лежачего бока.

При возникновении ситуаций, требующих разработки специальных мероприятий, привлекать для участия в комиссионном рассмотрении причин произошедшего и принятии решений по созданию безопасных условий труда представителей организации, ведущей геомеханическое сопровождение горных работ. В этом случае повышается обоснованность и эффективность мероприятий по разгрузке массива. Например, в Насосной ЦРТ на отм. –425 м перед бурением разгрузочной строчки требовалось определение местоположения зоны максимальных сжимающих напряжений (в частности, методом КРС) и степени дезинтеграции массива.

5.3.2. Численное моделирование НДС массива Ждановского месторождения медно-никелевых руд

Особенности НДС были учтены при корректировке граничных условий для конечно-элементной модели, установленной непосредственно на предприятии и позволяющей выполнять прогноз трансформации поля напряжений в окрестности планируемых очистных выемок.

В обновленной модели были рассчитаны следующие варианты.

1. Фактическое состояние горных работ на октябрь 2021 г.

2. Фактическое состояние горных работ на октябрь 2021 г. с имитацией обрушения подработанной толщи пород.

3. Варианты с развитием горных работ на гор. +425 м: с опережением по лежачему боку; с опережением по висячему боку; развитие горных работ фронтом, вытянутым вкрест простирания рудного тела без опережений.

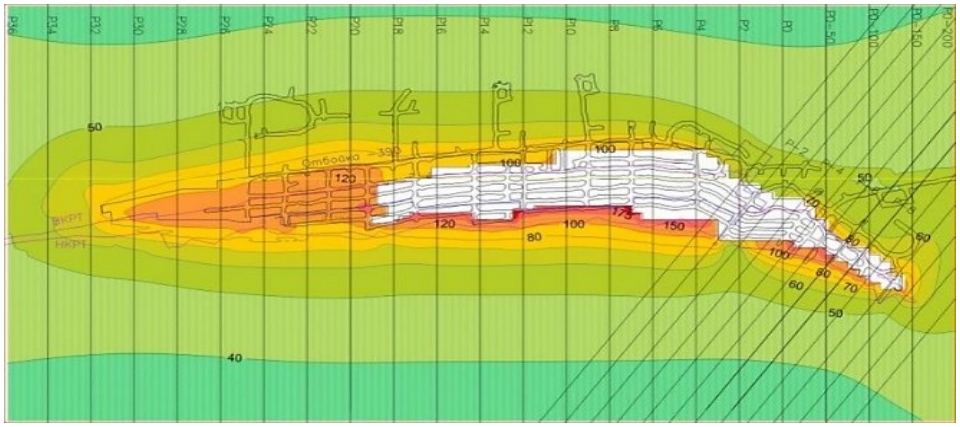
5.3.2.1. Распределение напряжений в окрестности горных работ ЦРТ, оценка соответствия данным обследования горных выработок

В первую очередь была промоделирована горнотехническая ситуация, соответствующая фактическому развитию горных работ на момент последнего обследования горных выработок — октябрь 2021 г. Для увеличения детализации расчетов НДС сетка конечных элементов была уплотнена в 2 раза как в магистральном направлении, так и по разрезам. На рис. 5.78 и 5.79 представлено распределение напряжений на гор. –410 и –425 м в окрестности Центрального рудного тела. Для увеличения информативности в качестве подложек использовали планы горных работ с фактически пройденными горными выработками и контактами рудного тела, дополнительно нанесены границы очистного пространства по вышележащему горизонту.

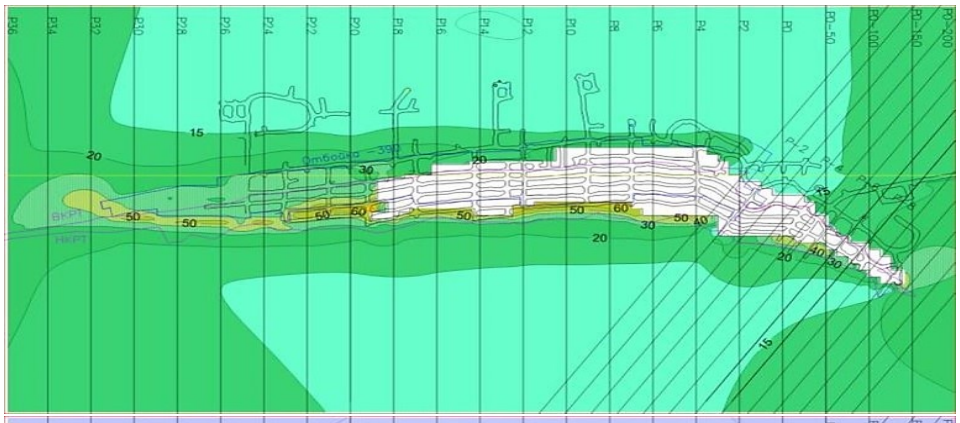
Как видно, наиболее высокий уровень сжимающих напряжений σ_{max} формируется непосредственно под очистным пространством вышележащего горизонта. Здесь общий фон напряжений составляет 100–120 МПа, т. е. более половины предела прочности пород на сжатие $\sigma_{max} \geq 0{,}5\ \sigma_{сж.}$, что создает условия для проявления горного давления

в динамической форме на контуре выработок. На отдельных участках в висячем боку рудной залежи концентрация σ_{max} достигает 150 МПа. На разрезах вкрест простирания рудной залежи (рис. 5.80) хорошо видно, что зона концентрации напряжений расположена под очистным пространством и область значений более 100 м распространяется вниз приблизительно на 30 м (Р20), причем максимальные значения — со стороны висячего бока рудной залежи. Далее уровень напряжений постепенно выравнивается и приближается к исходному на удалении более 100 м от границ очистной выемки. По разрезу 2 концентрация напряжений несколько ниже.

σ_{max}



σ_2



σ_{min}



Рис. 5.78. Распределение напряжений при фактическом состоянии горных работ, гор. –410 м, ЦРТ

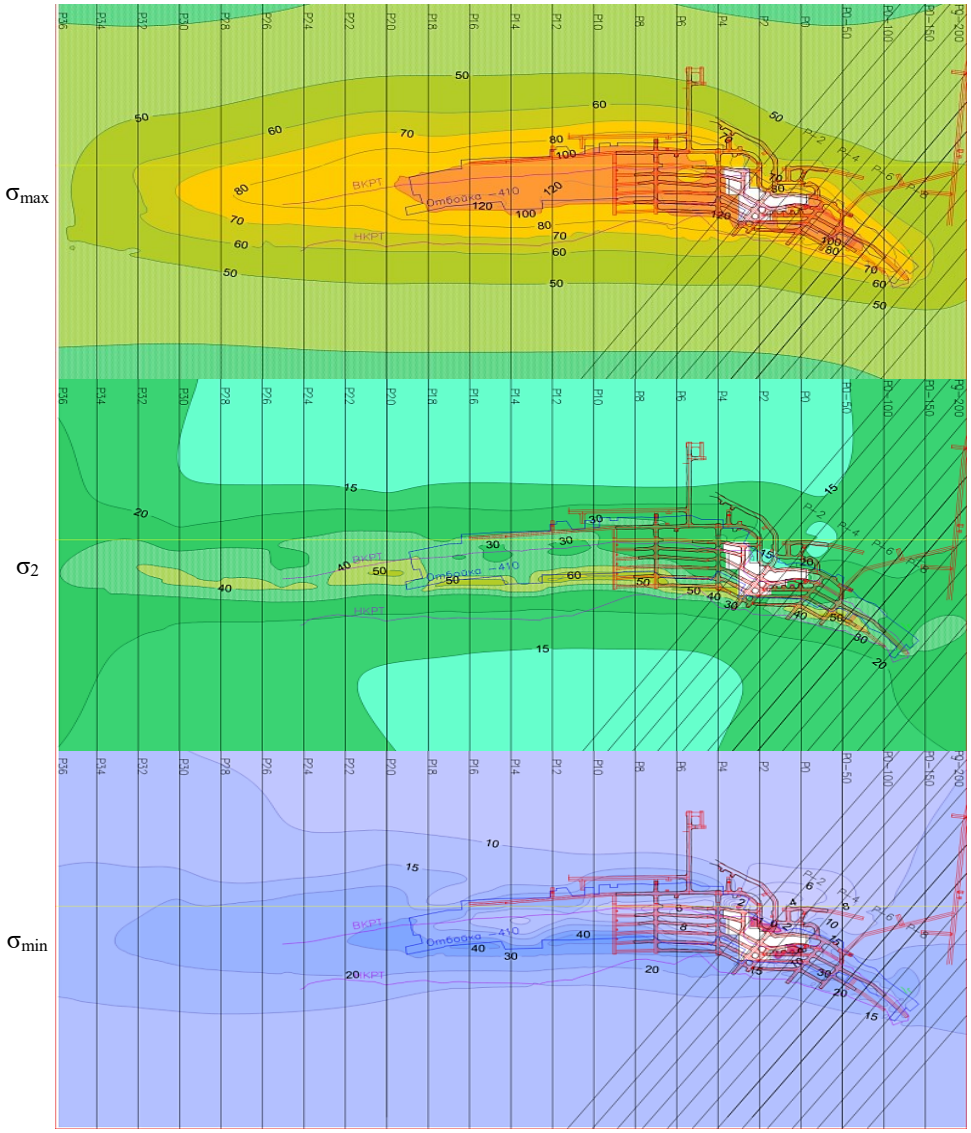


Рис. 5.79. Распределение напряжений при фактическом состоянии горных работ, гор. –425 м, ЦРТ

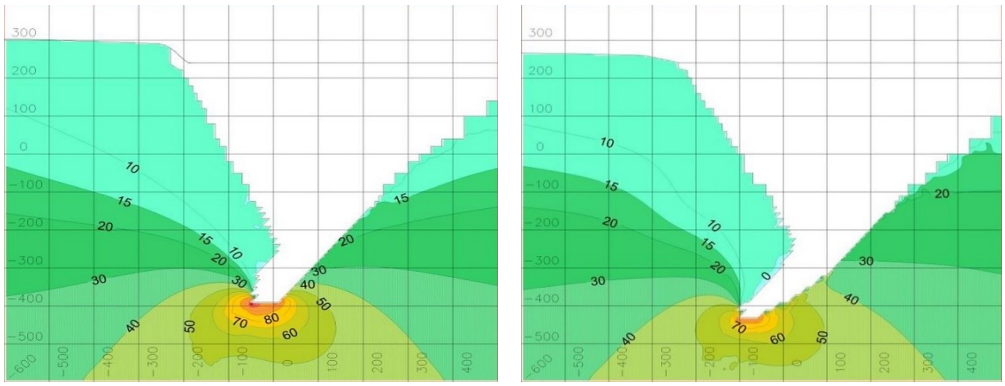


Рис. 5.80. Распределение напряжений σ_{max} при фактическом состоянии горных работ в сечениях по разрезам Р20 и Р2

Значимой для разрушений на контуре горных выработок может также являться и промежуточная компонента главных напряжений σ_2, направленная субвертикально. На локальных участках ее уровень более 60 МПа. Зоны растягивающих напряжений σ_{min} приурочены к лежачему боку рудной залежи, что может являться дополнительным фактором разрушения в окрестности серпентинизированных разломных структур, залегающих субпараллельно контакту рудного тела.

При детальном рассмотрении расчетного поля напряжений (рис. 5.81, 5.82) видно, что зоны концентрации напряжений σ_{max} коррелируют с зонами проявлений горного давления в выработках в динамической форме, причем направление действия σ_{max} вкрест простирания рудного тела предопределяет разрушения в выработках штрекового направления. Так, одной из областей с наиболее высоким уровнем напряжений является область, включающая БДШ 2, БДШ 3 и БДШ 4 на гор. +410 м от фронта работ на данной отметке до разреза 18. По мере продвижения фронта работ будет смещаться и область повышенной удароопасности. В силу достаточной значимости как горизонтального, так и вертикального сжатия, результирующее действующее напряжение на контуре выработки направлено под углом к горизонту. Таким образом, создаются условия для реализации разрушений в динамической форме на сопряжении стенки и кровли выработок, что также совпадает с данными визуального обследования. Результаты моделирования НДС на гор. –425 м также удовлетворительно коррелируют с данными визуального обследования.

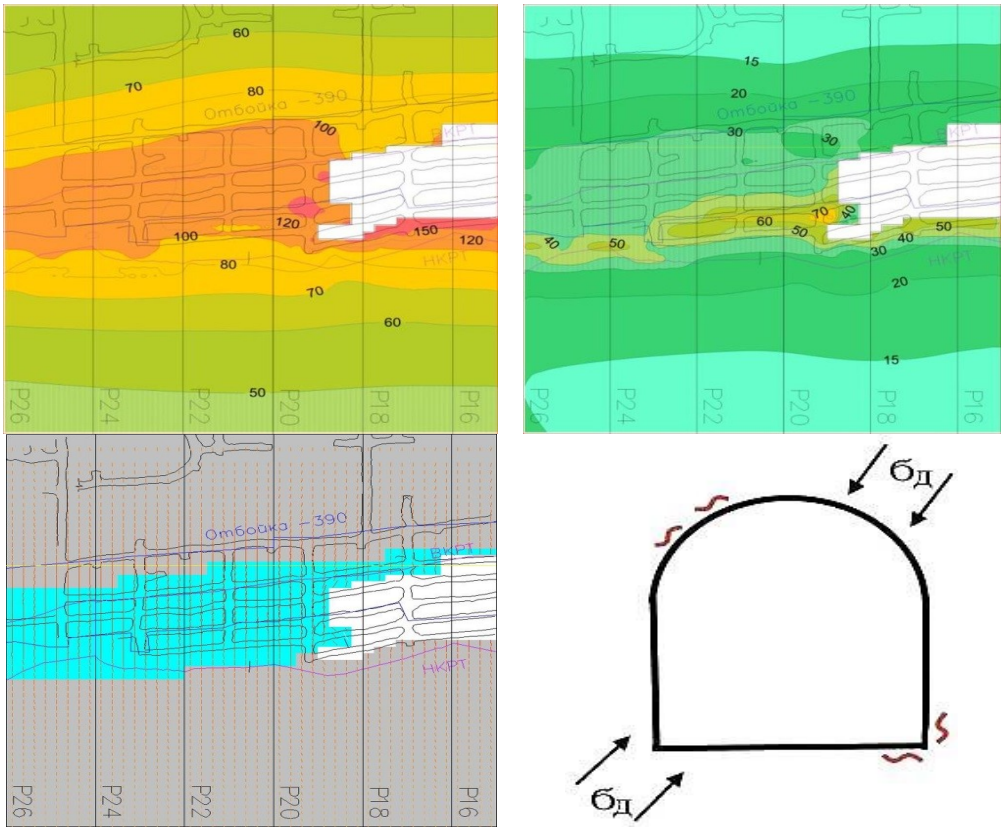


Рис. 5.81. Распределение напряжений σ_{max} при фактическом состоянии горных работ на гор. –410 м в пределах разрезов Р16÷Р26

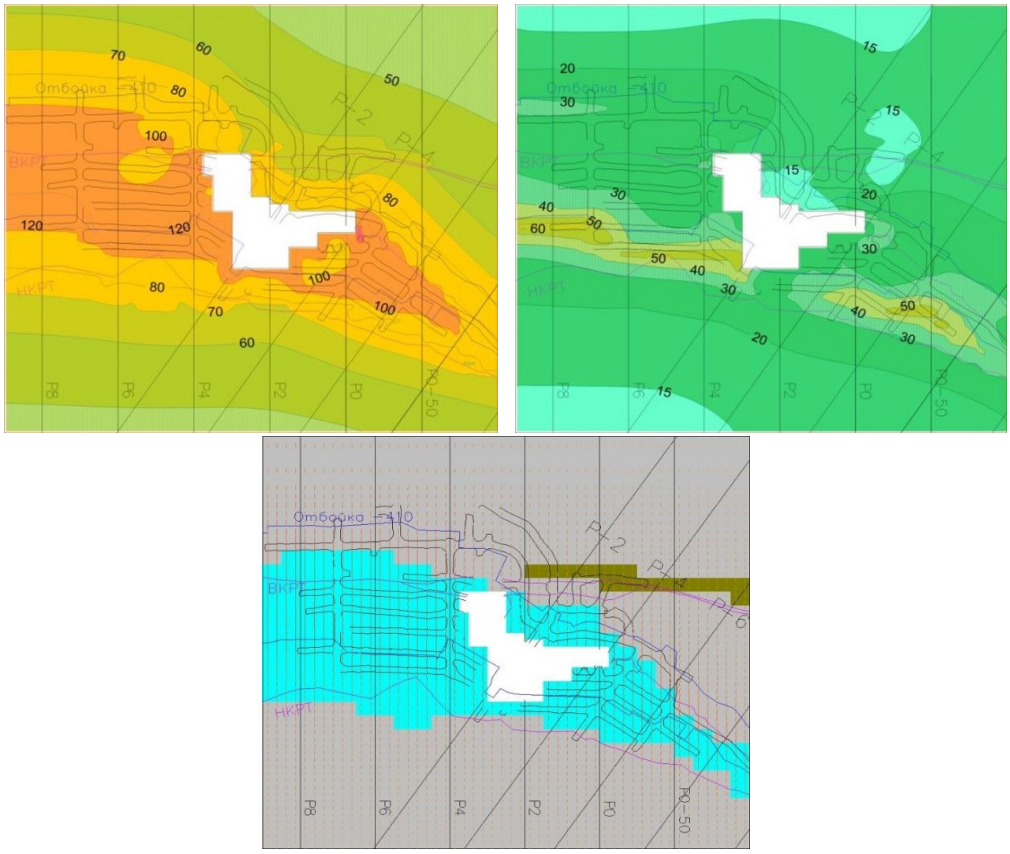


Рис. 5.82. Распределение напряжений σ_{max} при фактическом состоянии горных работ на гор. –425 м в пределах разрезов Р8÷Р0-100 м

Таким образом, скорректированная объемная конечно-элементная модель участка в районе Центрального рудного тела Ждановского месторождения отражает основные особенности распределения напряжений и может использоваться для прогноза геомеханической ситуации при развитии горных работ.

5.3.2.2. Влияние имитации обрушения подработанных пород на расчетное поле напряжений

Одним из процессов, существенно влияющим на перераспределение напряжений при подземной выемке запасов месторождений, является сдвижение и обрушение подработанных горных пород. Известно, что форма проявления, характер развития и параметры процесса сдвижения горных пород и дневной поверхности зависят от следующих основных факторов: формы и размеров выработанного пространства; физико-механических свойств вмещающих пород; угла падения залежи; структурных особенностей массива (трещиноватость, тектонические разрывы, ослабленные зоны); глубины разработки; рельефа местности; величины и направления действия тектонических сил; сейсмического воздействия массовых взрывов; собственной сейсмичности массива и др.

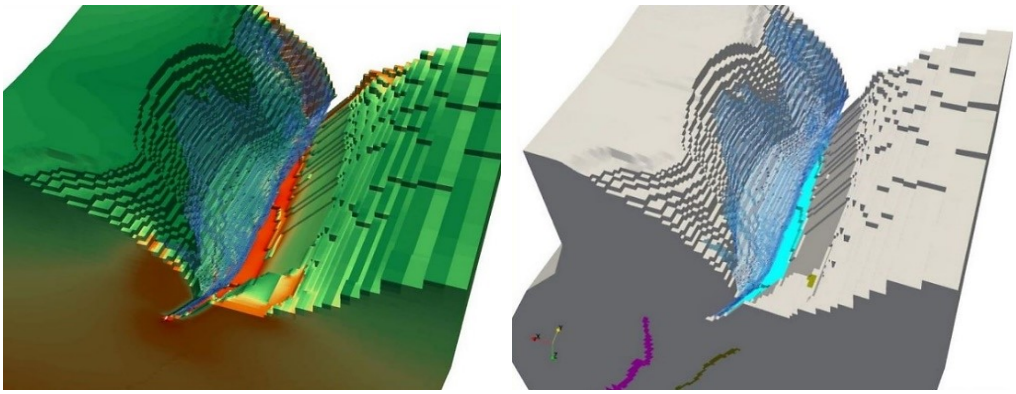
Наибольшая концентрация напряжений при отработке месторождений с гравитационно-тектоническим типом НДС наблюдается именно в зоне опорного давления. В какой-то мере снижение уровня напряжений и перемещение зоны опорного

давления на большее удаление от зоны активного ведения горных работ может происходить при обрушении подработанной толщи пород. В то же время процессы прорастания трещин отрыва в подработанном массиве сопровождаются увеличением сейсмической активности, уровень которой наиболее высок при формировании отрывов, существенных по объему консольных зависаний. Поэтому лучшим сценарием обрушения подработанной толщи является ее систематическое обрушение с минимально возможным шагом. Однако существует несколько факторов, которые мешают такому планомерному обрушению. Условно их можно поделить на естественные (действие высоких сжимающих тектонических напряжений, большую глубину отработки запасов) и создаваемые искусственно (сложный техногенный рельеф поверхности, ведение работ встречными фронтами на уменьшающийся целик и др.).

К сожалению, на руднике «Северный» не ведутся инструментальные наблюдения за процессом сдвижения земной поверхности, что затрудняет, в том числе и моделирование НДС массива, зависящее от параметров зависаний подработанной толщи пород.

В ГоИ КНЦ РАН выработан подход к прогнозированию параметров обрушений налегающих пород в скальных массивах, основанный на численном моделировании объемного НДС с использованием критерия разрушения по абсолютным значениям растягивающих напряжений, с учетом ориентации их площадок и тектонической нарушенности пород [173]. Этот подход был использован при моделировании параметров обрушений для фактической геометрии отработанных пространств в пределах Центрального рудного тела. Промоделировано обрушение подработанных пород (рис. 5.83) в зонах с критическими параметрами растягивающих напряжений и его выход на дневную поверхность при соответствующем направлении потенциальных трещин отрыва. Мощность таких зон в некоторых сечениях достигала 100 м (рис. 5.84).

После того, как было промоделировано обрушение, которое в большинстве случаев выходило на борт карьерной выемки, объем областей растягивающих напряжений и абсолютные величины σ_{min} в них снизились в несколько раз.



а *б*

Рис. 5.83. Зона обрушения подработанных пород, выходящая в карьерное пространство: *а* — 3D-модель; *б* — результаты расчетов

Были проанализированы и изменения параметров напряжений на рабочих горизонтах после имитации обрушения подработанных пород. Наиболее существенные изменения произошли, как и предполагалось, в висячем боку рудной залежи. Так,

на некоторых участках гор. –410 м произошло снижение максимальных сжимающих напряжений со 150 до 120 МПа, т. е. на 20 % (рис. 5.85). В то же время с увеличением глубины такие отличия практически нивелируются, на гор. –425 м распределение σ_{max} практически идентичное для двух вариантов.

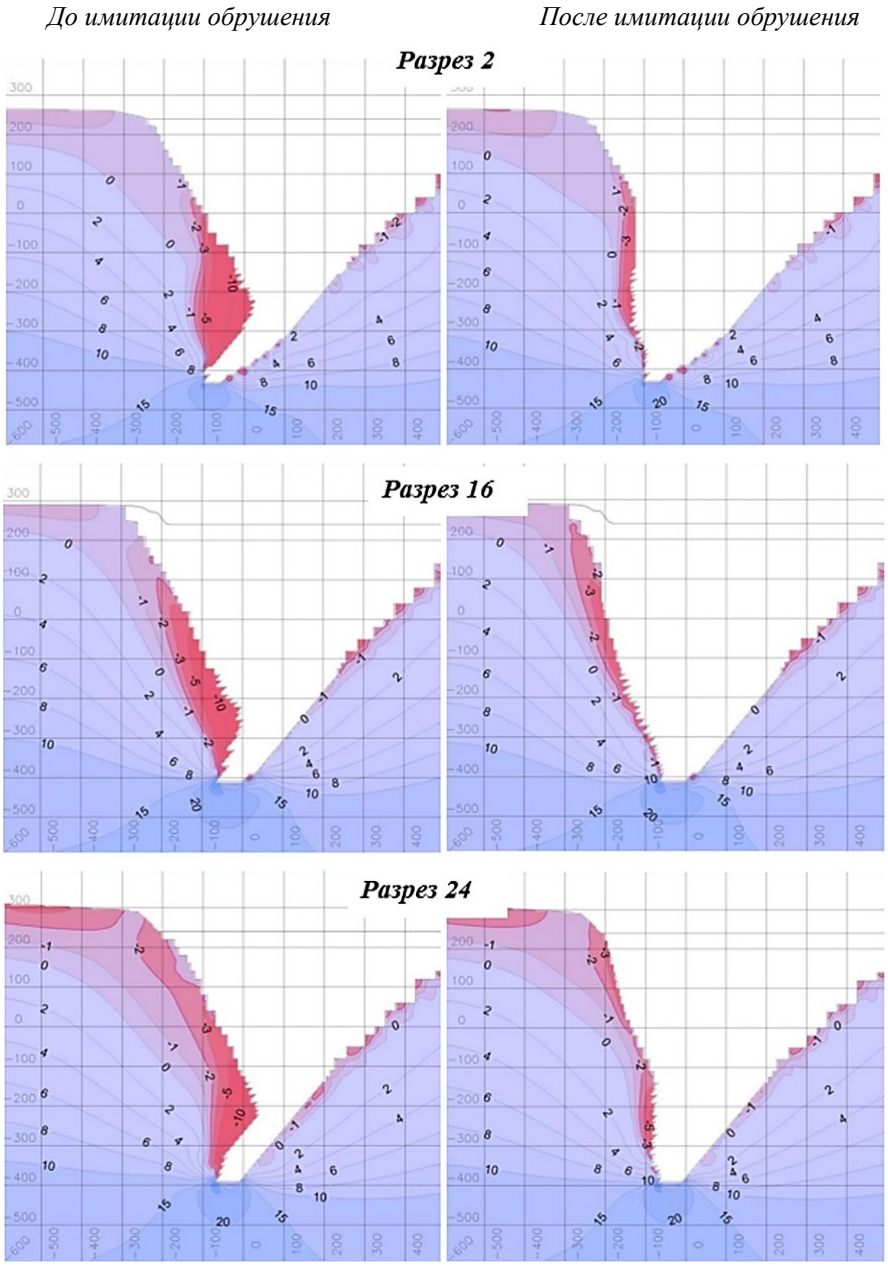
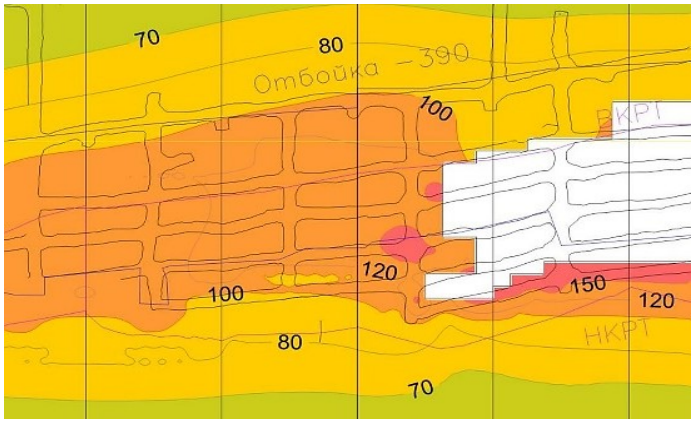


Рис. 5.84. Распределение σ_{min} в подработанных породах в районе Центрального рудного тела при фактическом состоянии горных работ

Таким образом, расчеты показали, что параметры обрушения являются одним из важных факторов формирования вторичных полей напряжений. Для повышения уровня соответствия модели фактическому полю напряжений желательно

получение информации о местоположении бровки обрушения, которую может дать съемка дневной поверхности в зоне подработки массива.

До имитации обрушения



После имитации обрушения

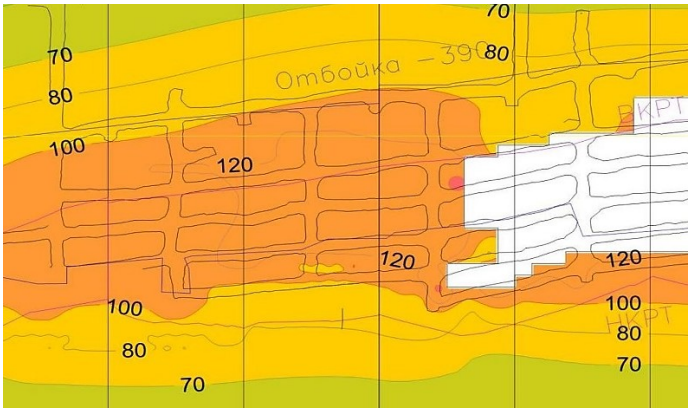


Рис. 5.85. Распределение σ_{max} на гор. –410 м тела при фактическом состоянии горных работ

5.3.2.3. Геомеханическая оценка вариантов опережений развития горных работ на подэтажах

Наиболее эффективным способом снижения геомеханических и геодинамических рисков при отработке запасов в высоконапряженных массивах является региональная разгрузка областей активного ведения горных работ как при определенном порядке ведения очистных работ, так и с помощью специальных защитных зон.

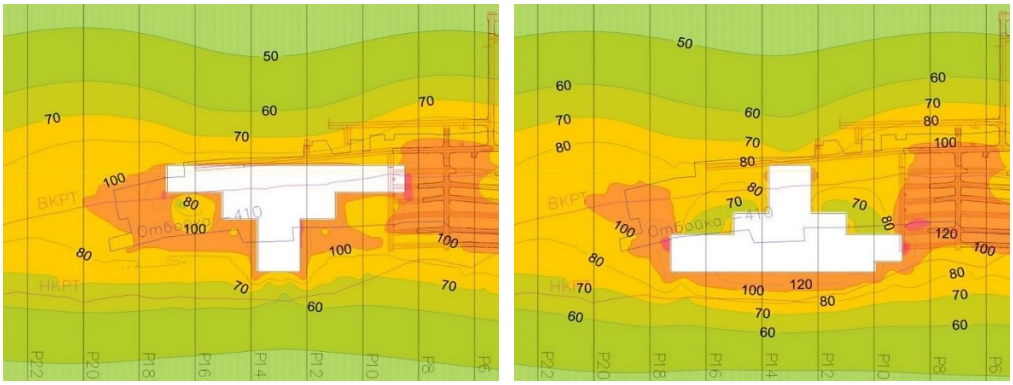
Традиционно на руднике «Северный» работы ведутся с определенным опережением по лежачему боку. Такой порядок развития очистной выемки, исходя из выявленных закономерностей распределения напряжений, с большой вероятностью не является оптимальным. Данное утверждение требует геомеханического обоснования.

С этой целью были рассчитаны варианты: с опережением по лежачему боку; с опережением по висячему боку; развитие горных работ фронтом, вытянутым вкрест простирания рудного тела без опережений.

При анализе данных вариантов определены существенные различия в формировании зон концентрации напряжений и разгрузки массива. Наиболее выраженный эффект разгрузки как по площади, так и по абсолютным величинам

действующих максимальных сжимающих напряжений проявляется при развитии отбойки с опережением по висячему боку. В этом случае весь массив к лежачему боку от опережения оказывается в защищенной зоне, где значения σ_{max} на 50 % ниже, чем при развитии горных работ без опережений и на 25 % ниже, чем при развитии с опережением по лежачему боку рудного тела (рис. 5.86).

Опережение по лежачему боку *Опережение по висячему боку*



Без опережений

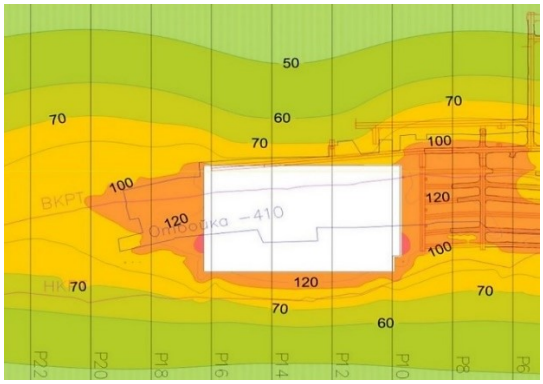


Рис. 5.86. Распределение напряжений σ_{max} на гор. –425 м при различных вариантах опережений

Следует учитывать также тот факт, что при опережающем развитии по лежачему боку зона концентрации напряжений захватывает область нижнего контакта рудного тела, где располагаются ослабленные структуры с низким пределом прочности пород на сжатие. Суммирование этих факторов увеличивает как риск разрушения выработок лежачего бока, так и вероятность подвижек участков массива по данным структурам (рис. 5.87). Наиболее нежелательным вариантом развития работ является вариант с фронтом, вытянутым вкрест простирания рудного тела (без опережений).

Для дополнительного эффекта разгрузки массива в схожих условиях специалистами Горного института КНЦ РАН была разработана технология создания по висячему боку рудной залежи протяженных заглубленных защитных зон. Суть технологии заключается в следующем: в висячем боку рудной залежи за один массовый взрыв производится одновременная отбойка запасов одного из треугольников висячего бока и образование отрезной щели, заглубленной на один подэтаж. Разделка отрезной щели производится за один прием. Для обеспечения гарантированной разделки отрезной щели по простиранию на каждом эксплуатационном подэтаже проходятся отрезные штреки,

из которых, в свою очередь, через 16–18 м проходятся отрезные восстающие. Восстающие протяженностью 16–20 м проходятся методом секционного взрывания глубоких скважин. Такой метод разделки отрезных щелей позволяет сооружать их на длину до 100 м и более. Под обрушенными породами, по границе отбойки вышележащего горизонта с висячим боком, также разделывается отрезная щель шириной 4–5 м, ориентированная по простиранию рудной залежи. Отрезная щель разделывается от нижележащего подэтажа до сбойки ее с обрушением вышележащего подэтажа. Пример приведен для одного из Хибинских месторождений (рис. 5.88) [175].

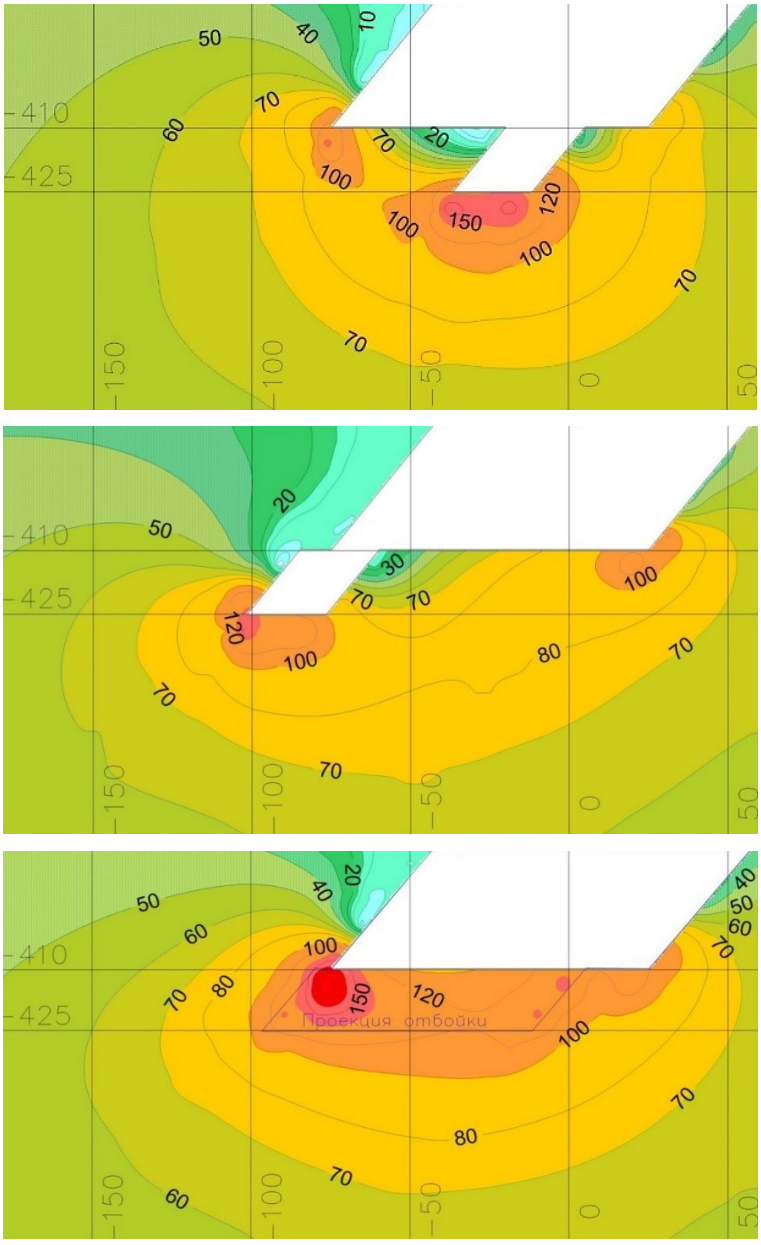


Рис. 5.87. Распределение напряжений σ_{max} при различных вариантах опережений по разрезу 10

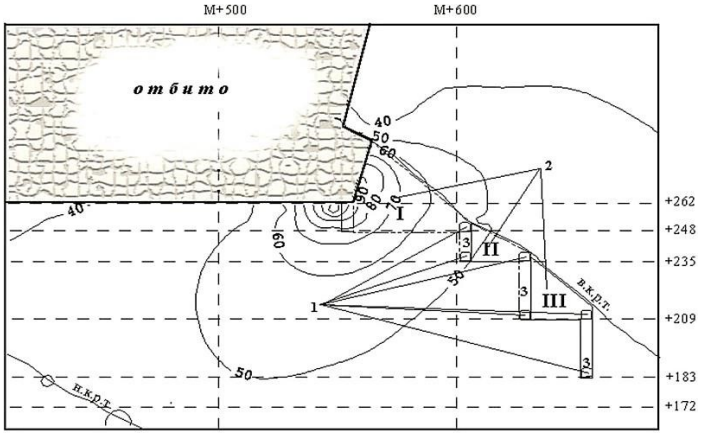


Рис. 5.88. Схема образования защитной зоны в висячем боку рудной залежи и распределение σ_{max} по высоте этажа в центре вырезного блока до начала отбойки: *1* — отрезные штреки; *2* — треугольники висячего бока; *3* — отрезные восстающие

5.3.3. Оценка качества геологической среды с выделением геомеханических разностей на основе рейтинговых классификаций качества массива горных пород в незакрепленных выработках Ждановского месторождения

В 2021 г. было продолжено исследование качественных характеристик массива с использованием рейтинговых классификаций. Для оценки качества массива пород Ждановского месторождения применялись показатель качества массива Н. Бартона (*Q*) и геомеханическая классификация З. Т. Бенявского (RMR).

Показатель качества массива *Q* изменяется от 0,001 до 1000 по логарифмической шкале и определяется по формуле:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}, \qquad (5.1)$$

где *RQD* — показатель качества массива (характеризует степень нарушенности массива); J_n — количество систем трещин; J_r — показатель шероховатости поверхностей трещин; J_a — показатель степени выветривания, изменения поверхностей и заполнителя трещин; J_w — понижающий коэффициент, учитывающий обводненность массива и трещин; *SRF* — понижающий коэффициент, учитывающий напряженное состояние массива в виде наличия зон сдвига, концентраций напряжений, вспучиваний и набухания пород.

Для определения степени качества массива по значению показателя *Q* используют табл. 5.3.

Таблица 5.3

Определение качественной характеристики массива по рейтинговому показателю *Q*

Значение показателя *Q*	Качественная характеристика массива
1000–400	Исключительно высокого качества
400–100	Очень высокого качества
100–40	Хорошего качества
40–10	Качественный
10–4	Среднего качества
4–1	Слабого качества
1–0,1	Низкого качества
0,1–0,01	Очень низкого качества
0,01–0	Исключительно низкого качества

В основе системы классификации RMR лежит оценка прочности отдельных структурных областей массива горных пород с учетом 6 параметров для каждого из них: прочность пород на одноосное сжатие (*JA1*); показатель качества массива RQD (J_{A2}); расстояние между неоднородностями (J_{A3}); характеристика неоднородностей (J_{A4}), которая включает:

шероховатость трещин (J_{A41});

длину трещин (J_{A42});

раскрытие трещин (J_{A43});

заполнение трещин (J_{A44});

выветрелость стенок трещин (J_{A45});

таким образом, $J_{A4} = J_{A41} + J_{A42} + J_{A43} + J_{A44} + J_{A45}$; условия водопритока (J_{A5}); направленность неоднородностей(J_B):

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B. \quad (5.2)$$

Для определения степени качества массива и выбора вида крепления по значению показателя RMR используют табл. 5.4.

Таблица 5.4

Выбор крепления по классификации устойчивости породного массива RMR

Качество массива по значению рейтинга RMR	Вид и характеристики крепления	
	ЖБШ	торкрет
Очень качественный. RMR: 81–100	Крепление не требуется, за исключением точечной установки анкеров на некоторых участках	
Качественный. RMR: 61–80	Установка крепления локально	Локальное покрытие торкретом толщиной 50 мм
Среднего качества. RMR: 41–60	Систематическое крепление	Покрытие торкретом толщиной 50–100 мм
Низкого качества. RMR: 21–40	Систематическое крепление с локальной установкой сетки	Покрытие торкретом толщиной 100–150 мм
Очень низкого качества. RMR < 21	Систематическое крепление с установкой сетки	Покрытие торкретом толщиной 150–200 мм

Для оценки качества массива вмещающих пород и руд Ждановского месторождения были выполнены исследования по определению рейтинговых показателей в окрестности Центрального (выработки гор. –410 м) и Юго-Западного рудных тел (выработки гор. –335 и –355 м). Исследования проводились в незакрепленных (без торкрет-бетона) выработках, в которых на момент проведения работ не осуществлялось транспортирование и перегрузка горной массы.

Для оценки качества массива выбирались участки горных выработок со схожим геологическим строением, геомеханическими характеристиками и НДС. Затем выполнялось описание характеристик массива таких, как: направление и распространение основных систем трещин, степень шероховатости и волнистости поверхностей трещин, их измененность, заполненность, раскрытие стенок трещин, оценка НДС массива, присутствие ослабленных зон, обводненность массива и др.

В связи с тем, что на качественные характеристики и, соответственно, на устойчивость массива в значительной степени оказывают влияние параметры НДС массива, которые не являются одинаковыми на разных участках массива и зависят от таких факторов, как положение очистного пространства относительно выработок, наличие ослабленных зон и др., дополнительно был рассчитан параметр *Q*' (Q'_{prime}),

который, кроме НДС, также не учитывает фактор влияния обводненности массива, являющийся непостоянным в случае учета водопритоков от технологических процессов.

На гор. –410 м ЦРТ был исследован полевой штрек и доступные участки выработок, пройденных в рудном теле. Результаты рейтинговой оценки качества массива отражены в табл. 5.5. По результатам рейтинговой оценки были определены интервалы горных выработок со схожими геомеханическими характеристиками и близкими значениями рейтинговых показателей. Для удобства восприятия выделенные доменные разности разделены по цветам (рис. 5.89).

Таблица 5.5

Значения рейтинговых показателей RMR, *Q* и *Q*’ для интервалов выработок гор. –410 ЦРТ

№ интервала	Место-нахождение интервала	Значение RMR, качественная характе-ристика массива	Значение *Q*, качественная характе-ристика массива	Значение *Q*’, качественная характе-ристика массива
1	ПШ в рр.21-22	70 Массив качественный	14 Массив качественный	14 Массив качественный
2	ПШ в рр.22-24	65 Массив качественный	13 Массив качественный	13 Массив качественный
3	ПШ в рр.24-26	70 Массив качественный	14 Массив качественный	14 Массив качественный
4	БДШ 1 в рр12-15	63 Массив качественный	3 Массив слабого качества	10 Массив качественный
5	БДШ 2 в рр12-15	69 Массив качественный	4 Массив среднего качества	11 Массив качественный
6	БДШ 3 в рр12-15	75 Массив качественный	4 Массив среднего качества	12 Массив качественный
7	БДШ 4 в рр12-15	72 Массив качественный	5 Массив среднего качества	12 Массив качественный

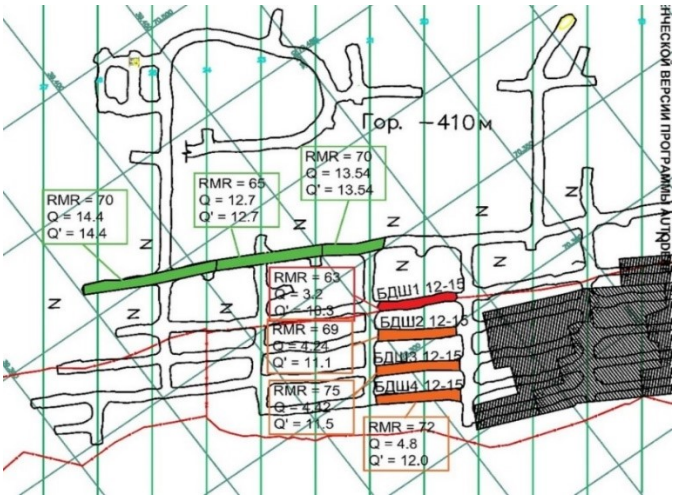


Рис. 5.89. Схема гор. –410 ЦРТ с указанием интервалов выработок и рейтинговых оценок *RMR* (1989), *Q* и *Q*’

По результатам рейтинговой оценки массив пород полевого штрека (ПШ) гор. –410 м ЦРТ имеет высокие показатели качества и находится в устойчивом состоянии. В исследованных интервалах ПШ гор. –410 м ЦРТ пройден в диабазах, предел прочности которых может достигать 200–250 МПа, по большей части имеет хорошо

выраженную блочную структуру с закрытыми либо залеченными кварц-карбонатным заполнителем трещинами. На небольшом интервале ПШ наблюдается начальная стадия разрушения приконтурной части массива кровли в связи с близким расположением фронта очистных работ.

Помимо участка ПШ гор. –410 м ЦРТ, рейтинговая классификация качества массива была выполнена в выработках рудного тела вблизи очистной выемки (БДШ 1–4 в рр. 12–15 гор. –410 м ЦРТ). В БДШ 2–4 массив характеризуется средними показателями качества *Q* в связи с учетом фактора пригрузки со стороны выработанного пространства. Качественная характеристика рудного массива, в котором пройден БДШ 1, изменяется до слабой в связи с пересечением выработкой ослабленной тектонической зоны. В целом массив рудного тела в исследованных интервалах имеет хорошо выраженную блочную структуру, с преимущественно закрытыми трещинами, при этом существенное влияние на устойчивость массива оказывает наличие зеркал скольжения по поверхностям трещин, заполненных серпентинизированным материалом.

Помимо выработок Центрального участка, рейтинговая оценка качества массива была выполнена в выработках Юго-западного участка на гор. –335 м (рис. 5.90) и гор. –355 м (рис. 5.91).

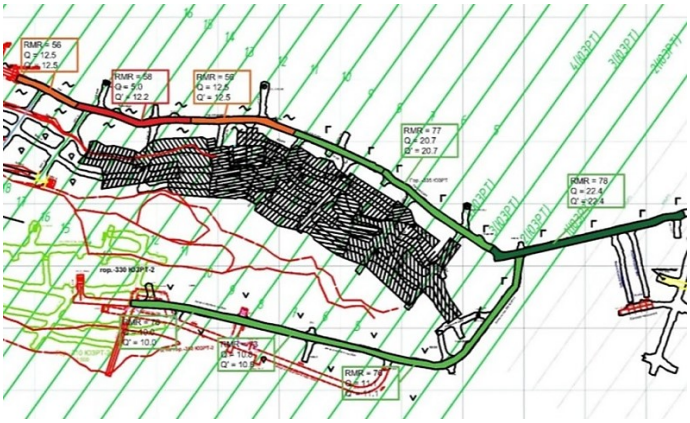


Рис. 5.90. Схема гор. –335 ЮЗРТ с указанием интервалов выработок и рейтинговых оценок RMR (1989), *Q* и *Q*'

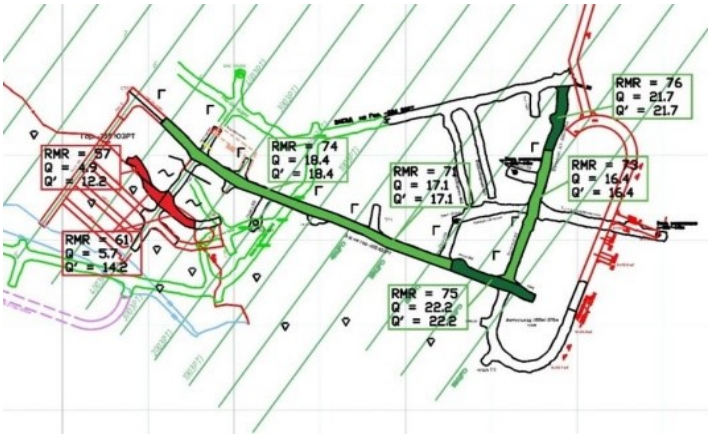


Рис. 5.91. Схема гор. –355 ЮЗРТ с указанием интервалов выработок и рейтинговых оценок RMR (1989), *Q* и *Q*'

Результаты рейтинговой оценки качества массива выработок гор. –335 и –355 м ЮЗРТ отражены в табл. 5.6 и 5.7.

Таблица 5.6

Значения рейтинговых показателей RMR, *Q* и *Q*’
для интервалов выработок гор. –335 м ЮЗРТ

№ интервала	Местонахождение интервала	Значение RMR, качественная характеристика массива	Значение *Q*, качественнаяхарактеристика массива	Значение *Q*’, качественная характеристика массива
1	Заезд на гор. –335 ЮЗРТ	78 Массив качественный	22 Массив качественный	22 Массив качественный
2	ПШ гор. –335 в рр. 3–10	77 Массив качественный	21 Массив качественный	21 Массив качественный
3	ПШ гор. –335 в рр. 10–13	56 Массив среднего качества	13 Массив качественный	13 Массив качественный
4	ПШ гор. –335 в рр. 13–17	58 Массив среднего качества	5 Массив среднего качества	12 Массив качественный
5	ПШ гор. –335 в рр. 17–20	56 Массив среднего качества	13 Массив качественный	13 Массив качественный
6	Заезд на гор. –330 м ЮЗПШ в рр. 2–5	78 Массив качественный	11 Массив качественный	11 Массив качественный
7	Заезд на гор. –330 м ЮЗПШ в рр. 5–8	73 Массив качественный	11 Массив качественный	11 Массив качественный
8	Заезд на гор. –330 м ЮЗПШ в рр. 8–11	76 Массив качественный	10 Массив качественный	10 Массив качественный

Таблица 5.7

Значения рейтинговых показателей RMR, *Q* и *Q*’
для интервалов выработок гор. –355 м ЮЗРТ

№ интервала	Местонахождение интервала	Значение RMR, качественная характеристика массива	Значение *Q*, качественная характеристика массива	Значение *Q’*, качественная характеристика массива
1	Заезд на гор. –355 ЮЗРТ	76 Массив качественный	22 Массив качественный	22 Массив качественный
2	Заезд на гор. –355 ЮЗРТ	73 Массив качественный	16 Массив качественный	16 Массив качественный
3	ПШ гор. –355 в рр. 36–38 (ЦРТ)	75 Массив качественный	22 Массив качественный	22 Массив качественный
4	ПШ гор. –355 в рр. 38 (ЦРТ) — 5 (ЮЗРТ)	74 Массив качественный	18 Массив качественный	18 Массив качественный
5	БДШ 1 гор. –355 в рр. 4–5	57 Массив среднего качества	5 Массив среднего качества	12 Массив качественный
6	БДШ 1 гор. –355 в рр. 3–4	61 Массив качественный	6 Массив среднего качества	14 Массив качественный

В результате геотехнического картирования выработок ЮЗРТ и ЮЗРТ 2 гор. –335 м было определено, что в целом массив относится к категории качественных, за исключением некоторых интервалов ПШ гор. –335 м, находящихся в зоне влияния очистных работ. В этих интервалах приконтурная часть массива разрушена в кровле в результате вывалообразования. Полевой штрек гор. –335 м ЮЗРТ в разрезах 10–20 представлен туфогенными метаосадочными породами,

структура которых характеризуются ритмичным переслаиванием и мелкой трещиноватостью, что понижает значение *Q*.

По заезду и в ПШ ЮЗРТ до разреза 10 гор. –335 м массив представлен габбро, крупноблочным, монолитным. Трещины закрыты либо заполнены кварц-карбонатным материалом.

Заезд на гор. –330 м ЮЗРТ-2 пройден в забалансовых перидотитах, крупноблочных по поверхностям неоднородностей, могут наблюдаться зеркала скольжения по заполнителю — хлорит-серпентину. Массив на этом участке находится в устойчивом состоянии, качество массива можно характеризовать как хорошее.

На гор. –355 м ЮЗРТ с использованием рейтинговых оценок качества массива исследованы основные подготовительные и нарезные выработки. Заезд на гор. –355 м и исследованная часть полевого штрека пройдены в габбро, крупноблочном. Массив плотно упакован, трещины закрытые либо заполнены кварц-карбонатным материалом. На данных участках массив характеризуется высокими показателями качества.

БДШ 1 в районе р. 4 представлен двумя типами породных разностей: рудным перидотитом и туфогенно-осадочными породами. Помимо того, данные выработки пересекает ослабленная зона тектонического контакта, представленная рудной брекчией. БДШ 1 непосредственно примыкает к границе ведения очистных работ и находится в зоне опорного давления. Перечисленные факторы понижают качество массива в БДШ 1 до среднего.

Таким образом, для оценки качества геологической среды в незакрепленных выработках Ждановского месторождения было выполнено исследование качества массива методом рейтинговой классификации с выделением геомеханических разностей. Оценка качества массива проводилась по двум системам рейтинговых классификаций: *Q*-system (система Н. Бартона) и RMR-system (система З. Бенявского, 1989). В результате исследования были выделены участки выработок с различными рейтинговыми показателями качества массива и, соответственно, характеристиками его качества. В 2021 г. были исследованы незакрепленные набрызг-бетоном выработки Центрального и Юго-Западного участков.

Качество массива на разных участках изменяется от хорошего до слабого. Массивы со слабыми показателями качества в основном приурочены к зонам, на которые особое влияние оказывают особенности распределения напряжений, способствующие деформации стенок и кровли выработок, в наибольшей степени в выработках, представленных туфогенными метаосадочными породами. Помимо того, уменьшение качества массива происходит на участках выработок, пересекающих ослабленную зону контакта лежачего бока рудных тел с вмещающим массивом.

5.4. Развитие методов обеспечения безопасного ведения открытых горных работ на основе накопленной геомеханической информации

5.4.1. Определение уровня геомеханического риска потери устойчивости элементами открытой геотехнологии

По итогам районирования по видам и уровням геомеханического риска возможного проявления опасных факторов потери устойчивости составляется и периодически обновляется план опасных участков в пределах карьера.

На план наносятся зоны возможного проявления геомеханических рисков с выделением опасных факторов и уровней рисков. Геомеханическая служба предприятия

должна проводить периодические регулярные осмотры выявленных зон с использованием как визуального, так и инструментальных методов исследований прибортового массива пород, что возможно с привлечением специализированных организаций.

На рис. 5.92 схематично показаны потенциальные опасности нарушения устойчивости прибортового массива пород на различном масштабном уровне.

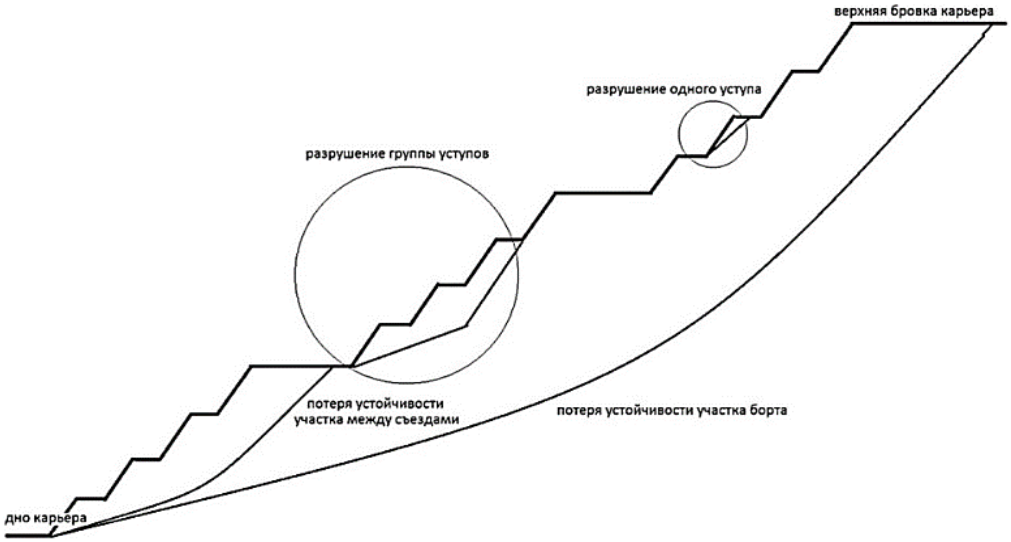


Рис. 5.92. Потенциальные опасности нарушения устойчивости прибортового массива пород на различном масштабном уровне

Анализ потенциальных рисков потери устойчивости должен состоять из следующих этапов:

— определение вероятности (частоты возникновения) потери устойчивости элемента открытой геотехнологии;

— оценка последствий (вероятного ущерба) потери устойчивости;

— обобщение оценок и определение уровня риска.

Вероятность риска может быть оценена как на основе экспертной оценки, так и по результатам количественного анализа по фактическим данным о частоте события.

На рис. 5.93 в качестве примера районирования карьерного поля приведена схема расположения зон распространения деформаций в пределах карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК».

Последствия (возможный ущерб) в первом приближении может быть оценен качественно.

Уровень риска (от очень большого до малого) определяется исходя из рассмотрения совокупности вероятности потери устойчивости элемента открытой геотехнологии и возможного ущерба (табл. 5.8).

Меры реагирования в соответствии с уровнем риска (табл. 5.8) могут варьироваться следующим образом. При очень большом уровне риска — немедленная остановка работ на опасном участке, немедленный вывод рабочего персонала, проведение дополнительных исследований и на их основе разработка оперативных мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня. При большом уровне риска — приостановка работ

на данном участке, вывод людей и техники, определение границ опасной зоны, проведение анализа ситуации и разработка оперативных мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня. При среднем уровне риска — экспертное (комиссионное) решение о необходимости приостановки работ, проведение анализа ситуации и разработка долгосрочных мероприятий по снижению риска до приемлемого уровня. При малом уровне риска ситуация должна находиться под контролем.

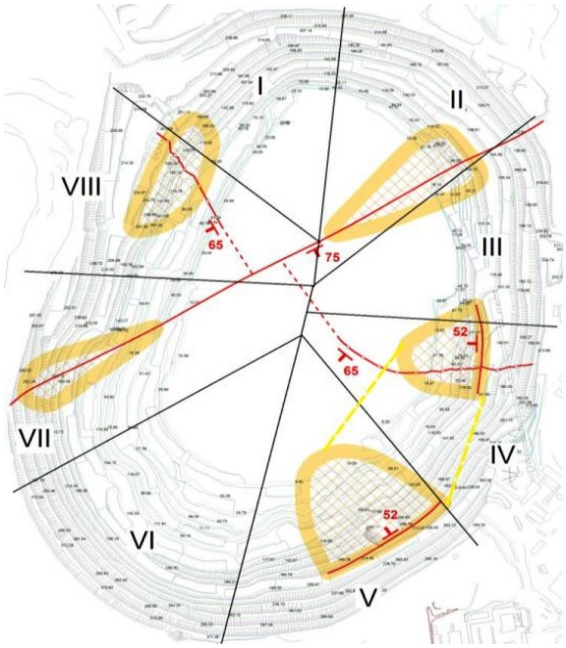


Рис. 5.93. Схема расположения зон распространения деформаций (выделено желтым цветом) и основных разрывных нарушений (выделено красным цветом); римские цифры — номера инженерно-геологических секторов (ИГС)

Таблица 5.8

Определение уровня риска

Ущерб	Вероятность		
	высокая	средняя	низкая
Высокий	Очень большой	Большой	Большой
Средний	Большой	Средний	Средний
Низкий	Средний	Средний	Малый

Управление устойчивостью элементов открытой геотехнологии базируется на качественной или количественной оценке риска обрушения (табл. 5.8).

Снижение вероятности обрушения достигается повышением достоверности исходных данных, детализацией расчетных моделей с вовлечением в них достаточного для достоверной оценки устойчивости числа влияющих факторов, применением щадящей технологии формирования уступов, организацией системы геомеханического мониторинга, изменением конфигурации карьерных откосов в горизонтальной и вертикальной плоскостях, уменьшением обводненности массива пород, укреплением отдельных уступов или групп уступов [176].

Негативные последствия от потери устойчивости элементами открытой геотехнологии зависят от местоположения внутрикарьерной инфраструктуры, съездов

и рабочих площадок и масштаба деформаций. Влияние негативных последствий потери устойчивости откосов уменьшается применением специальных мероприятий по управлению устойчивостью (компенсационно-стабилизирующие и укрепительные мероприятия, снижение влияния подземных и поверхностных вод на устойчивость бортов и уступов карьеров и т. п.) [65, 177].

Вопросам организации геомеханического мониторинга при разработке месторождений открытым способом посвящена глава 2 настоящей монографии.

5.4.2. Мероприятия по управлению устойчивостью элементов открытой геотехнологии

Применяемые мероприятия по управлению устойчивостью элементов открытой геотехнологии можно разделить на компенсационно-стабилизирующие и укрепление карьерных откосов [178, 179].

Компенсационно-стабилизирующие мероприятия. Их основной целью является, с одной стороны, формирование компенсационных пространств (площадок), заграждений, ограничений для расположения или задержки в их пределах разрушенных породных масс, образовавшихся при реализации вывалов, заколов и других разрушений вследствие потери устойчивости, а с другой стороны, — стабилизация процесса потери устойчивости в том, чтобы обеспечить возможность безопасного продолжения ведения горных работ открытым способом. Можно выделить следующие несколько видов компенсационно-стабилизирующих мероприятий.

Формирование увеличенной бермы безопасности применяется при риске развития деформаций на участках расположения инфраструктуры, а также при наличии высоких групп уступов между транспортными съездами. Широкая берма обычно проектируется двойной ширины от обычной бермы и составляет порядка 20–25 м или более.

Проходка резервного транспортного съезда применяется при риске повреждения основного транспортного съезда.

Установка защитных сооружений против лавин, селей, природных обвалов применяется при ведении горных работ открытым способом в горной местности и включают в себя организацию водоулавливающих, водоотводных канав в верхних участках рельефа для снижения попадания вод в карьерную выемку; обработку снежных карнизов техникой, а также организацию контролируемого схода лавин при помощи систем активного воздействия. Из пассивных средств защиты применяются лавинорезы, которые представляют собой клинообразные в плане конструкции, направленные острием против движения лавины, снегоудерживающие и селеудерживающие барьеры и сетки. Наиболее целесообразно размещение объектов в зонах зарождения лавин.

Оборка заколов на уступах может осуществляться механизированными способами и вручную. Ручная оборка допускается при малых объемах работ, когда применение механизированных средств затруднено или невозможно. Для механизированной оборки и приведения откосов в безопасное состояние могут использоваться устройства гравитационного действия (различного вида якоря, барабаны, катки, цепи), подвешиваемые к экскаваторам, бульдозерам, автокранам, трубоукладчикам, экскаваторы с удлиненной стрелой и специальной насадкой, планировщики, гидроподъемники, средства

гидромеханизации. В случае использования гидромеханизации для оборки откосов необходимо предусматривать меры, обеспечивающие сохранность поверхности откосов и массива от разрушения под воздействием воды. Высокая эффективность по снижению уровня камнепада создается применением заколооборочных машин, а также с использованием экскаватора.

Применение специальных мероприятий при работе в опасных зонах применяется для особой организации работ в опасной зоне, если в ней имеются геомеханические риски (проведение инструктажей, повышение квалификации работников в области геомеханических рисков, проведение периодических инспекций). При риске камнепада необходимо установить границу безопасной дистанции от основания откоса для персонала и горной техники. При выполнении работ в непосредственной близости к бровке откоса, например, при зачистке берм или оборке заколов, рекомендуется организация технологических схем таким образом, чтобы кабина горной техники располагалась в противоположную сторону от откоса, во избежание неблагоприятных последствий. Также к специальному мероприятию при работе в опасных зонах можно отнести ведение горных работ только в период отрицательных температур. Такой порядок работы применяется при риске возникновения деформаций в результате снижения прочности массива в условиях его оттайки. Данное мероприятие хорошо зарекомендовало себя, в частности, при необходимости выполнения исследовательских работ по доизучению геомеханического состояния массива пород в условиях повышенной опасности.

Укрепление карьерных откосов. Укрепление карьерных откосов можно разделить на глубинное и поверхностное. Глубинное укрепление, к которому относится установка железобетонных свай, анкерного крепления, тросовых тяжей, цементация участков массива пород в окрестности отдельных уступов, направлено на повышение прочности и устойчивости всего объема укрепляемого участка приоткосного массива пород. Поверхностное укрепление, к которому относится нанесение торкрет-бетона и покрытие откоса металлической или полимерной сеткой, направлено на укрепление поверхности откоса и недопущение осыпей и камнепадов, т. е. явлений поверхностных.

Установка железобетонных свай, анкерного крепления, тросовых тяжей применяется для крепления карьерных уступов, сформированных в массивах скальных крупноблочных пород в соответствии со специальным проектом укрепления.

Цементация участков массива пород в окрестности отдельных уступов применяется для устранения деформаций и разрушений в виде осыпей и вывалов. Металлическую сетку крепят к откосу короткими анкерами. При этом применяются переносные лестницы, гидроподъемники, подъемные краны, приглашаются организации, специализирующиеся в области промышленного альпинизма.

Нанесение торкрет-бетона применяется для предотвращения деформаций в скальных и полускальных породах, склонных к выветриванию. Торкрет-бетон представляет собой водяную смесь цемента и мелкого заполнителя, наносимую на поверхность породы. Толщина покрытия определяется параметрами уступа (прежде всего его высотой) и сроком службы. Для получения необходимой прочности торкрет-бетона рекомендуется применять марки цементов не ниже 400. Для ускорения сроков схватывания цемента в состав смеси вводят добавки — ускорителя твердения. Работы проводятся

в следующем порядке. Перед торкретированием производят оборку откоса и смыв водой с его поверхности мелких фракций горных пород. Затем в специальной емкости приготавливают раствор, который наносят на поверхность откоса с помощью бетономашин различного типа.

Покрытие откоса металлической или полимерной сеткой. Сетка крепится наверху анкерами, внизу она может оставаться незакрепленной. Ее необходимо расположить как можно ближе к неустойчивой зоне. Незакрепленная нижняя часть сетки позволяет обломкам породы перемещаться к подошве, не скапливаясь за сеткой.

В настоящее время мероприятия по управлению устойчивостью элементов открытой геотехнологии на карьерах РФ имеют ограниченное применение. В решении вопроса продления срока открытых горных работ предприятия предпочитают идти путем разноски бортов карьеров. В данной ситуации перспективным видится путь сопоставления технико-экономических оценок применения укрепительных мероприятий и затрат на расширение карьеров за счет разноски его борта.

5.5. Развитие методических основ управления НДС и локализации опасных зон в геологической среде ГТС и экспертной системы оценки удароопасности для обеспечения безопасности горных работ

В настоящее время в мире наблюдается устойчивая тенденция к увеличению глубины ведения горных работ. Разработка месторождений полезных ископаемых на больших глубинах неизбежно влечет за собой ухудшение геомеханических условий, связанное в первую очередь с увеличением уровня действующих напряжений [180–183]. Особенно остро эта проблема встает перед горнопромышленными предприятиями, осуществляющими горные работы на месторождениях с гравитационно-тектоническим типом НДС, представленных прочными скальными породами, склонными к хрупкому разрушению. Техногенное воздействие на массив на таких месторождениях сопровождается повышением уровня сейсмической активности и проявлениями горного давления в динамической форме [184–185].

В сложившихся условиях от горных предприятий, отрабатывающих месторождения, склонные и опасные по горным ударам, идет запрос на программные комплексы, которые позволяли бы оперативно оценить текущую и прогнозную геомеханическую ситуацию силами ИТР рудника, сравнить возможные варианты развития горных работ по уровню концентрации сжимающих напряжений, наличию зон критического уровня растягивающих напряжений.

Несмотря на то, что разработку месторождений на современном этапе сложно представить без ГГИС, которые формируют цифровое пространство предприятия и являются основой для интеграции прикладных решений в области горной технологии, решение геомеханических задач в них отражено в наименьшей степени. Особенно это касается задач прогноза трансформации исходного поля напряжений по мере выемки запасов полезного ископаемого. Существует целый ряд специализированных программных комплексов, позволяющих моделировать НДС: Ansys, Abaqus,

Code_Aster и др. Круг решаемых ими задач очень широк, что, с одной стороны, является безусловным плюсом, но, с другой стороны, требует высокой квалификации сотрудников, существенного времени обучения и потенциальной возможности получения результатов, не отражающих адекватно основные закономерности распределения напряжений для конкретного участка геологической среды. Сложности геомеханического обоснования горных работ и прогноза НДС на горных предприятиях могут быть обусловлены:

— недостаточностью и недостоверностью исходной информации о параметрах НДС и свойствах массива горных пород месторождений;

— несоответствием применяемых моделей массива горных пород и моделей его разрушения поведению реального массива;

— отсутствием или недостаточностью соответствующих подразделений и кадров;

— необходимостью обоснования отклонений от проектных решений;

— неоднозначностью выбора граничных условий, масштаба модели для решения конкретной задачи;

— отсутствием взаимной увязки разрабатываемых геомеханических моделей, их привязки к рудничной системе координат и объектам горной технологии.

Поэтому целью отдела геомеханики Горного института КНЦ РАН являлась разработка системы геомеханического прогноза и соответствующего программного обеспечения, которое было бы адаптировано для проведения регулярных прогнозных расчетов НДС и получения рекомендаций по безопасному ведению горных работ непосредственно на горном предприятии. Программный комплекс Sigma GT внедрен на ряде российских горнодобывающих предприятий: КФ АО «Апатит» ПАО «Фосагро», АО «СЗФК», ПАО «Акрон», АО «Кольская ГМК», ПАО «ГМК “Норильский никель”»; ПАО «ППГХО», АО «Росатом».

Применение данной системы прогноза геомеханической ситуации непосредственно на горных предприятиях в течение более 10 лет показало их высокую эффективность, связанную прежде всего с оперативностью проведения расчетов и анализа НДС при обострениях геодинамической ситуации; возможностью выбора наиболее безопасного варианта горных работ по уровню проявлений горного давления; выдачи карт прогнозных категорий горных выработок и соответствующих рекомендаций по их креплению и проведению разгрузочных мероприятий. Система Sigma GT используется также при годовом и долгосрочном планировании горных работ [109, 167] с выдачей карт распределения напряжений на подэтажах, горизонтах, разрезах, привязанных к рудничной сетке координат, элементам горной технологии и геологическим структурам (рис. 5.94).

Изначально подобные системы разрабатывались для отдельных удароопасных блоков, и время их эффективной работы ограничивалось периодом 3–5 лет, т. е. временем отработки блока. В дальнейшем, учитывая возрастающие потребности предприятий, системы стали включать месторождение или даже несколько месторождений, на которых горные работы ведутся в зоне взаимного влияния. В процессе применения происходит постоянное развитие и модернизация систем, их адаптация к конкретным условиям и задачам горного предприятия.

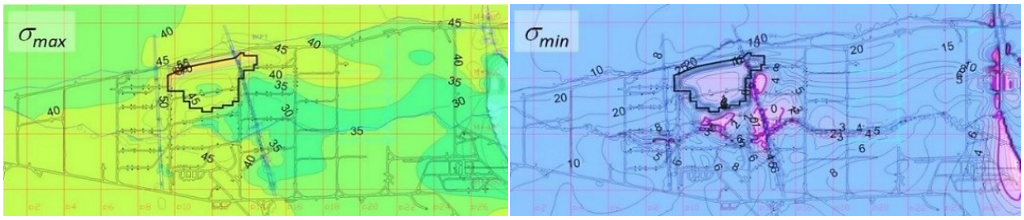


Рис. 5.94. Пример прогнозной карты геомеханической ситуации при развитии подземных горных работ. Распределение напряжений на откаточном горизонте, совмещенное с рудничным планом

Общая методология геомеханического прогноза с использованием программного комплекса Sigma GT

В основе прогноза НДС участка массива пород лежит методика последовательных приближений, в соответствии с которой первоначально осуществляется постановка и решение ряда трехмерных мелкомасштабных задач, отражающих основные горно-геологические и горно-технологические особенности моделируемого пространства.

На *первом этапе (мелкомасштабное моделирование)* проводится:

— определение параметров мелкомасштабной расчетной области, соответствующих литологическому блоку;

— разработка инженерно-геологической и численной модели;

— обоснование граничных условий и последовательности решения ряда трехмерных задач механики горных пород для определения основных факторов, влияющих на закономерности формирования первичного поля напряжений в массиве горных пород, вмещающем месторождения полезного ископаемого;

— сопоставление результатов расчетов с данными других (прямых или косвенных) методов оценки исходного напряженного состояния массива;

— изучение закономерностей формирования вторичного поля напряжений в окрестности ранее отработанных и проектируемых к отработке очистных пространств рудников, входящих в область моделирования;

— проведение при необходимости корректировки модели и повтор расчетов.

Второй этап (крупномасштабное моделирование) включает в себя:

— определение области влияния максимально достигаемых объемов отработанных пустот как подземным, так и открытым способом при сравнении соответствующих вариантов мелкомасштабного моделирования;

— определение размеров следующей расчетной области;

— задание на ее границах узловых перемещений, полученных интерполяцией данных предыдущего этапа;

— проведение тестовых расчетов для моделирования последовательной выемки запасов;

— установка ПК Sigma GT с разработанной моделью на компьютеры горного предприятия;

— анализ расчетных данных и определение безопасных параметров систем разработки, применяемых или планируемых к применению на месторождении.

При необходимости более детальных расчетов возможно автоматизированное формирование новых моделей участков со сгущением сетки конечных элементов в любой из трех плоскостей и заданием граничных перемещений из модели второго этапа.

На *третьем этапе* проводят уточненный расчет НДС в окрестности отдельных элементов горной технологии (рис. 5.95), например, одиночных выработок, их сопряжений и систем, с учетом поля напряжений, сформировавшегося при определенной геометрии очистных пространств путем задания граничных перемещений из соответствующего варианта развития очистных выемок. Для этих целей разрабатывается библиотека типовых локальных моделей конкретного горного предприятия. Далее имитируется поэтапная проходка выработки, проведение разгрузочных мероприятий, крепление. Таким образом, в крупномасштабных расчетных схемах второго и третьего этапов оказываются учтенными основные геологические и горнотехнические факторы, влияющие на напряженное состояние массива пород.

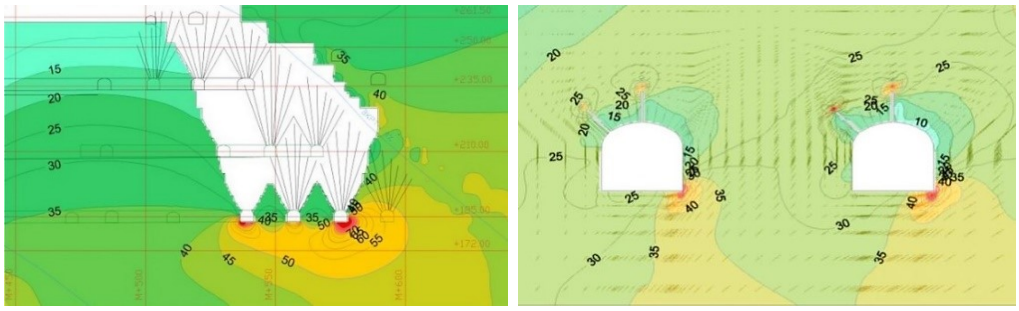


Рис. 5.95. Результаты уточненных расчетов НДС в окрестности отдельных элементов горной технологии

Первый этап моделирования, а также обоснование граничных условий и генерация моделей второго этапа, их калибровка проводятся специалистами отдела геомеханики Горного института КНЦ РАН. Далее программное обеспечение вместе с комплексом моделей устанавливаются на компьютеры предприятия, после чего все расчеты и локальное моделирование выполняют непосредственно ИТР рудника. В большинстве случаев это сотрудники служб прогноза и предупреждения горных ударов, которые проходят необходимое обучение и имеют подробные инструкции по работе с системой геомеханического прогноза.

Определение безопасных параметров отработки месторождений в сложных геологических и горнотехнических условиях

В качестве примера реализации предложенного подхода рассмотрим НДС массива пород в пределах участка Хибинской апатитовой дуги, где в зоне взаимного влияния ведутся открытые и подземные горные работы.

Для геомеханического обоснования порядка очистных работ и прогноза зон повышенной удароопасности на отрабатываемых и планируемых к отработке горизонтах Кировского рудника была разработана трехмерная геомеханическая модель, которая включает в себя Кукисвумчоррское и Юкспорское месторождения (рис. 5.96).

Система геомеханического прогноза на основе такой модели позволила, в частности, определить оптимальный порядок горных работ, местоположение и размеры блоков-целиков и стыковочных секций, а также параметры региональных защитных мероприятий при отработке запасов гор. +170 м Кировского рудника в условиях взаимного влияния и последующей стыковки трех очистных выемок: подземных — Юкспорской, Кукисвумчоррской и открытой — Саамского карьера,

с дополнительным, осложняющим ведение горных работ фактором — мощной геодинамически активной структурой Саамский разлом.

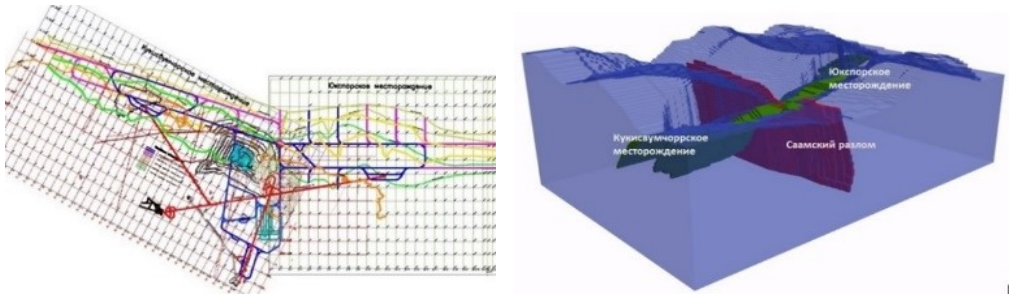


Рис. 5.96. Совмещенный план горных работ и объемный вид конечно-элементной модели Кировского рудника

Предложен порядок ведения горных работ на каждом подэтаже, учитывающий необходимость минимизации проходки выработок в теле Саамского разлома и предполагающий отбойку массовыми взрывами как стыковочных секций, расположенных на верхнем подэтаже по обе стороны от Саамского карьера, так и определенной части запасов висячего бока в районе Саамского разлома на нижних подэтажах с последующей отбойкой стыковочных секций на Кукисвумчоррском месторождении. Уточнены параметры трансформации НДС в зоне отработки прибортовых запасов при применении этажной системы с траншейным днищем (рис. 5.97).

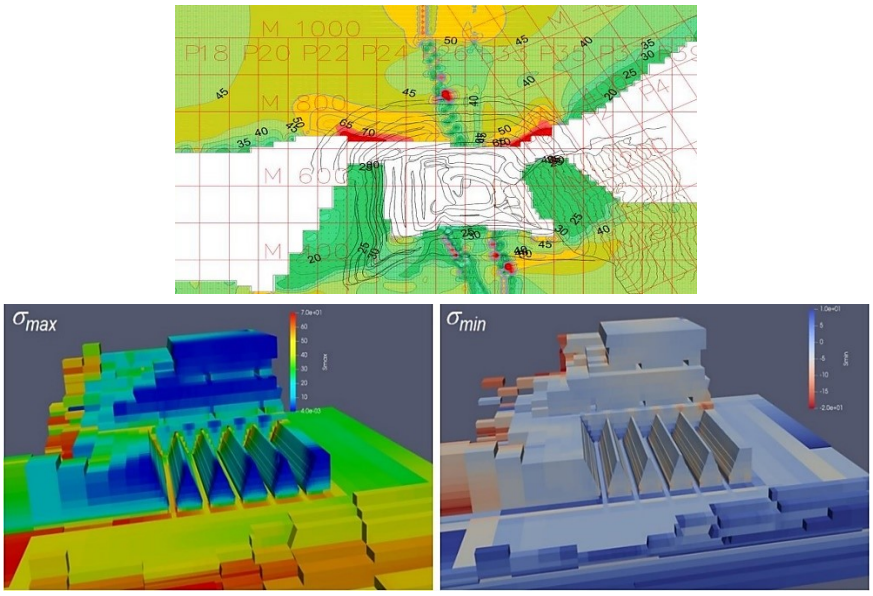


Рис. 5.97. Распределение напряжений в зоне стыковки подземных горных работ Кукисвумчоррского и Юкспорского месторождений с Саамским карьером

Представленная модель с набором локальных моделей элементов горной технологии используется на руднике более 2 лет и требует минимального сопровождения со стороны научной организации, заключающегося в периодическом (раз в полгода) сопоставлении результатов расчетов с данными визуального осмотра

горных выработок и новыми натурными измерениями параметров поля напряжений. При необходимости проводится корректировка граничных условий.

Работники предприятия, с учетом прогнозного моделирования геомеханической ситуации, выявляют потенциально опасные зоны концентрации напряжений; разрабатывают региональные и локальные мероприятия по разгрузке массива горных пород, проводят уточненные расчеты НДС в окрестности элементов горной технологии; формируют карты категорий состояния горных выработок. Реализован экспорт расчетных данных в ГГИС MineScape.

Концепция организации геомеханического прогноза на основе иерархичной системы взаимосвязанных моделей

Дальнейшее развитие горных работ в пределах Хибинской апатитовой дуги и других рудных полей предопределяет сближение открытых и подземных очистных пространств и необходимость ведения горных работ в условиях взаимного влияния [186]. Поэтому ситуация, рассмотренная в предыдущем параграфе, может складываться на нескольких участках одновременно. Именно эти участки требуют особенно детального прогноза геомеханической и геодинамической ситуации при выборе оптимального варианта технологии отработки запасов и ее параметров.

По мнению авторов, учет взаимного влияния при развитии горных работ на сближенных месторождениях возможно обеспечить путем создания иерархичной системы взаимосвязанных объемных конечно-элементных моделей. На рис. 5.98 приведен схематичный пример подобной системы для Кировского рудника.



Рис. 5.98. Схема иерархичной системы взаимосвязанных объемных моделей Кировского рудника

Особенностью такой системы является моделирование НДС массива в условиях конкретного месторождения (участка) с автоматическими изменениями на соседних участках и в общей мелкомасштабной модели I уровня. То есть для пользователя это будет означать сокращение объемов и времени редактирования варианта, сокращение времени счета. Пользователь может после входа в систему выбрать наиболее удобный для внесения изменений конфигурации участок, а система сама решит, в каких моделях должны отразиться данные изменения с точки зрения влияния на НДС массива.

Причем каждая из моделей II уровня (Кукисвумчорр, Юкспор, участки Саамский и Гакман) может иметь неограниченное количество подмоделей различной детальности, формирующихся автоматически как путем «вырезания» и сгущения сетки конечных элементов, так и путем использования библиотеки моделей элементов горной технологии.

Описанный подход позволит:

— использовать планы горных работ для каждого из участков, работая в локальной системе координат;

— прогнозировать влияние развития (изменения конфигурации) горных работ на соседних месторождениях;

— уменьшить размер решаемых задач за счет расчета для отдельных крупномасштабных моделей и учета изменений НДС во всей системе;

— учесть смежные области, в частности, зону Саамского разлома;

— получить полную картину распределения полей напряжений для всех месторождений системы в каждом расчетном варианте.

Направления развития системы геомеханического прогноза Sigma GT

В процессе использования происходит постоянное развитие и модернизация системы, ее адаптация к конкретным условиям и задачам. Основными направлениями дальнейшего развития системы геомеханического прогноза являются:

1) модернизация блока расчета и интерпретации касательных напряжений с разработкой интерфейса для визуализации участков с критическими параметрами площадок сдвига вблизи структурных нарушений;

2) дополнение алгоритмов расчета НДС контакт-элементами для более адекватного учета особенностей деформирования массива на границах неоднородностей;

3) разработка модуля прогноза обрушения подработанного массива с выделением потенциальных областей частичного и полного обрушения налегающей толщи;

4) разработка модуля расчета НДС массива в блоках с возможностью автоматизированной проходки выработок;

5) расширение библиотеки локальных моделей элементов горной технологии и инструментов работы с ними;

6) развитие трехмерного представления расчетных полей напряжений в блочном и векторном виде в среде приложения Sigma GT.

Процесс эксплуатации месторождения сопровождается резким увеличением объема цифровой информации, которая отражает текущее состояние производства и используется для планирования и управления горными работами [187].

При этом современные ГГИС включают цифровые модели горно-геологических и горно-технологических объектов, несущие информацию об их геометрии, технологических свойствах. Существует также опыт дополнения этих данных физико-механическими свойствами и параметрами напряженного состояния массива [188]. Работа с моделями объектов осуществляется средствами геоинформационной системы, реализующей инструменты хранения и обработки пространственно распределенной информации, ее визуализации в удобном для анализа виде. Важным условием повышения обоснованности принимаемых решений является развитие геомеханического блока единой информационной модели горного предприятия на основе баз данных геомеханической и геодинамической информации, включающих

параметры НДС массива горных пород по данным натурных определений и численного моделирования, физико-механические свойства и данные о нарушенности массива горных пород, данные регионального и локального мониторинга (рис. 5.99).



Рис. 5.99. Наполнение геомеханического блока единой информационной модели горного предприятия

Комплексирование данных о трансформации поля напряжений и деформаций по мере развития горных работ с данными сейсмического и геофизического мониторинга позволит выйти на новый уровень обоснованности технических решений по развитию и обеспечению безопасности горных работ, а также повысить точность оценки и прогноза геодинамической опасности участков горнотехнических систем.

Мониторинг деформирования всего геоблока, включающего в себя открытые или подземные горные работы в пределах отдельного рудника или, в случае их близкого расположения, нескольких рудников (подземных, открытых, комбинированных), может осуществляться с использованием высокоточной наземной или спутниковой геодезии сейсмическим методом в режиме реального времени (см. глава 2). Результаты, полученные этими высокоточными методами, дают общую картину деформирования и разрушения геоблока и позволяют выявлять крупные зоны повышенных скоростей деформирования и интенсивного разрушения, выражающегося, например, в росте техногенных трещин, высоких скоростей оседания или сдвижения подработанной поверхности. В дальнейшем необходима организация локального контроля устойчивости отдельных выработок, комплексов выработок, уступов или групп уступов в пределах выявленных зон.

Выявление зон локальных нарушений устойчивости может быть осуществлено несколькими методами.

Прежде всего необходимо подчеркнуть важность периодических регулярных визуальных осмотров проблемных участков. При этом визуальный метод, помимо несомненных достоинств, состоящих в оперативности и минимуме применяемых технических средств, обладает некоторыми недостатками, такими, как приблизительность оценки, опасность для операторов, вынужденных находиться в пределах опасных зон. С использованием визуального метода можно дать первоначальную оценку

и классификацию опасных факторов и на этой основе планировать организацию локального инструментального мониторинга.

Методы локального инструментального контроля можно разделить на геодезические измерения традиционными методами с использованием теодолитов, тахеометров и другого классического геодезического инструментария (классическая геодезия) и на геодезические методы, использующие, получившие большое распространение в последнее время, лазерные сканеры и интерферометрические радары (инновационная геодезия). С помощью методов классической и инновационной геодезии можно осуществлять контроль деформирования и разрушения элементов открытой, подземной и комбинированной геотехнологии таких, как группы уступов, участки бортов карьеров (открытые горные работы) или зоны сдвижения/обрушения (подземные и комбинированные горные работы). С применением методов классической и инновационной геодезии можно достаточно точно и достоверно контролировать устойчивость поверхности массива горных пород, находящегося под техногенным воздействием, осуществлять оперативный прогноз параметров зон сдвижений земной поверхности, вывалов, обрушений и тем самым обеспечивать безопасность горных работ. Недостатком геодезических методов является контроль только поверхности массива горных пород, что не позволяет производить мониторинг законтурной глубинной зоны массива, где зарождаются опасные процессы, отражающиеся впоследствии на его поверхности.

В связи с вышесказанным, важное значение в системе мониторинга геомеханического состояния локальных опасных зон имеют скважинные геомеханические методы, такие как метод дискования керна, разрушения стенок скважины, различные варианты метода разгрузки и другие методы, основанные на анализе процесса деформирования и разрушения законтурного массива пород при бурении скважин, а также геофизические методы мониторинга устойчивости, основанные на фиксации параметров физических полей в массиве при техногенном воздействии на него. Здесь можно упомянуть различные варианты сейсмического метода (сейсмическая томография и профилирование), ультразвуковой метод контроля и др.

Наилучший результат мониторинга устойчивости массива пород, находящегося под техногенным воздействием, достигается при комплексном применении широкого диапазона различных методов контроля с соблюдением принципа иерархичности, т. е. от регионального мониторинга всего геоблока, включающего в себя горнодобывающее предприятие со всеми объектами инфраструктуры в целом, к локальному мониторингу отдельных проблемных участков. Комплексность применения большого количества разномасштабных методов контроля возможна на базе организации специальных геомеханических служб. К настоящему времени такие службы организованы и функционируют на большинстве горнодобывающих предприятий, ведущих крупномасштабные горные работы.

Основной задачей любой системы мониторинга окружающей среды является получение объективной информации о состоянии контролируемых объектов, при этом весьма существенным является вопрос своевременности ее получения. С этой точки зрения главным принципом мониторинга должно явиться обеспечение контроля состояния массива в течение всей «жизни» предприятия, начиная с момента

проведения разведки месторождения и инженерных изысканий для выбора площадки строительства и заканчивая погашением выработок и демонтажем оборудования.

Таким образом, в процессе использования системы геомеханического прогноза, основанного на численном моделировании НДС, показана ее эффективность для обоснования оптимальных параметров горных работ и разработки региональных и локальных разгрузочных мероприятий. Определены перспективные направления развития подобных комплексов:

— объединение отдельных разномасштабных геомеханических моделей месторождений и участков месторождения или рудного поля в единую иерархичную систему взаимосвязанных моделей;

— генерация дополнительных моделей участков с перспективным сближением горных работ и взаимным влиянием открытых и подземных очистных выемок;

— развитие библиотеки типовых моделей выемочных блоков и элементов горной технологии для оперативной оценки НДС и удароопасности при фактическом и прогнозном положении горных работ с различной степенью детальности;

— развитие модулей оценки процессов отрыва и сдвига с учетом структурных нарушений;

— комплексирование данных о трансформации поля напряжений и деформаций по мере развития горных работ с данными сейсмического и геофизического мониторинга с выходом на комплексную оценку и прогноз геодинамической опасности участков горнотехнических систем.

Таким образом, в результате выполнения комплексных геомеханических исследований на месторождениях Кольского региона дана оценка устойчивости участков массива горных пород и элементов горной технологии, обоснованы варианты развития горных работ, позволяющие снизить геодинамические риски, предложены варианты разгрузочных мероприятий для обеспечения безопасности горного производства.

Апатит-нефелиновое месторождение Олений ручей

Определены участки проявления удароопасности в динамической форме, которые приурочены преимущественно к динамически активному разлому Р1 и к зоне опорного давления от очистных работ вышележащего горизонта. Наибольшему разрушению подвергаются выработки штрекового направления в блоках, контролируемых лежачим крылом разлома Р1 и частично Р2.

Предложено применение вееров скважин БВР в качестве замерных станций под метод КРС, что обеспечит контроль состояния массива на значительных площадях в сжатые сроки без дополнительных затрат. Данный вариант рекомендуется для оперативной оценки геомеханического состояния массива службой прогноза и предупреждения горных ударов на участках ведения очистных работ.

По результатам 4 этапов сейсмотомографических измерений для участка массива между сближающимися фронтами горных работ на гор. +100 м выявлены зоны прироста и снижения скоростей продольных волн. В целом за период исследований можно констатировать небольшую пригрузку массива.

На основе многовариантных прогнозных расчетов НДС обоснована целесообразность перехода на систему с подэтажным обрушением руды и развития работ от единой разрезки к флангам ниже 0 отметки и осуществление разрезки на подэтажах по разломной структуре Р1. Предлагаемый вариант развития

горных работ позволит минимизировать геомеханические и геодинамические риски, что обеспечит планомерную добычу полезного ископаемого и снизит затраты на разгрузочные мероприятия и крепление горных выработок.

Участок Гакман Юкспорского апатит-нефелинового месторождения

На основе трехмерного моделирования НДС с учетом геологических, геомеханических и горнотехнических факторов определена граница максимального продвижения подземных горных работ к перспективной карьерной выемке — разрез 21+160 м Гакмана. При этом размер блока целика между подземным очистным пространством и бортом карьера составит 240 м.

Определена допустимая по геомеханическим условиям величина защитного угла, формируемого в вертикальной плоскости (по магистрали) фронтом горных работ гор. +320, +250 и +170 м, которая составляет не более 70°.

Кукисвумчоррское апатит-нефелиновое месторождение

Обоснован комплекс мероприятий по снижению геодинамических рисков и защите выработок от действия высоких тектонических напряжений на высоконапряженном участке массива в разрезах 4–7. При разработке мероприятий учтено направление максимальной компоненты сжимающих напряжений σ_{max}. Подтвержден существенный эффект разгрузки массива при создании полостей, перпендикулярных действию σ_{max}. Обоснованы условия максимальной эффективности бурения строчки глубоких скважин с вышележащего горизонта для разгрузки выработок нижележащего. Ведется контроль геомеханического состояния участка массива.

По результатам анализа ситуации в районе Квершлага № 1 ЮВС-2 сделан вывод о том, что интенсивное динамическое заколообразование, наблюдавшееся на участке от северо-западного сопряжения с Посадочной площадкой ЮВС-2 до пересечения зоны трещиноватости, обусловлено высоким уровнем сжимающих напряжений блока, заключенного между серией вертикальных трещин на юго-западе и пологонаклонной зоной трещиноватости на северо-востоке, при приближении к которой наблюдалось усиление внешних признаков удароопасности. Предложен дополнительный контроль качества профилактических мероприятий службой ППГУ, а именно отслеживание соответствия линии заложения строчки с зоной максимальных разрушений на контуре выработки. В выработках категории «Д» контроль должен быть ежедневным.

Ловозерское редкометальное месторождение

На основании анализа данных визуального обследования выработок, инструментального контроля удароопасности и данных сейсмической активности выделены участки с повышенным уровнем удароопасности пласта II-4 «Малиньиты» и I-4 «Уртит», внешние признаки удароопасности Кедыквырпах с постепенным усилением с северо-востока на юго-запад. Наибольшему негативному воздействию горного давления подвержены выработки штрекового направления, особенно в зоне влияния разломных структур.

Ждановское медноникелевое месторождение

Уменьшению общего объема зон с критическими параметрами действующих напряжений способствует отработка запасов месторождения без формирования

блоков-целиков. В случае невозможности выполнения данного условия рекомендовано осуществлять отрезку штреками до сбойки с вышележащим горизонтом при ежесуточном контроле состояния приконтурной части массива, дальнейшую отработку осуществлять с применением ортовой подготовки.

Подвижки, провоцирующие обрушение породы значительных объемов в выработках, происходят по серпентинизированным разломным структурам в лежачем боку рудной залежи, что требует уточнения их положения и вынесения на планы горных работ.

На руднике «Северный» рекомендуется разработка проекта и организация сейсмического мониторинга для выявления геодинамически активных зон, влияющих на изменение конфигурации исходного поля напряжений и являющихся причиной значительных по объему вывалов в выработках лежачего бока.

Показана значимость параметров обрушения подработанной толщи пород как одного из факторов формирования вторичных полей напряжений. Для повышения уровня соответствия модели фактическому полю напряжений желательно получение информации о местоположении бровки обрушения, которую может дать съемка дневной поверхности в зоне подработки массива.

Проведены прогнозные расчеты НДС при создании опережений на Центральном рудном теле Ждановского месторождения: по лежачему боку (фактический вариант), по висячему боку, без опережений. Определены существенные различия в формировании зон концентрации напряжений и разгрузки массива. Наиболее выраженный эффект разгрузки как по площади, так и по абсолютным величинам действующих максимальных сжимающих напряжений проявляется при развитии отбойки с опережением по висячему боку. В этом случае весь массив к лежачему боку от опережения оказывается в защищенной зоне, где значения σ_{max} на 50 % ниже, чем при развитии горных работ без опережений, и на 25 %, чем при развитии с опережением по лежачему боку.

На основе оценки качества массива по двум системам рейтинговых классификаций: *Q*-system (система Н. Бартона) и RMR-system (система З. Бенявского) выделены участки незакрепленных выработок с различными рейтинговыми показателями качества массива Центрального и Юго-западного участков. Качество массива на разных участках изменяется от хорошего до слабого. Массивы со слабыми показателями качества в основном приурочены к зонам, представленным туфогенными метаосадочными породами. Также снижение качества массива происходит на участках выработок, пересекающих ослабленную зону контакта лежачего бока рудных тел с вмещающим массивом.

Если говорить о способах отработки рудных месторождений и возникающих при этом ситуациях, то в целом можно сказать следующее.

Открытые горные работы

В настоящее время на теоретическом уровне разработаны мероприятия по управлению устойчивостью элементов открытой геотехнологии такие, как анкерное крепление, установка железобетонных свай, цементация участков массива пород, нанесение торкрет-бетона, покрытие откосов металлической или полимерной сеткой и др. Данные мероприятия на карьерах РФ имеют ограниченное применение. В решении вопроса продления срока открытых горных работ предприятия предпочитают идти путем разноски бортов карьеров. В данной ситуации перспективным видится путь сопоставления технико-экономических оценок применения укрепительных мероприятий и затрат на расширение карьеров за счет разноски их бортов.

Отработка блоков-целиков

Установлен диапазон критических размеров блоков-целиков и вид зависимости (полином второй степени) уровня максимальных сжимающих напряжений от расстояния между фронтами подземных и открытых горных работ в условиях гравитационно-тектонического поля напряжений на примере ряда месторождений Хибинской апатитовой дуги. Результат получен на основе трехмерного моделирования НДС с учетом геологических, геомеханических и горнотехнических факторов.

Цифровизация

Важным условием повышения обоснованности принимаемых решений по отработке запасов удароопасных месторождений является формирование и развитие геомеханического блока единой информационной модели горного предприятия на основе баз данных геомеханической и геодинамической информации, включающих параметры НДС массива горных пород по данным натурных определений и численного моделирования, физико-механические свойства и данные о нарушенности массива горных пород, данные регионального и локального мониторинга

Экспертные системы

В процессе использования системы геомеханического прогноза, основанного на численном моделировании НДС, показана ее эффективность для обоснования оптимальных параметров горных работ и разработки региональных и локальных разгрузочных мероприятий. Определены перспективные направления развития подобных комплексов:

— объединение отдельных разномасштабных геомеханических моделей месторождений и участков месторождения или рудного поля в единую иерархичную систему взаимосвязанных моделей;

— генерация дополнительных моделей участков с перспективным сближением горных работ и взаимным влиянием открытых и подземных очистных выемок;

— развитие библиотеки типовых моделей выемочных блоков и элементов горной технологии для оперативной оценки НДС и удароопасности при фактическом и прогнозном положении горных работ с различной степенью детальности;

— развитие модулей оценки процессов отрыва и сдвига с учетом структурных нарушений;

— комплексирование данных о трансформации поля напряжений и деформаций по мере развития горных работ с данными сейсмического и геофизического мониторинга с выходом на комплексную оценку и прогноз геодинамической опасности участков горнотехнических систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на широкомасштабные и активные исследования во всех странах с развитой горнодобывающей промышленностью проблема геодинамической безопасности при ведении различного рода горных работ не только остается актуальной, но и приобретает все большую остроту по мере увеличения объемов добычи полезных ископаемых и постоянного усложнения горнотехнических условий, о чем свидетельствуют достаточно мощные геодинамические явления как на отечественных, так и на зарубежных горных предприятиях, приводящие не только к материальным потерям, но и человеческим жертвам. Поэтому значимость исследований, направленных на разработку способов прогноза и профилактики различного рода геодинамических явлений от локальных горных ударов до региональных техногенных землетрясений, постоянно растет.

В монографии отражены важные результаты, полученные коллективом отдела геомеханики за последний период времени. Разработана комплексная база данных и знаний о полях напряжений и проявлениях горного давления в геологической среде горнотехнических систем Кольского полуострова. Предложен метод учета относительных перемещений по поверхности трещин в модельных исследованиях НДС, что дает возможность оценить сдвиговый характер деформаций по границам структурных неоднородностей. Получены новые знания о степени влияния основных геологических и горнотехнических факторов на распределение напряжений в горнотехнических системах Хибинского массива. Установлены закономерности формирования опасных зон в окрестности актуальных элементов горной технологии на рудниках, отрабатывающих месторождения в северо-западной части Арктической зоны РФ с учетом основных структурных неоднородностей и физико-механических свойств горных пород.

Получила дальнейшее развитие методика геодинамического мониторинга геологической среды в горнотехнических системах. Предложен комплекс способов и технических средств выявления зон локальных нарушений устойчивости элементов геотехнологии, который дает возможность выполнять диагностику геомеханического состояния горных пород в статическом и динамическом режимах. Доказана эффективность интерферометрических радарных систем для локального мониторинга устойчивости бортов карьеров, которые позволили установить закономерности развития процессов деформирования и разрушения прибортового массива скальных горных пород Ковдорского месторождения, что стало основой новой системы оповещения персонала при опасных деформациях участков массива в рабочих зонах. Показано преимущество цифрового решения комплексной интеграции экспериментальных данных наблюдений за потенциально опасными объектами в едином информационном пространстве наиболее важных объектов геологической среды, горной технологии и производственной

инфраструктуры. Разработан прообраз программного интерфейса обмена данными между отдельными компонентами комплексной системы геомеханического мониторинга, которая позволяет на основе комплекса геодезических и геофизических методов выявить индикаторы критической энергонасыщенности актуальных участков геологической среды.

Мониторинг сейсмичности на территории Мурманской области показал, что большинство регистрируемых сейсмических событий локализуется в районе горнопромышленных предприятий, это связано в основном с технологическими взрывами. В геологической среде горнотехнических систем ежегодно имеют место техногенные землетрясения. Сейсмическая активность на Хибинских апатитовых и Ковдорском железорудном месторождениях также тесно связана с технологическими взрывами при ведении горных работ, определяющими геомеханическую ситуацию в горнотехнических системах.

Установлена взаимосвязь сейсмичности с сезонными вариациями гидрогеологического режима в районе крупномасштабных горных работ. Получены новые знания о степени влияния основных природных и техногенных факторов на формирование опасных зон в геомеханических пространствах рудников. Усовершенствована методика вероятностного прогноза сейсмической опасности с использованием различных прогностических критериев. Разработаны новые алгоритмы и программные средства совместной 3D-визуализации параметров сейсмичности и НДС горных пород в массиве.

На основе анализа и обобщения опыта разработки рудных месторождений в сложных геомеханических условиях, информации о динамике НДС горных пород в массиве комплексом натурных методов с использованием системы геомеханического прогноза, основанного на численном моделировании НДС массивов пород, обоснованы оптимальные параметры развития горных работ на удароопасных месторождениях Хибинского и Ловозерского массивов, а также безопасной отработки запасов Ждановского месторождения медно-никелевых руд.

В результате обощения данных натурных определений и численного моделирования геомеханической ситуации при различной технологии отработки запасов, а также оценки эффективности мероприятий по разгрузке и упрочнению актуальных элементов геотехнологии получили развитие методические основы управления НДС пород в массиве, локализации и нейтрализации опасных зон в геологической среде горнотехнических систем. На основе комплексных исследований создана информационная база экспертной системы прогноза геомеханической ситуации для обеспечения безопасности горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ловчиков А. В. Сильнейший горно-тектонический удар на подземных рудниках и в шахтах России: рудник «Умбозеро», 17 августа 1999 года (магнитуда m = 5, энергетический класс k = 11,8): монография / А. В. Ловчиков. Апатиты: Издательство Кольского научного центра, 2022. 127 с.
2. Козырев А. А., Савченко С. Н., Мальцев В. А. Разработка методических принципов диагностики тектонических напряжений в верхней части земной коры с целью управления динамическими проявлениями горного давления: препр. Апатиты, 1994. 66 с.
3. Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками / А. А. Козырев, С. Н. Савченко, В. И. Панин [и др.]. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2019. 431 с.
4. Козырев А. А. Определение степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний при одноосном сжатии // А. А. Козырев, Н. Н. Кузнецов, Ю. В. Федотова, А. Н. Шоков // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 41–50.
5. Ставрогин А. Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А. Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня. М.: Недра, 1985. С. 271.
6. Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам: утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 мая 2013 года № 216. — ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016. С. 52.
7. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения) / А. А. Козырев, И. Э. Семенова, В. В. Рыбин [и др.]; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Акционерное общество «Апатит». Апатиты: ООО «Апатит-Медиа», 2016. 112 с.
8. Регламент на разработку системы контроля за состоянием прибортового массива и деформациями бортов, откосов уступов карьера рудника «Железный», поставленных на конечный контур. Выбор и обоснование конструкций наблюдательных станций. Отчет по научно-исследовательской работе по договору № 2299, 2004. Фонды Горного института КНЦ РАН
9. Экспериментальные работы по определению напряженно-деформированного состояния прибортового массива на опытно-промышленных участках борта карьера с вертикальными откосами уступов в слое +40 м – +118 м. Отчет по хозяйственному договору № 2690, 2005. Фонды Горного института КНЦ РАН.
10. Выполнение светодальномерных и GPS-измерений в карьере рудника «Железный» с целью инструментального контроля устойчивости бортов. Отчет по научно-исследовательской работе по договору № 26119, 2014. Фонды Горного института КНЦ РАН.
11. Каспарьян Э. В., Кожуховский А. В., Розанов И. Ю. Опыт организации мониторинга устойчивости бортов и уступов карьера // Горный журнал. Известия ВУЗов. 2015. № 5. С. 67–74;
12. Anatolii Kozyrev, Eduard Kasparian and Ivan Rozanov The integrated geodetic monitoring system of open pit slopes in hard rock massifs. VIII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources» (PCDG 2020) Khabarovsk, Russian Federation, September 8–10, 2020. I. Rasskazov and S. Tkach (Eds.) E3S Web of Conferences Volume 192 (2020).
13. Розанов И. Ю., Завьялов А. А. Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника «Железный» (АО «Ковдорский ГОК»). ГИАБ. 2018. № 7. С. 40–46.

14. Методические рекомендации по применению методов космической геодезии для геомеханического мониторинга скальных массивов горных пород при открытых горных работах / сост. Э. В. Каспарьян и др.; под ред. проф., д. т. н. А. А. Козырева. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. С. 67.
15. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. ГКИНП (ГНТА)-03-010-03. Утверждена Роскартографией 25.12.03. — М., ЦНИИГАиК, 2004.
16. Выполнение геодезических измерений в карьере рудника «Железный» для инструментального контроля устойчивости бортов карьере. Отчет по научно-исследовательской работе по договору № 2693, 2018. Фонды Горного института КНЦ РАН.
17. Исмагилов Р. И., Захаров А. Г., Бадтиев Б. П., Сенин Н. В., Павлович А. А., Свириденко А. С. Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа. Горная промышленность. 2020(3). С. 84–90.
18. DYKE, G.P. Best practice and new technology in open pit mining geotechnics: Geita gold mine, Mali—a case study. World Gold Conference 2009, The Southern African Institute of Mining and Mtallurgy, 2009.
19. Severin E., Eberhardt S., Ngidi A. Stewart Importance of understanding 3-D kinematic controls in the review of displacement monitoring of deep open pits above underground mass mining operations: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009.
20. Reutech (2006 b) MSR 300 Product Brochure, PP. 15–16.
21. Ingegneria Dei Sistemi (2011) IDS — Radar for Mining Applications, Available at: www.mining-technology.com/contractors/exploration/idsingegneria (Accessed 05 October, 2011).
22. Mitri H. and Vennes, I. 2014. Rock Slope Surface Monitoring Technologies with Focus on Ground-Based Synthetic Aperture Radar. Proceedings Mine Planning and Equipment Selection. Switzerland, 2014.
23. Pieraccini M., 2013. Real Beam vs. Synthetic Aperture Radar for Slope Monitoring. Proceedings Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings. Stockholm, Sweden, Aug. 12–15, 2013.
24. Atzeni C., Barla M., Pieraccini F., Antolini A. 2015. Early Warning monitoring of natural and engineered slopes with Ground Based Sythetic Aperture Radar. Roc. Mech. Roc. Eng, vol 48, Issue 1, PP. 235–246, Springer.
25. Farina P., Leoni L., Babboni F., Coppi F., Mayer L., Ricci P. 2011. IBIS-M, Innovative Radar for Monitoring Slopes in Open-Pit Mines. Proceedings, Slope Stability 2011: International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering. Vancouver, Canada (September 18–21, 2011).
26. Farina P., Leoni L., Babboni F., Coppi F., Mayer L., Coli N., Helbawi A. 2012. Monitoring open pit slopes through Slope Monitoring Radar based on Synthetic Aperture Radar. Proceedings RockEng 2012 21st Canadian Rock Mechanics Symposium. Edmonton (AB), Canada. May 5–9, 2012. 6 pp.
27. Farina P., Coli N., Yon R., Eken G., Ketizmen H. 2013. Efficient real time stability monitoring of mine walls: the Çöllolar Mine case study. Proceedings of 23rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey, 16–19 April 2013, Antalya, Turkey.
28. Rozanov I., Zavialov A. (2019) Determination of Critical Deformation and Destruction Parameters of the Zhelezny Open Pit Rock Mass (JSC Kovdorsky GOK) Based on IBIS FM Ground Radar Data. Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham.
29. Жиров Д. В., Рыбин В. В., Климов С. А., Мелихова Г. С., Завьялов А. А. Проведение комплексного инженерно-геологического районирования для обоснования объектов и видов работ по закреплению/стабилизации уступов карьера; ч. I // Инженерная Защита; изд. СПб.: Типография ЛапинЪ, 2014. № 02(02). С. 22–31.

30. Николаева С. Б. Складчатые деформации в позднеплейстоценовых отложениях центральной части Кольского региона и их генезис // Материалы VII Всерос. совещания по изучению четвертичного периода (Апатиты, 12–17 сент. 2011 г.). Апатиты: изд. КНЦ РАН, 2011. С. 113–115.
31. Николаева С. Б. Тропою лешего // Природа. 2012. № 7. С. 26–32.
32. Николаева С. Б., Евзеров В. Я., Петров С. И. Сейсмические проявления в рельефе северо-запада Мурманской области // Научное обеспечение развития технобиосферы Заполярья: база знаний и пакет инновационных предложений (мультимедийный информационный диск) / отв. ред. А.Н. Виноградов. Апатиты: КНЦ РАН, 2007.
33. Николаева С. Б., Евзеров В. Я., Петров С. И. Сейсмичность Фенноскандии в позднем плейстоцене и голоцене // Материалы VI Междунар. сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» (Апатиты, 15–19 августа 2011 г.). Обнинск, ГС РАН, 2011. С. 220–223.
34. Николаева С. Б., Никонов А. А., Шварев С. В. Детальные палеосейсмогеологические исследования на ключевом участке в бортовой зоне впадины оз. Имандра (Европейское Заполярье) — новые подходы и результаты // Материалы совместной междунар. конф. «Геоморфология и палеогеография полярных регионов» симпозиума «Леопольдина» и совещания рабочей группы INQUA Peribaltic. — Санкт-Петербург, СПбГУ, 9–17 сент. 2012 г. / А. И. Жиров, В. Ю. Кузнецов, Д. А. Субетто, Й. Тиде. СПб: изд. СПбГУ, 2012. С. 161–163.
35. Проведение геодезических измерений на геодинамическом полигоне (площадка Кольской АЭС). Итоговый технический отчет в рамках НИОКР № 1/2674 от 28.03.2016 г. «Разработка и корректировка материалов, обосновывающих безопасность в части мониторинга современных движений земной коры». 2018.
36. Геодезические наблюдения на палеосейсмодислокации (сейсмотектоническое ущелье). Итоговый технический отчет в рамках НИОКР № 5/2668 от 07.07.2015 г. «Разработка и корректировка материалов, обосновывающих безопасность эксплуатации энергоблоков АЭС, устранение замечаний, отмеченных в экспертных заключениях в части уточнения параметров сейсмических и сейсмотектонических условий для района и площадки размещения Кольской АЭС». 2017.
37. Попов Е. И., Ребров В. И. Наклономер. АС № 1721438. Опубл. Б. И. 1992. № 11.
38. Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Жиров Д. В., Смагина Ю. Г. Саамский разлом (Хибины) — аномальный характер современных деформаций // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 4. С. 702–707.
39. Kozyrev A. A., Rybin V. V., Konstantinov K. N. Field-Scale Investigations of the Stress Field and the Excavation Damaged Zone Extent, the Kola Peninsula, Russia // Book of Abstracts of 5th Jubilee Balkan Mining Congress,18–21 September 2013, Ohrid, Macedonia, 2013. PP. 359–365.
40. Данилкин А. А., Козырев А. А., Бочаров С. Н., Рыбин В. В. Перспективная концепция развития горных работ на АО «Ковдорский ГОК» // Горный журнал. 2019. № 6. С. 30–34.
41. Епифанова М. В., Федоров С. А., Козырев А. А., Рыбин В. В., Волков Ю. И., Епифанова М. В. Инженерно-геологические аспекты проектирования глубокого карьера Ковдорского ГОКа // Горный журнал. 2007. № 9. С. 30–33.
42. Мельников Н. Н., Козырев А. А., Решетняк С. П., Каспарьян Э. В, Рыбин В. В., Свинин В. С., Рыжков А. Н. Концепция формирования нерабочих бортов глубоких карьеров Кольского Заполярья // Горный журнал. 2004. № 9. С. 45–50.
43. Kozyrev A. A., Kagan M. M., Chernobrov D. S. Results related Pit wall Microseismic Monitoring («Zhelezny» mine, Kovdorsky GOK, JSC). Proceedings of 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in mines. Perm. Mining Institute of RAS. 2013. PP. 501–505.

44. Каспарьян Э. В., Рыбин В. В., Старцев Ю. А. Применение сейсмотомографических исследований для геомеханического мониторинга участка борта карьера // Вестник Кольского научного центра РАН, 2011. № 3. С. 31–34.
45. Konstantinov K., Rybin V., Panin V., Startcev Yu. Geomechanical monitoring of open-pit wall hard rock mass with geophysical research methods // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2016. Book 1. V. II. PP. 435–441.
46. Панин В. И., Рыбин В. В., Константинов К. Н., Старцев Ю. А., Данилкин А. А., Кожуховский А. В. Контроль геомеханической ситуации в борту карьера геофизическими методами // ГИАБ. 2013. № 4. С. 279–285.
47. Рыбин В. В., Калюжный А. С., Константинов К. Н., Старцев Ю. А., Потапов Д. А., Панин В. И. Результаты определения параметров деструкции борта карьера комплексом геофизических методов // ГИАБ. 2015. № 4. С. 113–118.
48. Rybin V. V., Konstantinov K. N., Kalyuzhny A. S. Integrated approach to slope stability estimation in deep open pit mines // Eurasian Mining. 2019. № 2. PP. 23–26.
49. Мухаметкалиев Б. С., Калюжный Е. С., Съедина С. А., Абдибеков Н. К. Геомеханическое обеспечение устойчивости бортов карьера при увеличении глубины отработки // Горный журнал. 2018. № 4. С. 27–32.
50. Нуну С. Исследование проблемы неустойчивости бортов карьеров Британской Колумбии // ФТПРПИ. 2018. № 5. С. 114–123.
51. Туголуков А. В., Мельников Н. Н., Лукичёв С. В., Данилкин А. А., Казачков С. В. Концепция формирования горно-добычного комплекса в средне- и долгосрочной перспективе развития Ковдорского ГОКа // Горный журнал. 2012. № 10. С. 18–23.
52. Кожуховский А. В., Завьялов А. А., Козырев А. А., Серый С. С., Дунаев В. А. Инновационные технологии мониторинга и прогнозирования устойчивости бортов глубокого карьера // Горный журнал. 2012. № 10. С. 29–35.
53. Зотеев В. Г., Зотеев О. В. О необходимости совершенствования нормативно-методической базы по геомеханическому обеспечению открытых горных работ // Горный журнал. 2010. № 1. С. 66–68.
54. Яковлев А. В., Ермаков Н. И. Устойчивость бортов рудных карьеров при действии тектонических напряжений в массиве. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2006. С. 231.
55. Токсаров В. Н., Асанов В. А., Бельтюков Н. Л. Ударцев А. А. Напряженное состояние и трещиноватость массива горных пород Сарбайского карьера // Проблемы недропользования. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2018. № 3. С. 54–60.
56. Руководство по измерению напряжений в массиве скальных пород методом разгрузки (вариант торцевых измерений) / КФ АН СССР., Горн. ин-т; сост.: И. А. Турчанинов, Г. А. Марков, В. И. Иванов. Апатиты, 1970. С. 48.
57. Козырев А. А., Константинов К. Н., Рыбин В. В., Бушков В. К. Экспериментальные определения параметров напряженного состояния прибортового массива пород карьера «Восточный» Олимпиадинского золоторудного месторождения // Проблемы недропользования. 2018. № 3(18). С. 61–69.
58. Rybin V. V., Panin V. I., Kagan M. M., Konstantinov K. N. Geophysical monitoring as an inherent part of the technological process in deep open pits // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. 2018. 1st Edition. Vol. 1. P. 551–556.
59. Фокин В. А., Тарасов Г. Е., Тогунов М. Б., Данилкин А. А., Шитов Ю. А. Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьеров. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. С. 224.
60. Жиров Д. В., Мелихова Г. С., Решетняк С. П., Рыбин В. В., Мелихов М. В. Инженерно-геологическое обоснование решений по закреплению и стабилизации скальных массивов пород в карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S56. С. 164–174.

61. Tsirel S. V., Pavlovich A. A. Problems of the development of methods for geomechanical substantiation of the parameters of open pit walls // Gornyi Zhurnal. 2017. № 7. PP. 39–45.
62. Geomechanical fields and processes: experimental and analytical studies of the formation and development of focal zones of catastrophic events in mining-engineering and natural systems: Volume 1. / [V. N. Oparin, M. A. Zhuravkov, V. P. Potapov, A. A. Kalenitsky et al.]; rep. ed. N. N. Melnikov, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch Institute of Mining [and others]. - Novosibirsk: Publishing House SB RAS, 2018. 549 p.
63. Мельников Н. Н., Козырев А. А., Решетняк С. П., Каспарьян Э. В., Рыбин В. В., Мелик-Гайказов И. В., Свинин В. С., Рыжков А. Н. Концептуальные основы оптимизации конструкции бортов карьеров Кольского полуострова в конечном положении / Горное дело в Арктике. СПб.: Типография Иван Федоров, 2005. С. 2–14.
64. Козырев А. А., Решетняк С. П., Каспарьян Э. В., Рыбин В. В., Кампель Ф. Б. Обоснование рациональной конструкции конечного борта карьера рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 3. С. 243–250.
65. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов»: утв. 13.11.2020 г., рег. № 61603 от 18.12.2020 г. — Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. URL: https://docs.cntd.ru/document/573140211
66. Исмагилов Р. И., Козуб А. В., Бадтиев Б. П., Павлович А. А. Внедрение мониторинга безопасности на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере михайловского ГОКа // Горная Промышленность. 2020. № 1. С. 120–126.
67. Ливинский И. С., Митрофанов А. Ф., Макаров А. Б. Комплексное геомеханическое моделирование: структура, геология, разумная достаточность // Горный журнал. 2017. № 8. С. 51–55.
68. Харисов Т. Ф., Харисова О. Д., Ефремов Е. Ю., Коновалова Ю. П. Исследование устойчивости бортов и уступов карьера Киембаевского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 5. С. 30–39.
69. Yang S., Su L., Zhang C., Li C., Hu B. Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda Formation slope under heavy rainfall. Tumu yu Huanjing Gongcheng Xuebao // Journal of Civil and Environmental Engineering Volume 42, Issue 4, 1 August 2020, Pages 19–27.
70. Kumar V., Himanshu N., Burman, A. Rock Slope Analysis with Nonlinear Hoek–Brown Criterion Incorporating Equivalent Mohr–Coulomb Parameters // Geotechnical and Geological Engineering Volume 37, Issue 6, 1 December 2019. PP. 4741–4757.
71. Mhaske S., Kapoor I., Pathak K., Kayet N. Slope Stability Analysis of the Overburden Dump of Meghahatuburu Iron Ore Mines in Singhbhum Region of India // Springer Series in Geomechanics and Geoengineering 2020. PP. 3591–3605.
72. Наговицын О. В., Лукичев С. В. Горно-геологические информационные системы — История развития и современное состояние: — Апатиты: КНЦ РАН, 2016. С. 196.
73. Об утверждении Классификации запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод. Приказ № 195. Министерство Природных Ресурсов Российской Федерации от 30 июля 2007 г.
74. Отчет по детальной разведке II-го шахтного поля Юкспорского апатитонефелинового месторождения с коренной комплексной переоценкой месторождения в целом по состоянию на 01.01.81 г. Т. 2, папка 3 г. — «Северозапгеология», Кировск, 1980.
75. Krahn J., Price V. E., and Morgenstern, N. R. Slope stability computer program for Morgenstern- Price method of analysis // University of Alberta, Edmonton, Alta. 1971. Vol. 14.
76. SVSlope. 2D Slope Stability Modeling Software. Theory Manual. SoilVision Systems Ltd. 2012. 160 p.
77. Guidelines for Open Pit Slope Design // Editors: John Read, Peter Stacey. — Australia, 2010.

78. Bushira K. M., Gebregiorgis Y. B., Verma R. K., Sheng Z. Cut soil slope stability analysis along National Highway at Wozeka–Gidole Road, Ethiopia Modeling Earth Systems and Environment Volume 4, Issue 2, 1 June 2018. PP. 591–600.
79. Ярг Л. А., Фоменко И. К., Житинская О. М. Оценка факторов, определяющих оптимизацию углов заложения откосов при длительной эксплуатации карьера (на примере Стойленского железорудного месторождения КМА) // Горный журнал. 2018. Т. 2256, № 11. С. 76–81.
80. Дышленко С. Г. Построение корпоративных ГИС на основе банка пространственных данных // Геопрофи. 2010. № 1.
81. Рыбин В. В., Константинов К. Н., Каган М. М., Панасенко И. Г. Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия // Горный журнал. 2020. № 1. С. 53–57.
82. Научные и практические аспекты применения цифровых технологий в горной промышленности / колл. авторов; под науч. ред. С. В. Лукичёва. Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2019. С. 192.
83. Лукичёв С. В., Наговицын О. В. Цифровое моделирование при решении задач открытой и подземной горной технологии // Горный журнал. 2019. № 6. С. 51–55.
84. Лукичев С. В., Наговицын О. В. Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности: прошлое, настоящее, будущее // Горный журнал. 2020. № 9. С. 13–18.
85. Рыбин В. В., Константинов К. Н. Наговицын О. В. Структура комплексной системы мониторинга устойчивости объектов открытых горных работ с применением цифровых технологий // Физико-техническое проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. 2021. № 4. С. 70–77.
86. Web Feature Service Implementation Specification with Corrigendum. Version: 1.1.3 // Open Geospatial Consortium, 2016, URL: http://docs.opengeospatial.org/is/04-094r1/04-094r1.html
87. Отчёт по теме 5-13-0003. Горный институт. Апатиты, 2015.
88. Корчак П. А., Жукова С. А., Меньшиков П. Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» // Горный журнал. 2014. № 10. С. 42–46.
89. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E. & Zhuravleva O. G. Geodynamic Safety of Mining Operations under Rockburst-Hazardous Conditions in the Khibiny Apatite Deposits, Journal of Mining Science, 2018. vol. 54. №. 5. PP. 734–743.
90. Keneti A., Sainsbury B.: Review of published rockburst events and their contributing factors. Engineering Geology, 246. 2018. PP. 361–373.
91. Manchao He, Hongman Xia, Xuena Jia, Weili Gong, Fei Zhao, Kangyuan Liang. Studies on classification, criteria and control of rockbursts // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2012. Vol. 4. Iss. 2. PP. 97–114.
92. Durrheim R. J. 2010. Mitigating the risk of rockbursts in the deep hard rock mines of South Africa: 100 years of research. In Proceedings of the SME Annual meeting and exibit., 21–24 February 2010, Phoenix, Arizona. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, PP. 156–171. Inc.
93. Lovchikov A. The strongest earthquakes and rock burst in Russian ore mines. Palmarium Academic Publishing Forecasting and combating rockbursts, Saarbrucken 2016. PP. 141.
94. Petukhov I. M.: recent developments. Proc.6th congress International Society for Rock Mechanics, Montreal, 1987. Vol. 2, PP. 1207–1210.
95. Srinivasan C., Benady S., Sivakumaz C.: Fluid Seismicity in Kolar Mining Region. In: Dam Safety, including Instrumentation of Dams, Proceedings of Workshop, Thiruvanenthapuram. 2000.
96. Batugin A., Klimanova V.: Assessment of the influence of the depth of flooding of the liquidated mines on the increase of the geodynamic hazard. In: Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in workings, pp. 26–27. Simferopol (2000). (In Russian).
97. Goldbach O. D.: Seismic risks posed by mine flooding. In: Hard rock safe safety conference, 2009. PP. 149–174, Pretoria.

98. Holub K. Rock mass response to the decline in underground coal mining // Journal of Mining Science, 2006. vol. 42. №. 1. PP. 15–26.
99. Gupta H. K., Rastogi B. K. Dams and Earthquakes. Amsterdam-Oxford-New York, 1976.
100. Nikolaev N. I. The first case of induced earthquakes during construction of a hydro-electric power-station in the U.S.S.R., Engineering Geology, 1974. vol. 8. №. 1–2. PP. 107–108.
101. Hainzl S., Kraft T., Wassermann J., Igel H., & Schmedes, E. Evidence for rainfall-triggered earthquake activity. Geophysical Research Letters, 2006. 33(19).
102. Muço B. The atmospheric water as a triggering factor for earthquakes in the central Virginia seismic zone // Natural Hazards, 2014. vol. 71. № 1. PP. 135–150.
103. Сырников Н. М., Тряпицын В. М. О механизме техногенного землетрясения в Хибинах // Доклады Академии наук СССР. 1990. Т. 314, № 4. С. 830–833.
104. Гурьев А. А. Устойчивое развитие рудно-сырьевой базы и обогатительных мощностей АО «Апатит» на основе лучших инженерных решений // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 662–673.
105. Сейсмичность при горных работах. Коллектив авторов / под ред. Н. Н. Мельникова. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. С. 325.
106. Fedotova Y., Kozyrev A., Akkuratov M., Zhukova S. Rock mass watering impact on induced seismicity in junction zone between underground mine and open-pit mine. // Abstract book ESC 2010, 6–10 September 2010, Montpellier, France/32nd European Seismological Commission General Assembly Abstract book (ESC 2010). 2010. P. 157.
107. Fedotova Iu., Zhukova S. Impact of natural factors on mining-induced Seismicity. Proceeding of the 23rd International Mining Congress of Turkey. April 16 19, 2013. Antalya, Turkey. Ed.Ilkay Celik & Mehtap Kilic. Publ. TMMOD Maden Muhendisleri Odasi Selanic Cad. 19/14 Kizilay-Ankara. PP. 2111–2120.
108. Жукова С. А. Взаимосвязь гидрогеологической обстановки с активизацией сейсмичности на месторождениях Апатитовый Цирк и Плато Расвумчорр // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: Горная книга, 2015. № 1. С. 319–329.
109. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). Козырев А. А., Семенова И. Э., Рыбин В. В., Панин В. И., Федотова Ю. В., Константинов К. Н., Сальников И. В., Гадючко А. В., Белоусов В. В., Корчак П. А., Стрешнев А. А. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт КНЦ РАН, АО «Апатит». Апатиты: ООО «КаэМ», 2016. С. 112.
110. Омельченко А., Кузнецов Г. и др. Исследование устойчивости бортов карьеров и отвалов комбината «Апатит». Л., 1965. С. 44.
111. Gibowicz S. J., Kijko A. Introduction to miining seismology. Acadeinic Press, San Diego. 1994. PP. 396
112. Scott D. F., Williams T. J. and Friedel M. J. Investigation of a Rockburst Site [Conference] // Rockbursts and Seismicity in Mines 4. — Krakow: Balkema: Rotterdam, 1997. PP. 311–315.
113. Petukhov I. M. 2004. Rock burst in the coal mines. Moscow. 2004. (Rus).
114. Батугин А. С. Техногенные землетрясения как часть тектонического процесса в зонах предельно напряженного состояния земной коры // Горный журнал. 2020. № 1. С. 24–27.
115. Козырев А. А., Жукова С. А., Самсонов А. В., Волков А. В. Методические принципы учета природных факторов при оценке техногенной сейсмичности Хибинского массива / Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. М.: Горная книга, 2015. № 5. С. 56–64.
116. Руководство по снеголавинным работам /Коллектив авторов. Л.: Гидрометеоиздат. 1965. С. 896.
117. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках / под общ. ред. И. М. Петухова, А. М. Ильина. К. Н. Трубецкого. М.: изд. Академии горных наук, 1997. С. 377.
118. Чебров В. Н., Салтыков В. А., Серафимова Ю. К. Опыт выявления предвестников сильных (М6.0) землетрясений на Камчатке в 1998–2011 гг. По материалам КФ РЭС // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 85.

119. Гусев А. А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности. Сейсмичность, сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109–119.
120. Mendecki, A. J. (2016). Mine seismology reference book: seismic hazard. Institute og Mine Seismology, 88 p.
121. Смирнов В. Б., Пономарёв А. В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН, 2020. С. 412.
122. Яковлев Д. В., Цирель С. В., Мулев С. Н. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, Сибирское отделение РАН.
123. Козырев А. А., Федотова Ю. В., Журавлева О. Г., Звонарь А. Ю., Запорожец В. Ю. Выделение зон повышенной сейсмоопасности по комплексу прогностических критериев // Горный журнал. 2010. № 9. С. 44–47.
124. Завьялов А. Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. С. 254.
125. Журавлева О. Г., Жукова С. А. Вероятностный подход к оценке сейсмической опасности на примере удароопасного Кукисвумчоррского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S37. С. 366–375.
126. Mendecki A. J. Seismic Monitoring in Mines. — London: Chapman and Hall, 1997. P. 262.
127. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back Analysis of Short-Term Seismic Hazard Indicators of Larger Seismic Events in Deep Underground Mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden) // Pure and Applied Geophysics. 2020. Vol. 177. Iss. 2. PP. 763–785.
128. Malovichko D. A. Assessment and testing of seismic hazard for planned mining sequences // Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining. — Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2017. PP. 61–77.
129. Прогностические аномалии сейсмического режима. II. Западные Гималаи / Г. А. Соболев, Б. Арора, В. Б. Смирнов [и др.] // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 2. С. 23–36.
130. Петухов И. М, Смирнов В. А., Винокур В. Ш., Дальнов А. С. Геофизические исследования горных ударов. М.: Недра, 1975. С. 134.
131. Салтыков В. А. О проблеме оценки пространственно-временных особенностей представительности каталога землетрясений Камчатки // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: мат-лы XIII Междунар. сейсмологической школы (Душанбе, 11–15 сент. 2018 г.). Душанбе: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2018. С. 237–242.
132. Баранов С. В., Моторин А. Ю., Шебалин П. Н. О пространственном распределении постсейсмической активности в Хибинском массиве // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2, № 3. С. 34–42.
133. Жирова А. М., Жиров Д. В., Виноградов Ю. А., Жукова С. А. Анализ сейсмичности природно-технических систем Кольского региона и ее связи с солнечно-лунными приливами: первые результаты // Материалы конф. «Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли». Апатиты: ГоИ КНЦ РАН, 2014. Т. 2. С. 26–33.
134. Сидорин А. Я. Суточная периодичность землетрясений и ее сезонные изменения // Сейсмические приборы. 2009. 45(4). С. 69–84.
135. Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Жукова С. А. Сейсмичность как отражение изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород в процессе ведения горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 6. С. 46–58.

136. Виноградов С. Д., Пономарев В. С. Экспериментальное изучение сейсмического режима // Природа. 1999. № 3. С. 54–63.
137. Avetisian I. M., Dmitriev S. V. Development of a geomechanical model for the effective rock mass state management during underground mining of the Oleniy Ruchey deposit // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019, Vol. 1. PP. 133–140.
138. Shen B. and Barton N. Rock fracturing mechanisms around underground openings // Geomechanics and Engineering, 2018. vol. 16. №. 1. PP. 35–47.
139. Аветисян И. М. Анализ главных касательных напряжений и площадок сдвига в объемной модели упруго-деформируемого массива горных пород / И. М Аветисян., И. Э. Семенова, С. В. Дмитриев, А. А Шестов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). М.: Горная книга, 2017. № S23. С. 258–264.
140. Латышев О. Г., Прищепа Д. В. // Исследование дилатансии при сдвиге горных пород по трещине // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. Уральский гос. горный ун-т. 2016. № 4. С. 55–59.
141. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов // М.: Недра, 1965. С. 378.
142. Борщ-Компониец В. И. Механика горных пород, массивов и горное давление // М.: Недра, 1968. С. 484.
143. Баклашов И. В., Картозия Б. А. Механические процессы в породных массивах // М.: Недра, 1986.
144. Бреббиа К., Уокер С. Применение метода граничных элементов в технике / М.: Мир, 1982. С. 248.
145. Власов А. Н. Определение эффективных деформационных характеристик слоистых и трещиноватых скальных пород: автореферат дисс. к. т. н. М.: МИСИ, 1990.
146. Власов А. Н. Усреднение механических свойств структурно неоднородных сред // Механика композитных материалов и конструкций. Июль – сентябрь. 2004. Т. 10, № 3. С.424–441.
147. Goodman R. E., Taylor R. L., Brekke T. L. A Model for the Mechanics of Jointed Rock. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. 1968. Vol. 94. Iss. 3. PP. 637–659.
148. Lamonina E. V. Numerical modeling of jointed rock masses: thesis of inauguration of Dissertation of Candidate of Engineering Sciences. Moscow, 2006. PP. 164.
149. Костюченко В. Н., Кочарян Г. Г., Павлов Д. В. Деформационные характеристики межблоковых промежутков различного масштаба // Физ. мезомех. 2002.
150. Дмитриев С. В. Выбор оптимальной модификации контактного элемента для моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород с учетом структурных неоднородностей // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2019. № 1(63). С. 143–152.
151. Herrmann L. R., Finite element analysis of contact problems // Journal of Engineering Mechanics, ASCE, №104 (5). 1978. PP. 1043–1059.
152. Jianchao Li Numerical Simulation of Interfaces in Geomaterials: Development of a New Zero-thickness Interface Element // University of Delaware, 1993. P. 154.
153. Barton, Nick & Bandis, Stavros. (2017). Characterisation and modelling of the shear strength, stiffness and hydraulic behaviour of rock joints for engineering purposes // Rock Mechanics and Engineering: Volume I: Principles (1st ed.). CRC Press.
154. Lucashevich A. A. Modern numerical methods of structural mechanics // Educational tutorial // Khabarovsk state technical university publishing house, 2003.
155. Shrirang Abhyankar, Barry Smith, Hong Zhang, and A. Flueck. Using PETSc to develop scalable applications for next-generation power grid // Proceedings of the 1st International Workshop on High Performance Computing, Networking, and Analytics for the Power Grid. — 2011. ACM, New York, NY.
156. Nick Barton Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy // Taylor & Francis Group. 2007. London, UK.

157. Barton N., Bandis S. (2018) Barton-Bandis Criterion. In: Bobrowsky P., Marker B. (eds) Encyclopedia of Engineering Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham.
158. Kostyuchenko V. N., Kocharyan G. G., Pavlov D. V. Strain characteristics of interblock gaps of different scales. Fizicheskaya mezomekhanika. 2002. Vol. 5, № 5. PP. 23–42.
159. Юфин С. А., Ламонина Е. В. Анализ напряженно-деформированного состояния трещиноватых скальных пород с использованием численных методов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). М.: Горная книга, 2008. № 10. С. 268–277.
160. Будков А. М., Кочарян Г. Г., Павлов Д. В. Численное моделирование процесса накопления межблоковых перемещений при низкоамплитудных динамических воздействиях // Физ. мезомех. 2010. Т. 13, № 2. С. 21–30.
161. Назарова Л. А. Моделирование объемных геомеханических объектов на основе прямых и косвенных данных о полях напряжений и деформаций: докторская дисс. Новосибирск, 2000. С. 27.
162. Технический проект на отработку месторождения апатит-нефелиновых руд Олений ручей. Подземные горные работы. — 030-04-15-00-00-02, СПб, 2017.
163. Технологический регламент «Отработка запасов месторождения Плато Расвумчорр рудником «Центральный», Горный институт КНЦ РАН, 2011.
164. Турчанинов И. А., Марков Г. А. Аномально высокое напряженное состояние массивов горных пород и его учет при подземной разработке // Физические условия и развитие технологии горного производства. Л., Ленингр. отд.: Наука 1973. С. 34–42.
165. Отчет по договору № 6 ГБ-09/20 «Проведение измерений напряженно-деформированного состояния массива горных пород на месторождении Плато Расвумчорр», ООО «Геотехническое бюро», 2021.
166. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» Приказ Ростехнадзора от 11 дек. 2013 г. № 599.
167. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (месторождение Олений ручей) Козырев А. А., Семенова И. Э., Рыбин В. В., Земцовский А. В., Федотова Ю. В., Константинов К. Н., Лобанов Е. А., Суслов И. В., Волков Д. С., Пантелеев А. В. Апатиты, 2015.
168. Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Э. Опыт применения экспертных систем оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород для выбора безопасных способов отработки рудных месторождений // Записки Горного института 2012. Т. 198. С. 16–23.
169. Жиров Д. В. Тектоника фоидолитового комплекса Хибин и потенциал открытия новых апатитовых месторождений // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы LII Тектонического совещания. 2020. С. 223–228.
170. Kozyrev A. A., Savchenko S. N. The Eurasia lithospheric plate horizontal tectonic stresses modelling // Geoecology and Computers. — Abingdon: Taylor & Francis, 2000. P. 431–435.
171. Турчанинов И. А., Марков Г. А., Иванов В. И., Козырев А. А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок // Л.: Наука, 1978. С. 256.
172. Указания по управлению обрушением покрывающих пород, охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных разработок на рудниках открытого акционерного общества «Апатит». Апатиты, 2002. С. 51.
173. Семенова И. Э. Методика прогноза обрушений по результатам численного моделирования деформированного состояния подработанных пород // Москва: МГГУ, 2006 — приложение к № 4 Горного информационно-аналитического бюллетеня, С. 14.

174. Козырев А. А., Енютин А. Н., Мальцев В. А., Семенова И. Э. Методика регионального прогноза удароопасности и состояния массива пород и выбора технических решений по обеспечению безопасности и эффективности горных работ // Инновационный потенциал Кольской науки. Изд-во КНЦ РАН, 2005. С. 52–56.
175. Демидов Ю. В., Козырев А. А., Енютин А. Н., Семенова И. Э. и др. Отработка горизонта в тектонически напряженном, удароопасном массиве пород с созданием протяженных разгрузочных зон в процессе ведения очистных работ. Междунар. конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр земли» (Новосибирск, 6–10 окт. 2003 г.).
176. Изучение эволюции напряженно-деформированного состояния геологической среды в горнотехнических системах для обеспечения безопасности и эффективности горных работ. Отчет о НИР (заключительный) 5-10-2601; № гос. Регистрации 01201055027; научн. рук. А. А. Козырев, отв. исп. В. И. Панин, фонды Горного института КНЦ РАН, Инв. № 86э; 2012. С. 392.
177. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020 г., рег. № 61651 от 21.12.2020 г. — Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. URL: http://docs.cntd.ru/document/499066482
178. Фисенко Г. Л., Ревазов М. А., Галустьян Э. Л. Укрепление откосов в карьерах. М.: Недра, 1974. С. 208.
179. Галустьян Э. Л. Геомеханика открытых горных работ: справоч. пос. М.: Недра, 1992. С. 272.
180. Xie, H., Li, C., Gao, M., Zhang, R., Gao, F., & Zhu, J. (2021). Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics. Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40(2), 217-232. 2020. 0317.
181. Wojtecki, Ł., Konicek, P., Mendecki, M. J., Gołda, I., & Zuberek, W. M. (2020). Geophysical evaluation of effectiveness of blasting for roof caving during longwall mining of coal seam. Pure and Applied Geophysics, 177(2), 905–917. doi:10.1007/s00024-019-02321-1
182. Eremenko A. A., Konurin A. I., Shtirts V. A., & Prib V. V. Identification of higher rock pressure zones in rockburst-hazardous iron ore deposits // Gornyi Zhurnal, 2020. № 1. С. 78–81.
183. Козырев А. А., Семенова И. Э., Журавлева О. Г., Пантелеев А. В. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 12. С. 74–83.
184. Козырев А. А., Каган М. М., Константинов К. Н., Жиров Д. В. Деформационные предвестники техногенного землетрясения на Объединенном Кировском руднике ОАО «Апатит» // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Тр. Всерос. конф. 2011. С. 228–234.
185. Lovchikov A. V. Review of the strongest rockbursts and mining-induced earthquakes in Russia. Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49. № 4. PP. 572–575;
186. Semenova I. E. Geomechanical aspects of development of closely spaced ore deposits under conditions of rockburst hazard // Gornyi Zhurnal. 2020. № 9. PP. 26–32.
187. Лукичёв С. В. Цифровое прошлое, настоящее и будущее горнодобывающих предприятий // Горная промышленность. 2021. № 4. С. 73–79.
188. Козырев А. А., Лукичев С. В., Наговицын О. В., Семенова И. Э. Геомеханическое и горнотехнологическое моделирование как средство повышения безопасности отработки месторождений твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 73–83.

Описание структур основных таблиц базы данных

Одной из важных задач является координирование всех замеров как в локальной (рудничной), так и в глобальной (геодезической) системе координат. Для корректного координирования всех измерений разработана таблица ***CoordSystems*** (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Системы координат. Наименование: **CoordSystems**

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
1	RID	Bigserial	Не null		Внутренний идентификатор системы координат. Первичный ключ таблицы. Назначается автоматически при добавлении записи
2	PID	Bigint		CoordSystems. RID	Идентификатор вышестоящей системы координат. NULL для системы верхнего уровня
3	Level	Integer	Не null		Уровень системы координат в иерархии. Ноль для верхнего уровня. Фиксируется при добавлении записи
4	HCode	Char (30)	Не null		Иерархический код системы. Фиксируется при добавлении записи
5	Name	Varchar (128)	Не null. Уникальность		Человекочитаемое обозначение системы координат. Уникально как минимум на уровне своей группы
6	Comment	Varchar (512)			Расширенное описание системы координат
7	X_Min	Float8	Не null		Область определения системы координат — ограничения на значения собственных координат
8	X_Max	Float8	Не null		Область определения системы координат — ограничения на значения собственных координат. Смещение начала при переводе координат в вышестоящую систему координат. Нули для верхнего уровня
9	Y_Min	Float8	Не null		
10	Y_Max	Float8	Не null		
11	Z_Min	Float8	Не null		
12	Z_Max	Float8	Не null		
13	X_0	Float8	Не null		
14	Y_0	Float8	Не null		Смещение начала при переводе координат в вышестоящую систему координат. Нули для верхнего уровня. Матрица преобразования координат в вышестоящую систему координат. Для верхнего уровня смысла не имеет, будет матрицей тождественного преобразования: 1 0 0 0 1 0 0 0 1
15	Z_0	Float8	Не null		
16	X_X	Float8	Не null		

Окончание таблицы 1.1

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
17	X_Y	Float8	He null		Матрица преобразования координат в вышестоящую систему координат. Для верхнего уровня смысла не имеет, будет матрицей тождественного преобразования: 1 0 0 0 1 0 0 0 1
18	X_Z	Float8	He null		
19	Y_X	Float8	He null		
20	Y_Y	Float8	He null		
21	Y_Z	Float8	He null		
22	Z_X	Float8	He null		
23	Z_Y	Float8	He null		
24	Z_Z	Float8	He null		

Таблица ***MineObjects*** описывает иерархию горных объектов, их обозначение и описание (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Горные объекты. Наименование: **MineObjects**

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
1	RID	Bigserial	He null		Внутренний идентификатор объекта. Первичный ключ таблицы. Назначается автоматически
2	PID	Bigint		MineObjects. RID	Идентификатор вышестоящего объекта. Null для объекта верхнего уровня
3	Level	Integer	He null		Уровень объекта в иерархии. Ноль для верхнего уровня. Фиксируется при добавлении записи
4	HCode	Char (30)	He null		Иерархический код объекта. Фиксируется при добавлении записи
5	Name	Varchar (128)	He null. Уникальность		Человекочитаемое обозначение объекта. Уникально как минимум на уровне своей группы
6	Comment	Varchar (512)			Расширенное описание объекта
7	CSID	Bigint		CoordSystems. RID	Идентификатор системы координат, назначенной объекту
8	X_Min	Float8	He null		Примерная пространственная конфигурация объекта — ограничения на значения координат
9	X_Max	Float8	He null		Примерная пространственная конфигурация объекта — ограничения на значения координат
10	Y_Min	Float8	He null		
11	Y_Max	Float8	He null		
12	Z_Min	Float8	He null		
13	Z_Max	Float8	He null		

Таблица ***Stations*** дает представление о содержании и информационном наполнении базы по каждой станции разгрузки (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Измерительные станции. Наименование: **Stations**

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
1	RID	Bigserial	Не null		Внутренний идентификатор станции. Первичный ключ таблицы. Назначается автоматически
2	Number	Varchar (32)	Не null. Уникальность		Регистрационный номер измерительной станции
3	Name	Varchar (128)	Не null. Уникальность		Человекочитаемое обозначение измерительной станции
4	Comment	Varchar (512)			Расширенное описание измерительной станции
5	MOID	Bigint	Не null	MineObjects. RID	Идентификатор горного объекта, где размещена измерительная станция
6	X	Float8	Не null		Координаты измерительной станции
7	Y	Float8	Не null		
8	Z	Float8	Не null		
9	HoleCount	Integer	Не null		Количество скважин
10	StartDate	Bigint	Не null		Дата закладки станции/начала измерений
11	EndDate	Bigint			Дата завершения измерений. Null, если измерения еще возможны

Таблица ***BoreHoles*** (табл. 1.4) относится к следующему уровню информации, а именно скважинам, которых в рамках каждой станции может быть от одной (на объектах, где ведутся открытые горные работы) до трех (при выполнении измерений в подземных горных выработках). Однозначное определение компонент полного тензора напряжений возможно только при реализации трехскважинных измерений.

Таблица 1.4

Скважины. Наименование: **BoreHoles**

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
1	RID	Bigserial	Не null		Внутренний идентификатор скважины. Первичный ключ таблицы. Назначается автоматически
2	Number	Varchar (32)	Не null. Уникальность		Регистрационный номер скважины
3	Name	Varchar (128)	Не null. Уникальность		Человекочитаемое обозначение скважины
4	Comment	Varchar (512)			Расширенное описание скважины
5	SID	Bigint	Не null	Stations. RID	Идентификатор измерительной станции, где размещена скважина
6	X	Float8	Не null		Координаты устья скважины
7	Y	Float8	Не null		
8	Z	Float8	Не null		
9	Direction	Varchar (32)	Не null		Обозначение направления скважины

Окончание таблицы 1.4

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
10	Diameter	Float8			Диаметр скважины
11	Length	Float8			Длина скважины
12	StartDate	Bigint	He null		Дата закладки скважины/начала измерений
13	EndDate	Bigint			Дата завершения измерений. Null, если измерения еще возможны

В табл. 1.5–1.10 дана расшифровка содержания базы по измеренным параметрам в рамках каждой скважины. Одним из важных разделов получаемой информации являются данные о дисковании керна, по которым уже можно предварительно судить об уровне действующих напряжений (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Дискование керна. Наименование: **CoreSlicing**

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
1	RID	Bigserial	He null		Внутренний идентификатор серии измерений. Первичный ключ таблицы. Назначается автоматически
2	Number	Varchar (32)	He null Уникальность		Регистрационный номер серии
3	Name	Varchar (128)	He null. Уникальность		Человекочитаемое обозначение серии
4	Comment	Varchar (512)			Расширенное описание серии
5	HID	Bigint	He null	BoreHoles. RID	Идентификатор скважины, из которой взят керн
6	DriftDiameter	Float8	He null		Диаметр выработки на момент взятия керна
7	CoreDate	Bigint	He null		Дата взятия керна (по идее, совпадает с датой закладки скважины)

Таблица 1.6

Образцы керна. Наименование: **CoreSamples**

№	**Имя**	**Тип**	**Ограничения**	**Связь**	**Описание**
1	RID	Bigserial	He null		Внутренний идентификатор образца. Первичный ключ таблицы. Назначается автоматически
2	SID	Bigint	He null	CoreSlicing. RID	Идентификатор серии замеров
3	Number	Varchar (32)	He null. Уникальность		Регистрационный номер образца
4	Position	Float8	He null		Положение образца в керне
5	Length	Float8	He null		Длина образца
6	DiskCount	Integer	He null		Количество дисков
7	State	Varchar (32)	He null		Состояние образца

Таблица 1.7

Статические замеры упругости (образцы). Наименование: **ElasticSamples**

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
1	RID	Bigserial	Не null		Внутренний идентификатор образца керна. Первичный ключ таблицы. Назначается автоматически
2	Number	Varchar (32)	Не null. Уникальность		Регистрационный номер образца керна. Уникален в пределах скважины
3	Name	Varchar (128)	Не null Уникальность		Человекочитаемое обозначение образца керна
4	Comment	Varchar (512)			Расширенное описание образца керна
5	HID	Bigint	Не null	BoreHoles. RID	Идентификатор скважины, из которой взят керн
6	MeasureDate	Bigint	Не null		Дата проведения измерений
7	Sensitivity	Float8	Не null		Коэффициент чувствительности тензодатчиков
8	Diameter	Float8	Не null		Диаметр керна

Таблица 1.8

Статические замеры упругих характеристик. Наименование: **ElasticMeasurements**

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
1	RID	Bigserial	Не null		Внутренний идентификатор замера. Первичный ключ таблицы. Назначается автоматически
2	SID	Bigint	Не null	ElasticSamples. RID	Идентификатор образца керна
3	Number	Varchar (32)	Не null		Регистрационный номер замера. Уникален в пределах образца
4	Pressure	Float8	Не null		Нагрузка на образец
5	R1	Float8	Не null		Сопротивления тензорезисторов
6	R2	Float8	Не null		
7	R3	Float8	Не null		
8	R4	Float8	Не null		

Таблица 1.9

Серии замеров методом разгрузки. Наименование: **DischargeSeries**

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
1	RID	Bigserial	Не null		Внутренний идентификатор серии замеров. Первичный ключ таблицы. Назначается автоматически
2	Number	Varchar (32)	Не null. Уникальность		Регистрационный номер серии замеров. Уникален в пределах скважины
3	Name	Varchar (128)	Не null. Уникальность		Человекочитаемое обозначение серии замеров
4	Comment	Varchar (512)			Расширенное описание серии замеров
5	HID	Bigint	Не null	BoreHoles. RID	Идентификатор скважины, из которой взят керн
6	RockType	Varchar (128)	Не null		Тип породы
7	MeasureDate	Bigint	Не null		Дата проведения измерений

Таблица 1.10

Поразгрузочные замеры. Наименование: **DischargeMeasurements**

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
1	RID	Bigserial	He null		Внутренний идентификатор замера. Первичный ключ таблицы. Назначается автоматически
2	SID	Bigint	He null	DischargeSeries. RID	Идентификатор серии замеров
3	DschNumber	Varchar (32)	He null. Уникальность		Регистрационный номер разгрузки. Уникален в пределах серии
4	CoreNumber	Varchar (32)	He null. Уникальность		Регистрационный номер керна. Уникален в пределах серии
5	Diameter	Float8	He null		Диаметр керна
6	Length	Float8	He null		Длина керна
7	Weight	Float8	He null		Вес керна
8	CartNumber	Varchar (32)	He null. Уникальность		Номер тензопатрона. Уникален в пределах серии
9	PartNumber	Varchar (32)	He null		Номер партии тензодатчиков
10	R1	Float8	He null		Сопротивления тензодатчиков
11	R2	Float8	He null		
12	R3	Float8	He null		
13	R4	Float8	He null		
14	RComp	Float8	He null		Сопротивление компенсационного резистора
15	Sensitivity	Float8	He null		Коэффициент чувствительности тензодатчиков
16	TProfile1	Float8			Замеры времени прохождения волны по профилю
17	TProfile2	Float8			
18	TFace1	Float8			Замеры времени прохождения волны между торцами
19	TFace2	Float8			
20	TFace3	Float8			
21	VProfile	Float8			Скорость прохождения волны по профилю
22	VFace	Float8			Скорость прохождения волны между торцами
23	PuassonStatic	Float8	He null		Статический коэффициент Пуассона
24	YungStatic	Float8	He null		Статический модуль Юнга
25	CoreDepth	Float8	He null		Глубина взятия керна
26	E1	Float8	He null		Относительные деформации образца
27	E2	Float8	He null		
28	E3	Float8	He null		
29	E4	Float8	He null		
30	Rotate	Float8	He null		Угол коррекции направления напряжений

Таблица ***SuppliedData*** (табл. 1.11) содержит неформализованные материалы, которые имеют отношение к конкретной сущности. Запись в данной табл. может хранить растровые и векторные изображения, чертежи AutoCAD, видеоматериалы и т. п.

Таблица 1.11

Сопутствующие материалы. Наименование: **SuppliedData**

№	Имя	Тип	Ограничения	Связь	Описание
1	RID	Bigserial	Не null		Внутренний идентификатор материала. Первичный ключ таблицы. Назначается автоматически
2	OwnID	Bigint	Не null	MineObjects. RID Stations. RID BoreHoles. RID CoreSlicing. RID RockBumps. RID	Идентификатор сущности, к которой относится материал
3	OwnType	Varchar (32)	Не null		Тип сущности-владельца: MINE_OBJECT — горный объект; STATION — измерительная станция; BOREHOLE — скважина; CORE_SLICING — керн; ROCK_BUMP — горный удар
4	DType	Varchar (32)	Не null		Тип материала: фото; чертеж Autocad…
5	FileName	Varchar (64)	Не null		Рекомендуемое имя файла при извлечении
6	DataContent	Bytea	Не null		Собственно, данные
7	DataDate	Bigint	Не null		Датировка материала

Для реализации разграничения прав пользователей базы данных применена технология Row Level Security — разделение прав на уровне записи таблицы. Табл. 1.12–1.14 хранят роли пользователей, их права доступа к определенным данным.

Таблица 1.12

Набор ролей

№	Имя	Описание
1	Geomech_GlobalObjectsEditor	Редактор главных справочников (системы координат и горные объекты)
2	Geomech_GlobalObjectsReader	Читатель главных справочников (вспомогательная)
3	Geomech_HolesAndCoresDataEditor	Редактор данных по кернам и скважинам. Участник роли Geomech_GlobalObjectsReader
4	Geomech_HolesAndCoresDataReader	Читатель данных по кернам и скважинам. Участник роли Geomech_GlobalObjectsReader
5	Geomech_HolesAndCoresDataAnalyst	Обработчик данных по кернам и скважинам. Член роли Geomech_HolesAndCoresDataReader
6	Geomech_RockBumpsDataEditor	Редактор данных по горным ударам. Участник роли Geomech_GlobalObjectsReader
7	Geomech_RockBumpsDataReader	Читатель данных по горным ударам. Участник роли Geomech_GlobalObjectsReader
8	Geomech_RockBumpsDataAnalyst	Обработчик данных по горным ударам. Участник роли Geomech_RockBumpsDataReader
9	Geomech_ComplexAnalyst	Комплексный обработчик-аналитик. Участник ролей Geomech_HolesAndCoresDataReader и Geomech_RockBumpsDataReader

Права на объекты БД

Таблица 1.13

Доступ к таблицам

Таблицы	Роли (№)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CoordSystems	S I U D	S							
MineObjects	S I U D	S							
Stations	S		S I U D	S					
BoreHoles			S I U D	S					
CoreSlicing			S I U D	S					
CoreSamples			S I U D	S					
ElasticSamples			S I U D	S					
ElasticMeasurements			S I U D	S					
DischargeSeries			S I U D	S					
DischargeMeasurements			S I U D	S					
RockBumps	S					S I U D	S		
SuppliedData	S I U D	S	S I U D	S		S I U D	S		

Таблица 1.14

Функции и процедуры

Функции и процедуры	Роли (№)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CoordSystems_Trg	E								
MineObjects_Trg	E								
Stations_Trg			E						
BoreHoles_Trg			E						
CoreSlicing_Trg			E						
CoreSamples_Trg			E						
ElasticSamples_Trg			E						
ElasticMeasurements_Trg			E						
DischargeSeries_Trg			E						
DischargeMeasurements_Trg			E						
RockBumps_Trg							E		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица

База данных горных ударов удароопасных месторождений Хибинского массива

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
1	21.07.1964	Плато Расвумчорр	Рудоспуск № 3	–	Горно-тектонический удар	Разрушением крепления в рудоспуске. Выброс плит породы весом 0,8–1,5 т. Зафиксировано сейсмостанцией «Апатиты»	[1]
2	03.04.1969	Кукисвумчоррское	Гор. +322 м, бл. 2/4, МБО 4	–	Горный удар	Выброс горной массы (90 т)	[1]
3	08.10.1979	Кукисвумчоррское	Р4–р8, гор. +322 м, отк. орт 7а	–	Горно-тектонический удар	Подвижка блоков пород, повлекшая за собой разрушение монолитной бетонной крепи. Трещины в монолитной бетонной крепи капитальных выработок; искривление ж/д путей; полное разрушение выработок днища блока	[2, 3]
4	12.12.1979	Кукисвумчоррское	Р4–р8, гор. +322 м, отк. орт 5	–	Горно-тектонический удар	Интенсивное заколообразование, выработки днища в блоке-целике разрушены. Выброс горных пород (120 т)	[2, 3]
5	08.01.1981	Кукисвумчоррское	Гор. +322 м, гор. +252 м	–	Техногенное землетрясение	Сотрясения на гор. +322 м и на гор. +252 м. М = 2,1	–
6	11.03.1981	Кукисвумчоррское	Р14, М 400, гор. +252 м, бл. 13/15; скр. штрек 1315	470	Микроудар	Выброс горных пород со звуковым эффектом, объем — 8 м^3 (23 т). Стреляние, интенсивное шелушение	Карточка ГУ № 1
7	17.04.1981	Кукисвумчоррское	Р13+32 м, М 400, гор. +252 м; бл.13/15; скр. штрек 1317	470	Микроудар	Выброс горных пород со звуковым эффектом, объем 5 м^3 (15 т). Стреляние, интенсивное шелушение	Карточка ГУ № 2

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
8	17.05.1981	Кукисвумчоррское	Гор. +322 м, гор. +252 м	–	Техногенное землетрясение	Серия толчков в выработках гор. +252 м и гор. +322 м. M = 3	–
9	18.08.1981	Кукисвумчоррское	Гор. +322 м, гор. +252 м	–	Техногенное землетрясение	Сотрясения на гор. +322 м и гор. +252 м. M = 3.2	–
10	29.09.1981	Кукисвумчоррское	Гор. +322 м, гор. +252 м	–	Техногенное землетрясение	Сотрясения на гор. +322 м и гор. +252 м M = 3.1	–
11	05.03.1982	Кукисвумчоррское	Р14+10 м, М380, гор. +252 м; бл.13/15; скр. штрек 1314а	470	Микроудар	Выброс горной массы со звуковым эффектом, объем — 3 м^3 (9 т). Стреляние, интенсивное шелушение	Карточка ГУ № 3
12	12.04.1982	Кукисвумчоррское	Р14+15 м, М390, гор. +252 м, бл.13/15, скр. штрек 1314а	470	Микроудар	Выброс горной массы с сильным звуковым эффектом, объем — 2–3 м^3 (8 т)	Карточка ГУ № 4
13	16.04.1982	Кукисвумчоррское	Р14+15 м, М400, гор. +252 м, бл.13/15, скр. штрек 1315а	470	Микроудар	Выброс горной массы с сильным звуковым эффектом, объем — 1 м^3 (3 т). Интенсивное заколообрезование, потрескивания в массиве, толчки	Карточка ГУ № 5
14	22.04.1982	Кукисвумчоррское	Р14+10 м, М380, гор. +252 м, бл.13/15	470	Микроудар	Интенсивное заколообразование, шелушение. 5 толчков со звуковым эффектом. Вывалы в скр. штреке 1313а (западная стенка), объем — 3 м^3	Карточки ГУ № 6, 7
15	22.04.1982	Кукисвумчоррское	Р14+10 м, М380, гор. +252 м, бл.13/15	470	Микроудар	Интенсивное заколообразование, шелушение, 5 толчков со звуковым эффектом. Вывалы: сопряжение скр. штрека 1314а и отк. штрека 13а; объем 1 м^3. Выдавливание породы из сопряжения западной стенки и почвы в скр. штреке 1314а	–

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
16	29.08.1982	Кукисвумчоррское	Гор. +252 м		Техногенное землетрясение	Сильный подземный гул и дрожание здания АБК. Гор. +252 м — сколы бетона вдоль разрыва пород, по которому произошла подвижка. М = 3	–
17	05.01.1984	Юкспорское	гор. +530 м, бл. 7/9	355	Микроудар	Шелушение, заколообразование. Объем горной массы 2 м^3	Протокол КГУ № 9
18	25.01.1984	Кукисвумчоррское	Р36, М 205, гор. +172 м, подводящая к ЮВС-2	200	Микроудар	Интенсивное заколообразование, стреляние, потрескивание в массиве. Выброс породной пластины из кровли выработки со звуковым эффектом, объем — 1,5 м^3	Карточка ГУ № 8
19	01.02.1984	Юкспорское	Гор. +530 м, бл.11/12, 10б отк. орт	340	Микроудар	Шелушение, заколообразование, объем горной массы — 1 м^3	–
20	26.03.1984 06:25	Кукисвумчоррское	Р11+32 м, М 260, гор. +252 м, бл. 9/11, 10б отк. орт	220	Микроудар	Выброс горной массы из сопряжения кровли сбойки с восточной стенкой из кровли со звуковым эффектом, ударной волной, объем — 9 м^3 (30 т)	Карточка ГУ № 9
21	19.06.1984 09:48	Юкспорское	Гор. +530 м, бл. 7/11		Микроудар	Выброс горной массы, объем — 40 м^3	Протокол КГУ № 3
22	29.11.1984	Юкспорское	Гор. +530 м; бл. 7/11; 10а отк. орт	340	Микроудар	Интенсивное шелушение, заколообразование по Ю-З стенке штрека, объем — 0,5 м^3	-
23	20.02.1986 05:30	Кукисвумчоррское	Р33+32 м, М 230, гор. +172 м, обгонная № 2	210	Горный удар	Интенсивное шелушение и заколообразование. Выброс горной массы из сопряжения С-В стенки с кровлей со звуковым эффектом, ударной волной, объем — 20–25 м^3	Карточка ГУ № 10
24	14.03.1986	Юкспорское	Гор. +460 м, бл. 15/17, 15а отк. орт	440	Микроудар	Интенсивное шелушение. Выброс горной массы, объем — 3 м^3	–

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
25	19.03.1986 14:40	Кукисвумчоррское	Р35+32 м, М 20, гор. +172 м, обгонная, подводящая к камере УПП, насосная камера	200	Горный удар	Шелушение кровли. Выброс горной массы, объем — 30 м^3	Карточка ГУ № 11
26	11.05.1986 22:09	Кукисвумчоррское	Р8+32 м, М 390, гор. +252 м, бл. 7/9, 8а11 и 8а12 скр. штреки, КВО-11	300	Горно-тектонический удар	Подвижка блоков по трещине техногенного происхождения, выброс горной массы, объем — 11 м^3	Карточка ГУ № 12 [3]
27	27.11.1986 10:00	Кукисвумчоррское	Р19, М 540, гор. +252м, бл. 17/19, 4 отк. штрек	290	Микроудар	Интенсивнее шелушение сопряжения западной стенки с кровлей. Выброс горной массы объем — 1 м^3	Карточка ГУ № 13
28	06.02.1987 11:30	Апатитовый цирк	Р7, М 300, гор. +530 м, бл. 4/7, зап. стенки скр. штр. 710, 711, 712, 7 отк. орг	400	Горный удар	Шелушение пород, в 711 скр. штреке, интенсивное заколообразование. Выброс горной массы объемом — 4м^3 (12 т). В бетонном креплении 7 отк. орта от КСЛ 78 до КСЛ 713 образованы трещины, часть отслоилась	Карточка ГУ № 1
29	16.04.1989 10:35	Кукисвумчоррское	Р15–р27, М 200–М 500, гор. +322, +252, +172 м	220	Техногенное землетрясение	Шелушение и заколообразование. Толчки в массиве вблизи разлома. Выбросы горной массы во многих выработках, деформированы рельсовые пути, смещены проводники ствола. Надвиг по разлому	Карточка ГУ № 14 с. 17–21 в [3]
30	25.07.1989 03:39	Кукисвумчоррское	Р35+32 м, М 20, гор. +172 м, насосная, камера УПП, обгонная для труб	200	Техногенное землетрясение	Толчки со стороны разлома. Трещины в бетонной крепи и вывалы, объем — 0,3 м^3	Карточка ГУ № 15 с. 17–21 в [3]

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
31	06.04.1990 06:35	Апатитовый цирк	Р6, М 380, гор. +530 м, бл. целик выработки: ПШ 122, 123, 124, 125, 6а отк. орт	230	Микроудар	После массового взрыва — толчок, выброс горной массы 2,5 м³	Карточка ГУ № 2
32	20.04.1990	Кукисвумчоррское	Р14, М 520, гор. +252 м, бл. 13/15, 13а отк. орт	460	Микроудар	Интенсивное заколообразование, стреляние пород за сутки до микроудара. Выброс горной массы 5–6 м³	Карточка ГУ № 16
33	12.12.1990	Кукисвумчоррское	Р15, М-30, гор. +172 м, квершлаг ЦВС № 2	272	Горно-тектонический удар	Интенсивное заколообразование, стреляние пород. Толчки в массиве с энергией 105 Дж. Выброс горной массы 15 м³	Карточка ГТУ № 17
34	18.05.1992 21:17:50	Кукисвумчоррское	Р15, М520, гор. +252 м, бл. 13/15, 14 отк. орт, 13 БПШ	360	Микроудар	Заколообразование по сопряжению с западной стенки с кровлей. Выброс горной массы 2–3 м³. Энергия события — 3·107Дж (АСКСМ)	Карточка ГУ № 18
35	05.07.1992 09:52	Апатитовый цирк	Р14+60 м, М 380, гор. +530 м, бл. 14/16, отк. орт 14б	–	Микроудар	Заколообразование в кровле и западном сопряжении кровли со стенкой. Подвижка массива по натролитовой трещине. Выброс горной массы 2 м³. Сейсмические события: М = 0,8; М = 1,1 (сейсмостанция «Апатиты»)	Карточка ГУ № 3
36	16.12.1992 03:10	Юкспорское	Р16+10 м, М 250, гор. +460 м, бл. 15/18, 31 БПШ	400	Микроудар	Заколообразование по сопряжению Ю-З стенки с кровлей. Выброс горной массы 0,5 м³	Карточка ГУ № 19

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
37	06.03.1993 14:29	Апатитовый цирк	Р 9+16 м, М 180, гор. +470 м	60–120	Горно-тектонический удар	Подвижка структурных блоков по зоне шреуштейнизации после массового взрыва гор. +470, выброс горной массы 25 м³. Гор. +530 м, по периметру склада ВМ (Р8п+10, М112) по монолитному бетону толщиной около 2 м — трещина, раскрытием ок. 2 см. ЮОШ-1 (Р8+10, М160) по периметру выработки — трещина, раскрытием 1 см. Сейсмические события: М = 2,5 (сейсмостанция «Апатиты»)	Карточка ГУ № 4 [2, 3]
38	12.04.1993 02:35	Кукисвумчоррское	Гор. +252 м, бл. 4/8, 26 БО, 22 МХШ, 12 БШ, 18 БПО	380	Горный удар	Заколообразование по сопряжению западной стенки с кровлей в выработках штрекового направления, по северной и южной стенкам в выработках ортового направления. Выброс горной массы 10 м^3	Карточка ГУ № 20 [2, 3]
39	25.05.1993 01:18	Кукисвумчоррское	Гор. +252 м, бл. 4/8, 22 МХШ, 21 БШ, 13 БПШ	380	Горный удар	Заколообразование по сопряжению западной стенки с кровлей в выработках штрекового направления, по северной и южной стенкам в выработках ортового направления. Выброс горной массы 5–6 м^3	Карточка ГУ № 21 [2, 3]
40	09.08.1993	Кукисвумчоррское	Гор. +252 м, бл. 5/8, 22 МХШ, 26 БО	–	Толчок	9 сейсмических событий с энергией от 104 Дж	Протокол КГУ № 30-1/1130
41	17.11.1993 10:45:20	Кукисвумчоррское	Гор. +252 м, бл. 4/8	–	Техногенное землетрясение	Обрушение бетонного крепления на сопряжении 5б отк. орта и 2 отк. штрека, бл.3/5 Сейсмическое событие: 109Дж, М = 3,6 Серия сейсмических событий: 105 Дж	Протокол КГУ от 18.11.1993 [2] с. 17–21 в [3]

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
42	09.12.1993 04:21:19 (по Гринвичу)	Кукисвумчоррское	Гор. +252 м, бл. 4/8		Техногенное землетрясение	Сейсмическое событие: М = 1,7	С. 17–21 в [3]
43	12.12.1993	Кукисвумчоррское	–	1000	Техногенное землетрясение	Два сейсмических события с энергией свыше 1010 Дж М = 3,8	Протоколы КГУ № 57 с. 17–21 в [3]
44	16.12.1993 19:33:02 (по Гринвичу)	Кукисвумчоррское	Р-он ведения горных работ Кировского рудника	500–1000	Техногенное землетрясение	Событие сопровождалось сильным сейсмическим толчком и подземным гулом. М = 2–2,6	[4]
45	17.12.1993 06:47:20 (по Гринвичу)	Кукисвумчоррское	Р-он ведения горных работ Кировского рудника	500–1000	Техногенное землетрясение	Событие сопровождалось сильным сейсмическим толчком и подземным гулом. М = 2–2,6	[4]
46	19.05.1994 13:24	Апатитовый цирк	Р14+40 м, М 420, гор. +470 м; бл. 14/19, скр. орт 1, ЮОШ-3	350–400	Толчок	Разрушение межскважинных целиков по разгрузочной строчке и вывал породы из кровли ЮОШ-3 объемом 2 м³, по скр. орту — 1–1,5 м³	Карточка ГУ № 5
47	28.05.1994 05:30	Кукисвумчоррское	Р7+20 м, М 250, гор. +252 м, бл. 7/9, 7а отк. орт	240	Микроудар	Заколообразование между 7а2–7а4 скр. штреками с сопряжения южной стенки с кровлей 7а отк. орта. Выброс горной массы 10 м³	Карточка ГУ № 22
48	03.08.1994 ок.17:00	Кукисвумчоррское	Р7, М280, гор. +252 м, бл. 7/9, 7 отк. орт	240	Горный удар	Заколообразование в сопряжении южной стенки с кровлей. Сейсмическое событие с энергией 2,3·105Дж	Карточка ГУ № 23
49	16.09.1994 14:30	Кукисвумчоррское	Р7, М270, гор. +252 м, бл. 7/9, 7 отк. орт и 6б КВО	240	Горный удар	Обрушение заколов с сопряжения южной стенки с кровлей 7отк. орта между 76КП и ВХС 1/7 и с сопряжения южной стенки с кровлей 6бКВО. Выброс горной массы 16 м³. Сейсмическое событие с энергией 2·105Дж	Карточка ГУ № 24

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
50	26.10.1995	Плато Расвумчорр	Рудоспуск № 4 Центральный рудник	–	Техногенное землетрясение	Зона стыковки Расвумчоррского и Центрального рудников. Сейсмическое событие M = 4,5	–
51	09.07.1998 12:26	Плато Расвумчорр	Р 9п+40 м, М 30, отм. +431 м, транспортная штольня, район р/с № 4 Центрального рудника	315	Горный удар	Толчки в глубине массива, трещины по бетону в районе сопряжения камеры и транспортной штольни. Зарегистрировано сейсмостанцией «Апатиты»	Карточка ГУ № 6 с. 17–21 в [3]
52	18.09.1998 09:15	Апатитовый цирк	Р 6+60 м, М 320, гор. +517 м; бл. 6/8, сопряжение ТО 2/7 с БДШ 25	330–380	Микроудар	Шелушение и заколообразование в кровле ТО2/7. Объем разрушенной породы — 1–1,5 м³	Карточка ГУ № 7
53	14.11.1999	Плато Расвумчорр	Рудоспуск № 6 Центральный рудник; Здания АБК Расвумчоррского рудника; г. Кировск	–	Техногенное землетрясение	Зона стыковки Расвумчоррского и Центрального рудников. Сейсмическое событие M = 2,8–3,5	
54	15.02.2001 09:46	Кукисвумчоррское	Р 16+20 м, М 600, гор. +172 м, бл. 10/14, 513, 514, 515 буро-доставочные орты; восточный откаточный штрек гор. +252 м	470	Горно-тектонический удар	Значительные разрушения буро-доставочных ортов; трещины в набрызг-бетонной крепи. Причины: влияние фронта очистных работ гор. +252 м, консоли покрывающих пород, наличие межортовых целиков, размер которых меньше 2-х диаметров смежных выработок	Карточка ГУ № 25
55	25.09.2002 13:22	Кукисвумчоррское	Р9+7 м, М 576, гор. +252 м, бл. 8/10, отм. +283 м	–	Толчок	Обрушение горной массы с С-З сопряжения сбойки № 2 с ВОШ объемом 3 м^3. Сейсмическое событие с энергией 105Дж	Протокол КГУ от 26.09.2002

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
56	24.10.2002 11:55	Апатитовый цирк	Р 7+50 м, М 280, гор. +492 м, бл. 6/8, 1/8 БПО	260	Микроудар	Интенсивное шелушение по кровле выработки. Выброс горной массы в целике между разгрузочной щелью и зоной шпреуштейнизации после резкой пригрузки данного целика вслед за проработкой межскважинных целиков	Карточка ГУ № 8
57	11.05.2003	Юкспорское	В зоне влияния Саамского разлома	–	Толчок	Падение заколов в виде плоских плит. Сейсмическое событие с энергией 8,6·109Дж, серия афтершоков	
58	15.08.2003	Кукисвумчоррское	Гор. +170 м, бл. 10/14	–	Обрушение заколов с большой площади обнажения	Обрушение горной массы с кровли сопряжения 24 БДО с 24 ВТШ по ненарушенному массиву объемом 3–4 м^3. С 25.07 по 16.08.2003 на гор. +170 м сейсмических событий не зарегистрировано	Протокол КГУ от 18.08.2003 г.
59	11.10.2003	Плато Расвумчорр	Р 9п+20 м, М 570, вспомогательная выработка к рудоспуску № 6, гор. +450 м	140	Горно-тектонический удар	Рост сейсмичности с 11.10.03 с 3 до 6 ч в районе рс № 6 С-З борта карьера Центрального рудника. Динамическое проявление горного давления во вспомогательной выработке к рс № 6 вызвано подвижкой по разлому	Карточка ГТУ № 9
60	25.09.2004	Плато Расвумчорр	Р 12+56 м, М 613, гор. +550 м	140	Техногенное землетрясение	23, 24 сентября рост сейсмоактивности в районе рс № 6. Толчки ощущались в Кировске и мкр Кукисвумчорр. Динамические проявления горного давления вызваны подвижкой по разлому. Сейсмическое событие после массового взрыва с энергией 2,15·109Дж М = 2,2. Серия афтершоков	Карточка ГУ № 10

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
61	25.05.2005	Плато Расвумчорр	Р 9п+40 м, М 30, отм. +450 м, капитальная штольня № 1 и 2 в районе р/с № 4	300	Техногенное землетрясение	Серии толчков в р-не рс № 4 и 6 в подземных выработках и зданиях Центрального и Расвумчоррского р-ков. Сейсмические события М = 1,3–2,3 с 24 по 26 мая. В карьере — осыпание породы по зоне шпреуштейнизации. Вывалы по монолитному бетону 0,15–0,7 м³, продольные трещины в бетоне по кровле с раскрытием 1–3 см и протяженностью 10–20 м	Карточка ГУ № 11
62	12.07.2008	Апатитовый цирк	Р 17+56 м, М 357, отм. +530 м, СОШ, бл. 16/19	300	Микроудар	Динамические заколообразования по южной стенке. Выброс горной массы объемом 15 м³. Раскрытие трещин 6÷10 см. Сейсмическое событие с энергией $2{,}1 \cdot 10^6$ Дж	Карточка ГУ № 12
63	12.10.2008	Апатитовый цирк	Р 10+61 м, М 500, отм. +450 м, БДО 1/10 в	372	Микроудар	Динамические заколообразования по западной стенке. Высокие тектонические напряжения, наличие зоны опорного давления от очистных работ на гор. +470 м блока-целика 10/13, влияние вышележащих покрывающих пород и близко расположенных буродоставочных ортов. Сейсмическое событие с энергией $3{,}4 \cdot 10^7$ Дж	Карточка ГУ № 13
64	04.02.2009	Апатитовый цирк	Р 4+10 м, М 490, отм. +530 м, СОШ	350	Горно-тектонический удар	Подвижка по крутонаклонной маломощной (0,2 м) зоне шпреуштейнизированнных пород. Нарушение монолитного бетона по кровле S = 20 м²; отм. +550 м МХШ42, р3+50; отм. +517 м ВТШ22, р3+32; ВС26, р3+52; БО26, М493; ВС210, р4+25 незначительные вывалы	Карточка ГТУ № 14
65	13.05.2009 10:32	Кукисвумчоррское	Р 19+40 м, М 650, отм. +284 м	205	Микроудар	Влияние зоны концентрации напряжений, геологии (мончекитовая дайка). Выброс горной массы объемом 1,5–2,0 м³ по западной стенке 24 МХШ	Карточка ГУ № 26

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
66	25.05.2009 12:05	Плато Расвумчорр	Р 1, М 750		Техногенное землетрясение	Подвижка по разлому в долине «Дразнящее Эхо» из-за снижения прочности пород в связи с обводненностью. Сейсмическое событие с энергией 5·1010Дж	Протокол КГУ № 93
67	18.11.2009	Апатитовый цирк	Р 10+36 м, М 525, отм. +450 м, БДШ17	450	Микроудар	Высокие гравитационные напряжения в массиве, зона влияния консоли покрывающих пород, очистных работ на данном участке, в т. ч. бурение дополнительной строчки по БДШ17. Выброс горной массы объемом 10 м³	Карточка ГУ № 15
68	06.05.2010	Апатитовый цирк	Р 3+45 м, М 480, гор. +517, +550, +530 м		Толчок	Нарушение торкрет-бетонного крепления и вывал горной массы по окисленной зоне: гор. +550 м на сопряжении МХШ 42 и БО 42а. Выработки выведены из эксплуатации, гор. +530 м. Сейсмическое событие с энергией 1,049·106Дж	Протокол КГУ № 96
69	21.10.2010 12:10	Кукисвумчоррское	Р 16+51 м, М-2, отм. +16 м	360	Техногенное землетрясение	Сильный звук и сотрясение поверхности. Нарушение крепления в квершлаге центрального вспомогательного ствола, гор. +172 м протяженностью ок. 10 м. Интенсивное шелушение, стреляние и динамическое заколообразоиание в выработках, находящихся в проходке. Сейсмическое событие с энергией 8,6·109 Дж, М = 3,4	Карточка ГУ № 27
70	19.01.2012	Апатитовый цирк	Р 9+33 м, М 532, отм. +422 м, сопряжение ВТО 1/9а с БДШ07	500	Горный удар	Динамические заколообразования по сопряжению стенки с кровлей. Высокие гравитационные напряжения, зона влияния консоли покрывающих пород, очистные работы по отм. +450, 484 м, близкое расположение буродоставочных ортов. Выброс горной массы ВТО1/9а на сопряжение с БДШ 07 объемом 1,5–2 м³. Сейсмическое событие с энергией $2{,}1 \cdot 10^6$ Дж	Карточка ГУ № 16

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
71	14.02.2012	Апатитовый цирк	Р 9+10 м, М 550, отм. +450 м; ТШ-18 и сопряжение с ВТО 1/9	450	Горный удар	Высокие гравитационные напряжения, зона влияния консоли покрывающих пород, очистные работы по отм. +450, +484 м. Выброс горной массы ТШ-18 и его сопряжению с ВТО 1/9 на участке длинной 20 м объемом 20 м³	Карточка ГУ № 17
72	16.03.2012	Апатитовый цирк	Р 1+60 м, М 520, отм. +550 м; МХШ42	400	Микроудар	Выброс горной массы в результате подвижки по мончекитовой дайке, в высоко напряженном массиве, в зоне опорного давления от границы отбойки отм. +575 м и спровоцированной взрывными работами, проведенными по БО42. Сейсмическое событие с энергией $6{,}7 \cdot 10^7$ Дж	Карточка ГУ № 18
73	18.05.2012	Плато Расвумчорр	Район рудоспусков — зона стыковки		Толчок	Причины: повышенная обводненность массива и проведение массового взрыва в карьере. С 18 мая по 26 июня — серия событий с энергией от 106 до 3·108Дж	[5]
74	24.05.2012	Юкспорское	Гор. +410 м, бл. 8/9, 12 МХШ		Горный удар	Сейсмическое событие с энергией 1,7·107 Дж р10+20 м, М+26, отм. 433 м	
75	02.06.2013	Плато Расвумчорр	Район рудоспусков — зона стыковки		Толчок	Причины: обводненность массива и проведение массового взрыва в карьере. С 8 мая по 26 июня — серия событий с энергией от 106 до 1,7·107 Дж. На Расвумчоррском руднике 2 июня — толчки	[6, 7]
76	27.10.2014 06:49	Кукисвумчоррское	Р 30+36 м, М 403, 24, 23 БДШ от ВТО 23 до ВТО 24, сред. отм. 280 м, бл.28/1, 33, 34, 35 БДШ	725	Горно-тектонический удар	Причины: обводненность массива, образование межштрековых целиков с недостаточной степенью запаса устойчивости. Выброс горной массы по 2 горизонтам объемом 39 м³. Сейсмическое событие с энергией 1,7·107Дж	Карточка ГТУ № 28

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
77	16.07.2015	Апатитовый цирк	Р0п+2-р0п+10, М 532, БДШ 210 и его вост. сопряжение с ВТО 22, бл. 1/2п, отм. + 520м	300	Микроудар	Динамические заколообразования по южному сопряжению стенки с кровлей. Высокие гравитационные напряжения, зона опорного давления от консоли покрывающих пород, очистных работ на отм. +550 м, особенности геологии. Выброс горной массы 4 м^3	Карточка ГУ № 19
78	07.12.2015 02:19	Кукисвумчоррское	Р 31, М 463, 2 БДГ — сред. отм. +280 м, бл. 28/1	330	Горно-тектонический удар	Потрескивание, отслоение и вывалы по трещинам на отметках +280 и +263м. Триггер — отбойка секции массовым взрывом на 3 БДГ, бл. 28/1. Сейсмическое событие с энергией 6,7·107Дж	Карточка ГТУ № 29
79	27.01.2016 08:46	Кукисвумчоррское	Р 6+56 м, М 550, гор. +170 м, бл. 7/10, уч. № 14, 31 ВТО, 34 БДО, 36 ВТШ, 32 ОШ, 33 ОШ	370	Микроудар	Причины: высокие тектонические напряжения, их концентрация в зоне опорного давления от границы обрушения отм. +262 м. Сейсмическое событие с энергией 1,3·108Дж	Карточка ГУ № 30
80	05.02.2017 21:45	Юкспорское	Р13+35 м, М-33, гор. +320 м, бл. 13/16, отм. +335 м, уч. № 3 в 13 ОШ на сопряжении с 11 БДО	576	Микроудар	Причины: высокие тектонические напряжения, их концентрация в зоне опорного давления от границы обрушения отм. +354 м. Сейсмическое событие с энергией 1,7·107Дж	Карточка ГУ № 31
81	27.03.2017 04:33	Юкспорское	Р 9+62 м, М-139, гор. +320 м, бл. 8/10, отм. +335 м, уч. № 3 между 13 БДО и 12 БДО в близости с 11 бис ОШ	484	Микроудар	Причины: сейсмическое воздействие от прорастания трещин в консоли; влияние границы обрушения покрывающих пород и отбойки по отм. +334 м. Сейсмическое событие с энергией 1,68·107Дж	Карточка ГУ № 32

Продолжение табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
82	17.07.2017	Апатитовый цирк	Р 4п+35 м, М 479, отм. +465 м	–	Толчок	Реализация избыточных тектонических напряжений в виде подвижек по контактам разрывных нарушений, сезонная обводненность. Серия сейсмических событий с энергией от 104 до 10^7 Дж	Протокол КГУ от 19.07.2017
83	09.01.2018 06:00:58	Апатитовый цирк	Р 7+69 м, М 189, отм. +497 м	–	Горно-тектонический удар	Высокие тектонические напряжения, наличие системы разломов и трещин. Правый сдвиг. Сейсмическое событие с энергией 5,4·108 Дж M = 2,9 (АСКСМ); серия афтершоков. ML = 3,3, M = 3,3, M = 3,4	Протокол КГУ № 125 [8, 9]
84	15.03.2019	Коашвинское	–	–	Толчок	Сейсмическое событие в 18:28:43 (Мск.) ML = 3,0; M = 3,0 в пределах Коашвинского карьера (КоФ ФИЦ ЕГС РАН). Классифицировано как природно-техногенное землетрясение. Очаг — в пределах геодинамически активной зоны, прилегающей к району повышенной техногенной нагрузки. Сведений о разрушениях нет, событие АСКСМ не зарегистрировано	[10]
85	10.06.2019	Плато Расвумчорр	–	–	Толчок	Сейсмическое событие в 12:05:20 (Мск.) ML = 3,5; M = 3,5 карьер Центральный. Природно-техногенное землетрясение. (КоФ ФИЦ ЕГС РАН). В АСКСМ — событие с энергией 3,3·108 Дж — сведений о разрушениях нет. Серия афтершоков с энергией до 106 Дж	[10]
86	08.04.2020 7:13:04	Кукисвумчоррское	Р 5+55 м, М 415, отм. +235 м	–	Толчок	38 БДШ от ВТО 31 до ВТО 32, 31 ОШ — нарушение целостности набрызг-бетонного крепления и обрушение горной массы. 39 БДШ, 310 БДШ (ОШ) — трещины в набрызг-бетонном креплении. Сейсмическое событие с энергией 5,37·106 Дж	Протокол КГУ от 16.04.2020

Окончание табл.

№	Дата	Месторождение	Место	Глубина от поверхности, м	Классификация	Зафиксированные разрушения, их причины	Источник (при наличии)
87	06.07.2020 1:11	Кукисвумчоррское	р 5+32 м, М 470, отм. +215 м	–	Микроудар	С 1:11:10 по 1:15:00 на отм. +235 м, бл. 4/7 серия событий с энергией до·107Дж. 32 ВТО — раскрытие трещин в набрызг-бетонной крепи у подошвы и стенкам выработки на сопряжениях с 37, 38, 39, 310 БДШ и 31 ОШ, а также между выработками на прямолинейных участках	Протокол КГУ от 09.07.2020
88	04.12.2020 23:23:13	Юкспорское	р 8+43 м, М 119, гор. +310 м	–	Толчок	Серия событий в лежачем боку рудного тела. 38 БДО, 39 БДО, 310 БДО — нарушение набрызг-бетонной крепи в зоне, примыкающей к эгириновой жиле, капеж. 311 БДО — заколообразование в зоне геологической нарушенности. Сейсмическое событие с энергией 5,32·107 Дж сопровождалось сотрясением массива	Протокол КГУ от 23.12.2020
89	19.02.2021 4:51:42	Юкспорское	Р 11+52,89 м, М-110, отм. +288 м	–	Микроудар	312 БДШ в районе дайки, нарушение комбинированного крепления, обрушение горной массы объемом 2–3м^3. Сейсмическое событие с энергией 1,72·106 Дж. Серия афтершоков	Протокол КГУ от 20.02.2021
90	23.08.2021 0:02	Кукисвумчоррское	р 17+6 м, М 336, отм. +101 м	–	Толчок	Район Саамского разлома — разрушений не обнаружено, микроподвижка в массиве (со слов работников АО «Апатит»). Сейсмическое событие с энергией 1,98·107 Дж, серия афтершоков до 105Дж	–
91	10.09.2021 2:32	Кукисвумчоррское	р 21+42м, М 534, отм. +107 м	–	Толчок	Район Саамского разлома — разрушений не обнаружено. Толчок ощущался жителями мкр. Кукисвумчорр, как мощный массовый взрыв. Сейсмическое событие с энергией 1,67·106 Дж, серия афтершоков до 105 Дж	–
92	22.10.2021 14:04	Юкспорское	р 11+62, М-356, отм. –2 м	–	Толчок	ЮЗОШ 2 — в призабойной части выработки на подошве наблюдается куски горной массы объемом 2–2,5 м^3. Сейсмическое событие с энергией 1,94·106 Дж, серия афтершоков	Протокол КГУ от 27.10.2021

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ПРИЛОЖЕНИЮ Б

1. Марков Г. А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива / Л.: Наука, 1977. С. 213.
2. Experience in Block-pillar Mining Under Rock Bursts Conditions / Anatoly A. Kozyrev, Victor A. Maltsev, Vadim V. Rybin, Vadim S. Svinin // Proc. Symp. Of Mining Science in Brisbane, Qld, 29 October —2 November. — Brisbane, 2000. PP. 805–810.
3. Сейсмичность при горных работах: печатается по постановлению Президиума Кольского научного центра Российской академии наук / А. А. Козырев, В. И. Панин, С. Н. Савченко [и др.]; Горный институт КНЦ РАН. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. С. 325.
4. Кузьмин И. А., Кременецкая Е. О., Тряпицын В. М., Федоренко Ю. В. И др. Землетрясения в Хибинах в ноябре-декабре 1993 г. / Апатиты, 1994. С. 9;
5. Жукова С. А. Взаимосвязь гидрогеологической обстановки с активизацией сейсмичности на месторождениях «Апатитовый Цирк» и «Плато Расвумчорр» // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: Горная книга, 2015. № 1. С. 319–329;
6. Жукова С. А., Федотова Ю. В. Использование данных метео- и гидромониторинга для выявления периодов активизации сейсмической активности на рудниках ОАО «Апатит» // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ: М77 сб. докл. Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием 24–27 сент. 2013г. / Российская академия наук, Отделение наук о земле РАН, Горный ин-т КНЦРАН. Апатиты: СПб., 2013. С. 273–280.
7. Жукова С. А. Выявление критических значений параметров метео- и гидромониторинга Хибинского массива для сильных сейсмических событий // Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона — взгляд в будущее: III Междунар. конф. горнопромышленного комплекса, г. Кировск: сб. докл. Мурманск: Северная ТПП, 2014. С. 143–148.
8. Габсатарова И. П., Асминг В. Э., Дягилев Р. А. [и др.] Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2018 году. Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2020. С. 141–143.
9. Баранов С. В., Шебалин П. Н., Ганнибал А. Е. Оценка магнитуды повторных толчков после землетрясения 2018.01.09, M 3.4 в Хибинском массиве // Триггерные эффекты в геосистемах: мат-лы V Междунар. конф. (Москва, 4–7 июня 2019 г.) / под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочаряна. М.: ООО «ТОРУС ПРЕСС», 2019. С. 13–20.
10. Габсатарова И. П., Асминг В. Э., Дягилев Р. А. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2019 году: Ежегодник. Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2021. С. 139–142.

Научное издание

И. Э. Семенова, В. В. Рыбин, Н. Н. Кузнецов,
И. М. Аветисян, С. А. Жукова и др.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОПАСНЫХ ЗОН В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ
ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Редактор и корректор Ю. Н. Еремеева
Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано в печать 20.12.2025. Формат бумаги 70×108 $^{1}/_{16}$.
Усл. печ. л. 30,2. Заказ № 104. Тираж 300 экз.

Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр Российской академии наук».
184209, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14.

Отпечатано в Федеральном исследовательском центре
«Кольский научный центр Российской академии наук».

ISBN 978-5-91137-559-1



В монографии отражены результаты экспериментальных и теоретических исследований геомеханических процессов в геологической среде в районах ведения крупномасштабных горных работ.

В результате исследований процессов организации и локализации геодинамических опасных зон получены новые данные о параметрах напряжённо-деформированного состояния, физико-механических свойств массива горных пород. Предложены модели поведения участков массива пород, позволяющие выявлять характеристики его деформирования, причины повышения вероятности разрушения и разрабатывать мероприятия по предотвращению опасных последствий интенсивной отработки месторождений. Изложены подходы к организации системы комплексного мониторинга элементов открытой и подземной геотехнологии.

Исследования выполнены на примере крупных горнодобывающих предприятий Северо-западной части Арктической зоны Российской Федерации.