

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Корчак Павел Анатольевич



ПРОГНОЗ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ
СОПРЯЖЕНИЙ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ПОРОДАХ, СКЛОННЫХ К
ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ

Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Карасев М.А.

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК.....	10
1.1 Определение объекта исследования.....	10
1.2 Характер проявления геомеханических процессов и формы потери устойчивости горных выработок при ведении горных работ в высоконапряженных массивах	11
1.3 Масштабные уровни структурной нарушенности пород и руд.....	16
1.4 Анализ результатов натуральных наблюдений за развитием геомеханических процессов в окрестности горных выработок	20
1.5 Анализ методов оценки устойчивости горных выработок	22
1.6 Оценка подходов к определению размеров зон хрупкого разрушения	27
1.7 Выводы по Главе 1	29
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗВИТИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ВЫСОКОНАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ	31
2.1 Общие положения	31
2.2 Горно-геологические условия проведения горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит».....	33
2.3 Натурные наблюдения за развитием геомеханических и геодинамических процессов в окрестности горных выработок	36
2.3.1 Методика проведения исследований.....	36
2.3.2 Результаты натуральных исследований	38
2.4 Изучение механизма деформирования и разрушения горных пород методами акустической эмиссии.....	45
2.4.1 Методика проведения исследований.....	45
2.4.2 Результаты натуральных исследований	46
2.5 Особенности развития геомеханических и геодинамических процессов при проведении и эксплуатации горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит»	48
2.6 Анализ рекомендаций по креплению горных выработок в различных горно-геологических условиях	54
2.7 Выводы по Главе 2	56
ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА РУДНИКАХ КФ АО «АПАТИТ»	57

3.1 Общие положения	57
3.2 Геомеханические модели породного массива для типовых условий подземных рудников КФ АО «Апатит».....	57
3.3 Обоснование модели деформирования и хрупкого разрушения пород в окрестности горных выработок.....	62
3.3.1 Математическая формулировка модели деформирования и хрупкого разрушения пород .	62
3.3.2 Апробация модели для прогноза зон хрупкого разрушения в окрестности горных выработок.....	67
3.3.3 Обоснование параметров математических моделей и граничных условий	69
3.3.4 Выводы по проведенным расчетам	70
3.4 Численное моделирование развития геомеханических процессов в окрестности одиночной горной выработки.....	71
3.4.1 Разработка численных моделей	71
3.4.2 Оценка влияния направления действия главных напряжений на размер и характер формирования зоны хрупкого разрушения	73
3.4.3 Оценка влияния соотношения главных напряжений на размер и характер формирования зон хрупкого разрушения.....	77
3.4.4 Сравнение результатов с эмпирической методикой.....	80
3.5 Численное моделирование развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок	81
3.5.1 Разработка численных моделей	81
3.5.2 Анализ результатов развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок	83
3.6 Обобщение полученных параметров размеров зон хрупкого разрушения в окрестности горных выработок	87
3.7 Выводы по Главе 3	89
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИВЕДЕНИЮ В УСТОЙЧИВОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫРАБОТОК, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ПОРОДАХ, СКЛОННЫХ К ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ	91
4.1 Общие положения	91
4.2 Классификация условий проведения горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» по виду и степени проявления геомеханических процессов.....	91
4.3 Разработка методики оценки устойчивости горных выработок, расположенных в породах, склонных к хрупкому разрушению	93
4.3.1 Общие положения	93

4.3.2 Проведение оценки структурной нарушенности массива горных пород вокруг выработок.....	96
4.3.3 Определение напряженного состояния массива пород вокруг выработок	97
4.3.4 Новая классификация условий проведения горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» по виду и степени проявления геомеханических процессов	98
4.3.5 Характеристика проявлений геомеханических процессов в зависимости от категории и подкатегории состояния горных выработок.....	99
4.3.6 Новые подходы к определению размеров зон хрупкого разрушения пород вокруг выработок.....	101
4.4 Разработка методики расчета нагрузок на крепь горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит».....	102
4.4.1 Общие положения	102
4.4.2 Уточнение подходов к определению параметров крепей горных выработок.....	102
4.4.3 Выбор способов поддержания горной выработки и специальные мероприятия.....	103
4.4.4 Применение специальных мероприятий.....	104
4.5 Выводы по Главе 4	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	108
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ В Журналы натуральных наблюдений	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Результаты анализа полученных данных	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Временная методика определения размеров зон хрупкого разрушения	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Значительный объем добычи апатит-нефелиновой руды, используемой для производства высокосортного фосфатного сырья – апатитового концентрата, приходится на месторождения Кольского полуострова, где находится крупнейшее в мире предприятие по производству концентрата – КФ АО «Апатит».

Руда добывается как открытым, так и подземным способом с совокупными мощностями добычи более 30 млн тонн в год. Разработка месторождений подземным способом в данном регионе представляет наибольшую сложность ввиду значительной глубины ведения работ, склонности вмещающих пород к хрупкому разрушению и проявлению горного давления в динамической форме. Подземная разработка ведется подэтажной системой с торцевым выпуском и принудительным обрушением вышележащей толщи пород. В год проходится несколько десятков километров новых горных выработок различного назначения, и обеспечение их устойчивости является основой безопасной эксплуатации месторождения.

Проведение горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» сопровождается развитием геомеханических и геодинамических процессов, которые могут привести к частичной или полной потере устойчивости горных выработок, что осложняет их проведение и эксплуатацию. Проблемы с обеспечением устойчивости наблюдаются и на сопряжениях горных выработок. Достоверный прогноз развития этих процессов позволит повысить безопасность ведения проходческих работ, снизить затраты на ремонт и укрепление сопряжений горных выработок. Возникает необходимость в разработке методик прогноза геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок в породах, склонных к хрупкому разрушению, что предопределяет актуальность диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования

Исследованием геомеханических процессов в высоконапряженных породных массивах, склонных к хрупкому разрушению, занимались такие отечественные ученые, как А.А. Козырев, Э.В. Каспарян, И.Э. Семенова, А.А. Еременко, А.Г. Протосеня, В.Л. Трушко, Г.Г. Мирзаев, М.В. Корнилков, В.В. Зубков, О.В. Ковалев и многие другие, а также зарубежные ученые С.Д. Martin, Р.К. Kaiser, А. Lisjak, D.R. McCreath и другие.

Однако в работах авторов разработка теоретических положений прогноза хрупкого разрушения пород выполнена без учета упрочнения/разупрочнения среды и формирования макротрещин. В последнее время заметное внимание уделяется применению численного моделирования при прогнозе сложных геомеханических процессов. В работе уделено внимание макроструктурному характеру формирования и развития новых трещин с учетом изменения структуры горных пород в процессе их деформирования.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности** по пунктам:

П.2. Геомеханическое обеспечение открытой и подземной добычи полезных ископаемых, разработка методов управления горным давлением, удароопасностью, креплением, сдвижением горных пород, устойчивостью бортов карьеров, разрезов, отвалов и подземных выработок.

П.5. Теоретические основы, математические модели и способы управления состоянием и поведением массивов горных пород и грунтов с целью обеспечения устойчивости горных выработок, подземных и наземных сооружений, предотвращения проявлений опасных горно-геологических явлений.

Цель работы – обеспечение геомеханической безопасности обеспечение геомеханической безопасности при проведении сопряжений горных выработок, расположенных в породах, склонных к хрупкому разрушению.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Проведение натурных наблюдений за формированием и развитием геомеханических процессов в породном массиве в окрестности горных выработок и их сопряжений на рудниках КФ АО «Апатит».

2. Обоснование модели деформирования и разрушения горных пород для породных массивов, склонных к хрупкому разрушению.

3. Исследование развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок на основании применения численного моделирования.

4. Разработка методики прогноза зон хрупкого разрушения в окрестности выработок, расположенных в высоконапряженных породных массивах для условий рудников КФ АО «Апатит».

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является изучение закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния высоконапряженного массива горных пород для условий месторождений апатит-нефелиновых руд и повышение достоверности прогноза устойчивости выработок.

Идея работы: прогноз геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок, пройденных в породах, склонных к хрупкому разрушению, должен основываться на макроструктурном характере формирования и развития новых трещин и выполняться с учетом изменения структуры горных пород в процессе их деформирования.

Объектом исследования являются сопряжения горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит», расположенные в высоконапряженных горных массивах, склонных к хрупкому разрушению.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние высоконапряженного горного массива в окрестности сопряжений горных выработок.

Научная новизна работы:

1. Обоснованы теоретические положения прогноза хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок с учетом основополагающих положений теории пластического течения упрочняющейся / разупрочняющейся среды.

2. Разработаны численные модели прогноза развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок различной конфигурации, расположенных в высоконапряженном горном массиве, склонном к хрупкому разрушению, и учитывающие накопление повреждений.

3. Установлены закономерности развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжений горных выработок различной конфигурации в высоконапряженном массиве в зависимости от направления действия и величины главных напряжений.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обоснованы подходы к проведению численного моделирования с целью прогноза развития геомеханических процессов в окрестности горных выработок и их сопряжений.

2. Обоснованы параметры модели упрочняющейся / разупрочняющейся среды, адаптированные для условий апатит-нефелиновых месторождений.

3. Разработана методика оценки устойчивости горных выработок и нагрузок на крепь горных выработок, расположенных в породах, склонных к хрупкому разрушению, на рудниках КФ АО «Апатит» (Акт об использовании результатов кандидатской диссертации б/н от 15.11.2023 г., Приложение А).

Методология и методы исследования. Визуальные наблюдения за техническим состоянием горных выработок. Натурные наблюдения за развитием геомеханических процессов в горном массиве. Оценка свойств горных пород при различных механических воздействиях с помощью современного лабораторного оборудования. Внедрение как традиционных, так и инновационных подходов к математическому описанию геомеханических процессов, связанных с деформацией и разрушением материалов, включая уравнения из теории упругости, пластичности и аспекты механики разрушений, с соответствующим обоснованием.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Прогноз развития зон хрупкого разрушения в высоконапряженных горных массивах для месторождений апатит-нефелиновых руд должен выполняться с учетом особенностей развития макротрещин на основании модели, разработанной в рамках теории пластического течения и учитывающей изменение механического поведения среды на допредельной и запредельной стадиях деформирования.

2. Зависимость между размером зоны хрупкого разрушения и относительным напряженным состоянием массива (σ_d/σ_c) для условий подземных рудников КФ АО «Апатит» имеет линейный вид с величиной углового параметра 0.58 и параметра переноса «-0.24», а минимальное соотношение σ_d/σ_c , с которого начинаются процессы хрупкого разрушения на контуре выработки, составляет 0.4.

3. Граница зоны хрупкого разрушения над сопряжением горных выработок представляет собой поверхность с Λ -образным поперечным сечением, размер этой зоны обусловлен геометрией сопряжения горных выработок и направлением действия главных напряжений, при этом высота зоны в сравнении с одиночными выработками больше в 1.4-1.8 раз при куполообразном своде сопряжения и до 2.5 раз – при плоском своде сопряжения.

Степень достоверности результатов исследования путем сопоставления установленных зависимостей с данными полевых наблюдений в зонах сопряжения горных объектов, а также с результатами исследований, проведенных другими учеными. Кроме того, применяются современные подходы численного моделирования.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- Международный научный форум «Наука и инновации – современные концепции», Москва, 2023 г.

- Всероссийская научно-техническая конференция «Цифровые технологии в горном деле», Апатиты, 2023 г.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследований; разработке программы и обработке результатов натурных замеров формирования зон хрупкого разрушения в напряженных породных массивах; разработке численных моделей прогноза деформирования и разрушения хрупких сред; обосновании подхода к описанию механического поведения породного массива, разработке алгоритма для выполнения расчетов прогноза зоны хрупкого разрушения в окрестности выработки; апробации результатов научных исследований на объектах КФ АО «Апатит».

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункты списка литературы № 1, 10, 34, 35), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение Б).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 140 наименований, и 5 приложений. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 32 таблицы.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

1.1 Определение объекта исследования

Разработка рудных месторождений в Хибинском массиве связана с возникновением сложных процессов геомеханического характера. [47,58,77]. На апатит-нефелиновых месторождениях отмечены динамические проявления горного давления от внешних признаков, таких как шелушение, динамическое заколообразование и стреляний, до локальных и региональных горных ударов. Отмечается образование зон хрупкого разрушения в кровле горных выработок величиной от десятых метра на верхних горизонтах отработки, до нескольких метров на нижних отметках. С глубиной протяженность участков с внешними признаками динамического проявления горного давления увеличивается.

При проходке выработок и ведении очистных работ породный массив испытывает деформации, вызванные как непосредственно выемкой породной и рудной массы, так и сейсмическими воздействиями от взрывных работ. Одними из основных факторов, влияющих на устойчивость выработок на рудниках КФ АО «Апатит», являются сложные геомеханические и геодинамические особенности месторождений, формирующие удароопасность горных пород.

Потеря устойчивости горной выработки является ключевым аспектом при выборе методологии расчета креплений подземной конструкции (расчет по схеме совместного взаимодействия или же расчет по заданным нагрузкам). Этот факт накладывает определенные требования на геомеханические модели массива горных пород.

Объектом исследования диссертационной работы являются сопряжения горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит», расположенные в высоконапряженных горных массивах, склонных к хрупкому разрушению. Напряженно-деформированное состояние в окрестности сопряжений горных выработок является еще более сложным в сравнении с одиночными горными выработками в связи с пространственной конфигурацией; параметры зон хрупкого разрушения на сопряжениях зависят от многих факторов и должны быть комплексно оценены при ведении горных работ для повышения безопасности.

Под сопряжением (пересечением) горных выработок понимается место соединения, разветвления или пересечения подземных горных выработок. На рисунке 1.1 приведены основные типы сопряжений горных выработок, встречающиеся на подземных рудниках КФ АО «Апатит».

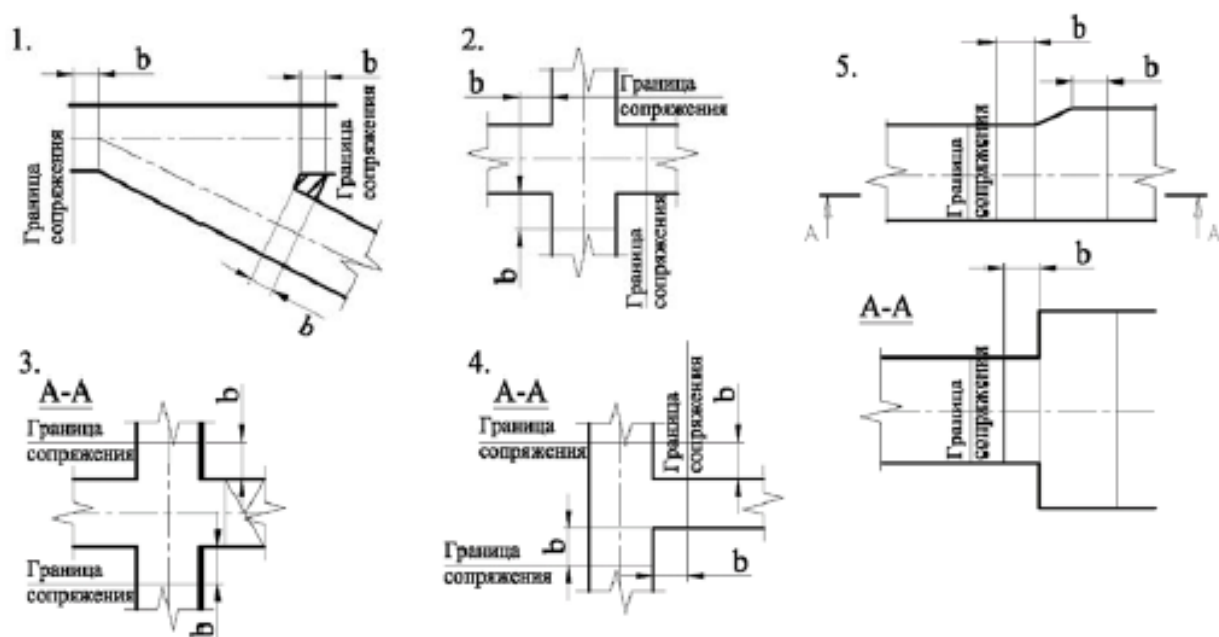


Рисунок 1.1 - Основные типы сопряжений, используемые на рудниках КФ АО «Апатит»: 1 - остроугольное ответвление откаточной выработки; 2 - пересекающиеся под прямым углом горизонтальные выработки; 3 - горизонтальная и вертикальная выработки; 4 - горизонтальная и наклонная выработки; 5 - разновысотные выработки; b - ширина большей из сопрягаемых выработок

В исследовании рассмотрены трехсторонние и четырехсторонние сопряжения. Трехстороннее сопряжение – участок взаимного пересечения двух выработок, одна из которых берет начало или заканчивается на этом участке (прямоугольные, косоугольные ответвления и ответвления по кривой, все виды разветвлений и примыканий). Четырехстороннее сопряжение – участок взаимного пересечения двух выработок, которые не оканчиваются на данном участке (прямоугольные и косоугольные пересечения выработок).

В связи с особенностями сопряжений, подробно рассмотренными в 1 Главе настоящего диссертационного исследования, обеспечение геомеханической безопасности при их проходке является нетривиальной и важной задачей, не имеющей в настоящий момент однозначного алгоритма решения, в особенности в условиях удароопасных месторождений.

1.2 Характер проявления геомеханических процессов и формы потери устойчивости горных выработок при ведении горных работ в высоконапряженных массивах

Проходка горных выработок сопровождается перераспределением напряжений и деформированием вмещающего массива. Характер проявления геомеханических процессов, в частности, величина напряжений, наличие зон концентрации напряжений и характер образующегося поля напряжений, зависит от совокупности взаимосвязанных факторов:

- деформационно-прочностных характеристик пород, вмещающих горную выработку;
- особенностей естественного поля напряжений в массиве;

- пространственных и геометрических параметров выработок, таких как: форма и площадь поперечного сечения, соотношения трех измерений выработок, влияние других горных выработок;

- вида и интенсивности воздействия на породы в процессе проходки и поддержания горной выработки: взрывные работы, температурно-влажностные воздействия, гидрогеологические воздействия и другие.

Оценка проявления геомеханических процессов общепринято основывается на понятии устойчивости горной выработки, или контура горной выработки. Для оценки устойчивости породных обнажений используются специальные критерии, основанные на различных гипотезах реализации геомеханических процессов и формах потери устойчивости.

В общем виде, согласно Булычеву Н. С. [14], можно выделить три формы потери устойчивости горных выработок, представленных на рисунке 1.2.

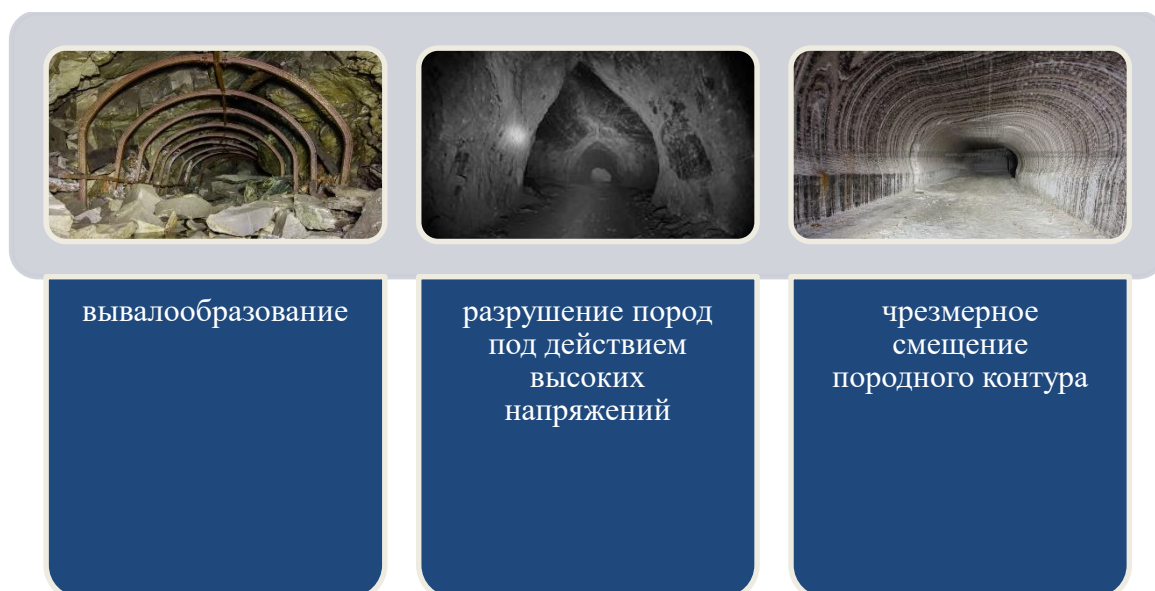


Рисунок 1.2 – Основные формы потери устойчивости [14]

Необходимо отметить, что вывалообразование (локальное или сплошное) может являться завершающим этапом и других форм потери устойчивости. Для апатит-нефелиновых месторождений характерными являются первые две формы потери устойчивости: апатитовые руды склонны к хрупкому разрушению и не проявляют реологических свойств.

В общем случае считается, что:

1. В прочных массивных хрупких породах, которые испытывают дилатацию при разрушении даже в условиях значительного всестороннего давления, потеря устойчивости происходит из-за раскалывания породы за счет формирования продольных трещин отрыва в приконтурной области, динамического заколообразования и горных ударов. Величина деформаций породного контура в некоторых случаях значительная, хотя в целом это не характерно.

2. В прочных и средней прочности слоистых или трещиноватых породах, в которых блоки/слои могут сдвигаться относительно друг друга с формированием дилатансионных процессов при средних значениях всестороннего давления, потеря устойчивости происходит из-за анизотропного характера деформирования породного контура, при котором касательные напряжения снижаются за счет развития деформаций формоизменения по контакту между стенками трещин/слоев. Величина деформаций такого породного массива средняя. Возможно выпадение блоков.

3. В слабых массивных нехрупких породах, которые могут как испытывать дилатансионный характер деформирования при сдвиге, так и нет, разрушение происходит за счет формирования поверхностей скольжения логарифмической формы.

Приведенная выше характеристика принципиально разделяет формы потери устойчивости, опираясь лишь на свойства горных пород, не учитывая других важных факторов (например, напряженного состояния), но в общем виде показывает достаточную сходимость с натурными данными [82].

Более детальное описание форм проявления горного давления представлено в одной из наиболее распространенных классификаций Бениавского (более подробно рассмотрена в разделе 1.3) [105]. Согласно этой классификации, в первом приближении ожидаемое проявление геомеханических процессов и ожидаемая форма потери устойчивости может быть установлена на основании соотнесения главных максимальных напряжений σ_1 , действующих в ненарушенном породном массиве, и прочности породы в условиях одноосного сжатия σ_c , а также показателя, характеризующего нарушенность породного массива. Формы потери устойчивости представлены в таблице 1.1.

Для условий рудников КФ АО «Апатит» классификация должна быть адаптирована исходя из конкретные горно-геологических данных, так как является эмпирической и основана на большом количестве данных других рудников.

В высоконапряженных массивах геомеханические и геодинамические процессы проявляются в первую очередь в виде формирования зон хрупкого разрушения вокруг горных выработок [34]. Хрупкое разрушение может формироваться как непосредственно в процессе ведения проходческих работ, так и развиваться во времени. Под хрупким разрушением понимается формирование трещин растяжения под воздействием сжимающих нагрузок в результате накопления значительной по величине потенциальной энергии.

Под зонами хрупкого разрушения понимаются такие участки пород в окрестности горных выработок, где процесс разрушения сопровождается активным развитием микро- и макротрещин преимущественно в направлении, совпадающем с контуром породного обнажения, завершающим процессом которого является раскалывание пород за счет действия сжимающих

напряжений и квазистатическое или динамическое обрушение пород в выработанное пространство в направлении, преимущественно перпендикулярном действию максимальных сжимающих напряжений (рисунок 1.3). Данный вид разрушения в основном проявляется в породах весьма прочных (величина прочности в условиях одноосного сжатия 100 МПа и более), от монолитных до слаботрециноватых, в высоконапряженных породных массивах. В негидростатическом поле напряженного состояния хрупкое разрушение проявляется в виде Λ -образного локального участка разрушения пород (общераспространенным названием является V-образный участок [16,27], однако в использовании « Λ » кроется учет направления развития зоны хрупкого разрушения – снизу вверх). В окрестности данного участка породы обычно находятся в устойчивом состоянии.

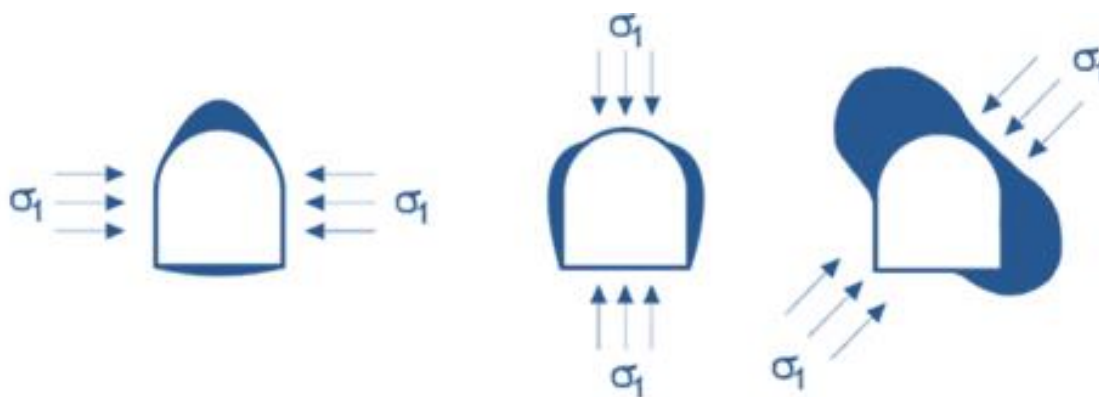


Рисунок 1.3 – Формы и участки разрушения контура горной выработки в зависимости от направления действия наибольших главных напряжений

Формирование таких Λ -образных зон характерно как для протяженных участков, так и на сопряжениях горных выработок для условий апатит-нефелиновых месторождений (рисунок 1.4). Зоны формируются преимущественно в кровле горных выработок, размеры их варьируются, что предположительно связано как непосредственно с геомеханическим состоянием породного массива, так и с формой и размерами горных выработок.



а)



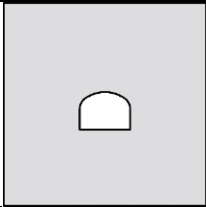
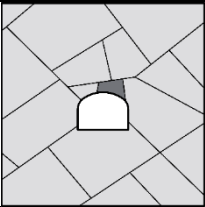
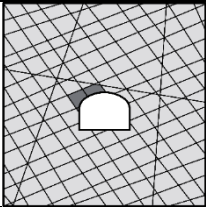
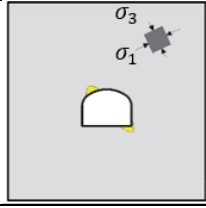
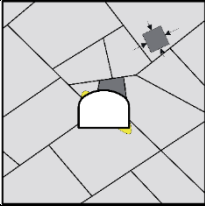
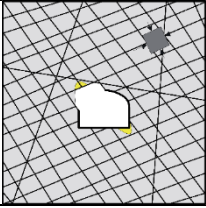
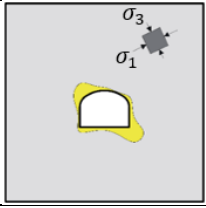
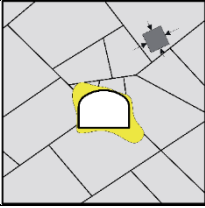
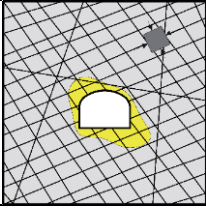
б)



в)

Рисунок 1.4 - Характерные картины хрупкого разрушения пород на протяженном участке выработки (а); на участках сопряжения горизонтальных горных выработок (б, в)

Таблица 1.1 - Формы потери устойчивости горных выработок [101,105]

Характеристика напряженного состояния породного массива	Характеристика породного массива по трещиноватости		
	Массивный ($RMR > 75$)	Средне трещиноватый ($50 > RMR > 75$)	Сильнотрещиноватый ($RMR < 50$)
Слабонапряженный $\frac{\sigma_1}{\sigma_c} \leq 0.15$			
	Линейный отклик породного массива	Возможно выпадение или соскальзывание блоков породы под собственным весом	Высыпание блоков породы из породного массива в выработку
Средненапряженный $0.15 < \frac{\sigma_1}{\sigma_c} < 0.4$			
	Хрупкое разрушение породы в приконтурной области	Локальное хрупкое разрушение породы в приконтурной области с последующим деформированием породного массива за счет смещения блоков относительно друг друга	Локальное хрупкое разрушение породы с последующим обрушением породных блоков по поверхностям ослабления
Высоконапряженный $\frac{\sigma_1}{\sigma_c} > 0.4$			
	Хрупкое разрушение породы в окрестности обнажения, которое может охватывать значительные области породного массива	Хрупкое разрушение породы в окрестности обнажения с последующим смещением блоков относительно друг друга	Деформирование породного массива как пластического тела, сопровождающееся значительными деформациями породного контура

Отмечено, что на участках сопряжений горных выработок форма зоны хрупкого разрушения более пологая и проходит не только над его центром, но и смещается в периферийные зоны. Более подробное изучение характера формирования зон хрупкого разрушения для рассматриваемых условий представлено в Главе 2.

1.3 Масштабные уровни структурной нарушенности пород и руд

Структурная нарушенность массива является одним из двух основных факторов, определяющих устойчивость горной выработки.

Массивы горных пород значительно неоднородны и могут содержать структурные нарушения различного масштаба, такие как тектонические разломы, трещины, микроструктурные нарушения. Нарушениями считают любую структурную или геологическую особенность, влияющую на изотропность массива [126].

Апатит-нефелиновые руды являются структурно нарушенными, от средне- до сильнотрещиноватых.

Трещиноватость горной породы определяется пространством между параллельными трещинами и состоянием самих поверхностей ослабления, а также степенью блочности массива и прочими факторами. Наличие трещиноватости, слоистости и сланцеватости прочих дефектов (включений) приводит к возникновению анизотропии в структуре горного массива. Эти особенности могут негативно сказаться на устойчивости массива вплоть до ее потери.

Для оценки структурной нарушенности, имеющей макромасштаб, то есть у которой длина трещин и размер образуемых системами трещин блоков сопоставим с размерами горных выработок, разработано множество методик: нормативная, представленная в СП 91.13330.2012 и СП 122.13330.2012, методика О.В. Тимофеева [89], методика Дира [112], рейтинговая классификация Бенявского [106,107]. Основные подходы сведены в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 - Основные рейтинговые системы оценки структурной нарушенности породного массива

Наименование классификации	Автор и дата	Страна	Область применения
Rock Load	Terzaghi, 1946	США	Тоннели со стальной крепью
Stand-up time	Lauffer, 1958	Австрия	Тоннели
NATM	Pacher, 1964	Австрия	Тоннели
Rock quality design (RQD)	Deere, 1972	США	Тоннели
RSR concept	Wickham, 1972	США	Тоннели

Продолжение таблицы 1.2

Наименование классификации	Автор и дата	Страна	Область применения
RMR (Геомеханическая классификация)	Bieniawski, 1973 Weaver, 1975 Laubscher, 1977 Ghose и Raju, 1981 Morenko Tallon, 1982 Kendorski, 1983 Nakao, 1983 Serafim и Pereira, 1983 Gonzalez de Vallejo, 1983 Unal, 1983 Romana, 1985 Newman, 1985 Sandbak, 1985 Smith, 1986 Venkateswarlu, 1986 Robertson, 1988	Южная Африка Южная Африка Южная Африка Индия Испания США Япония Португалия Испания США Испания США США США Индия Канада	Тоннели, рудники, карьеры, основания фундаментов Рудники Рудники Выветривания Угольные шахты Тоннели Рудники в прочных породах Тоннели Фундаменты Тоннели Устойчивость кровли Устойчивость откосов Угольные шахты Устойчивость скважин Угольные шахты Устойчивость откосов
Q-system (Q-system extensions)	Barton, 1983 Kirsten, 1982 Kirsten, 1983	Норвегия Южная Африка Южная Африка	Тоннели, камеры Устойчивость обнажений Тоннели
Strenght-size	Franklin, 1975	Канада	Тоннели
Basic geotechnical description	International Society for Rock Mechanics, 1981	-	-
Unified Classification	Williamson, 1984	USA	-

Геомеханическая классификация породного массива Q [98] может быть использована для оценки устойчивости породных обнажений в различных горно-геологических условиях. На основании полученной величины рейтингового показателя можно предварительно определить тип крепи и параметры крепи. Величина рассчитывается на основании 6 параметров, характеризующих структурную нарушенность породного массива. Таким образом, классификация Q является эффективным инструментом для описания структурной нарушенности породного массива.

Значение показателя Q изменяется в диапазоне от 0.001 до 1000. Меньшее значение соответствует меньшей устойчивости породного обнажения, в то время как его увеличению говорит о повышении устойчивости породного обнажения. Показатель Q определяется по зависимости (1.1) [98]:

$$Q = \frac{RQD J_r J_w}{J_n J_a SRF'} \quad (1.1)$$

где RQD – индекс качества породы;

J_n – коэффициент учета систем трещин;

J_r – коэффициент шероховатости самой трещины;

J_a – коэффициент изменчивости контактных усилий в трещине;

J_w – коэффициент, учитывающий влияние обводненности трещины на условие контакта по трещине;

SRF – учет коэффициента отношения напряжений в породном массиве, и прочностью породы.

На основании шести параметров, входящих в уравнение, можно количественно определить три основных показателя, определяющих устойчивость породного обнажения в структурно-нарушенной среде:

- RQD/J_n – показатель степени трещиноватости породного массива;

- J_r/J_a – показатель, характеризующий состояние поверхности ослабления;

- J_w/SRF – показатель, характеризующий напряженное состояние породного массива.

На основании источников [100,102] на основе значения показателя Q возможно провести классификацию горной породы – от исключительно высокого качества до крайне низкого, а также предоставить рекомендации по укреплению выработок.

На сегодняшний день на рудниках КФ АО «Апатит» анализ структурных дефектов в массиве осуществляется на основе уровня проявления мелкоблоковой трещиноватости. I_T , что описано в регламентирующих документах предприятия, таких как «Инструкция по креплению и управлению кровлей...». Показатель интенсивности трещиноватости I_T определяется на основании массовых измерений параметров сети трещин в конкретной горной выработке по зависимости (1.2):

$$I_T = \frac{n_1}{L_1} + \frac{n_2}{L_2}, \quad (1.2)$$

где L_1, L_2 - длины интервала при измерениях по стенке и в кровле, м;

n_1, n_2 - число трещин всех систем на измеренных интервалах в стенке и в кровле, штук.

По интенсивности мелкоблоковой трещиноватости вмещающие породы и руды подразделяются на пять категорий в соответствии с таблицей 1.3.

Таблица 1.3 - Классификация пород и руд апатит-нефелиновых месторождений по интенсивности трещиноватости

Категория	Качественная характеристика пород и руд по трещиноватости	Интенсивность трещиноватости I_T , шт./пог. м
1	Монолитные	1
2	Слаботрещиноватые	2-5
3	Среднетрещиноватые	6-10
4	Сильнотрещиноватые	11-15
5	Раздробленные и перемятые (разрушенные)	>15

Современный мировой и отечественный опыт внедрения и применения методов оценки структурной нарушенности указывает, что для условий рудников КФ АО «Апатит» наиболее полно оценка структурной нарушенности породного массива может быть выполнена на основании рейтинговой системы RMR или рейтинговой системы Q.

Однако в данной диссертационной работе рассматривается хрупкое разрушение породных и рудных массивов; а оно в первую очередь определяется микроструктурой пород и руд. Микронарушения оказывают влияние на механическое поведение породы под нагрузкой [68], при этом невооруженным глазом не прослеживаются, но отчетливо видны в шлифах пород (рисунок 1.5).

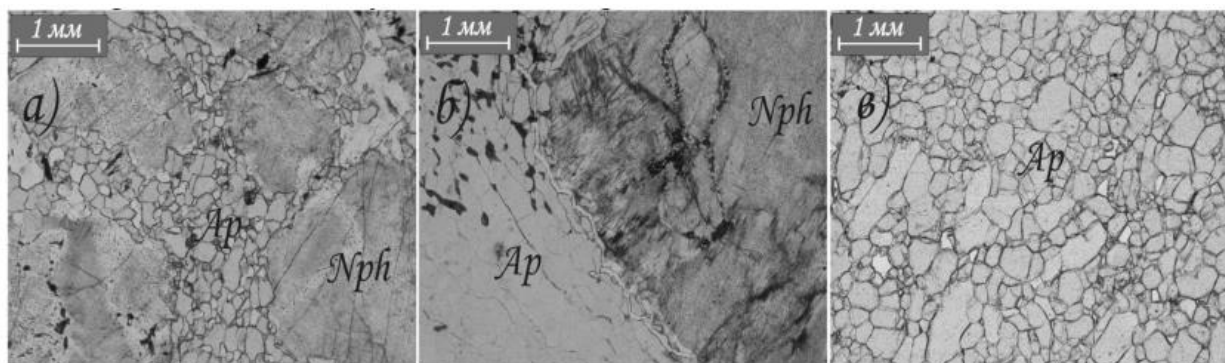


Рисунок 1.5 - Микроструктура образцов различных видов апатитовой руды [12]

Учет микроструктуры пород при оценке устойчивости представлен в работах А.Г. Оловянного [55,56], Z.P. Bazant [103], O.C. Zenkiewicz [139], Y. Zhao [140], F. Homand [116,117], и др. В данных исследованиях подчеркивается общий подход к анализу процессов деформации, происходящих на микроструктурных площадках, расположенных под углом относительно основных осей. При этом деформации, зафиксированные на макроструктурном уровне, представляют собой результат сложения микроуровневых деформаций в соответствии с определенной закономерностью. В диссертационной работе получен подход к учету микроструктуры руд при оценке развития хрупкого разрушения. Более подробно данный процесс и подбор параметров описан в Главе 2.

1.4 Анализ результатов натуральных наблюдений за развитием геомеханических процессов в окрестности горных выработок

Разрушение хрупкого породного массива в окрестности горной выработки проявляется обычно в виде шелушения или отслаивания породы, в результате чего формируется Λ -образная зона. Разрушение может иметь как монотонный, квазистатический, так и динамический характер вплоть до горного удара.

Размеры зон хрупкого разрушения варьируются от нескольких сантиметров до нескольких метров [35]. На параметры зоны разрушения оказывает влияние начальное напряженное состояние, соотношение между главными максимальными и минимальными нормальными напряжениями и форма поперечного сечения горной выработки.

Натурные наблюдения за формированием зон хрупкого разрушения пород показали, что микросейсмические события проявляются сразу же за продвижением забоя горной выработки, то есть в породном массиве формируются трещины [75,79]. В зависимости от интенсивности проявления горного давления, на контуре горных выработок формируется шелушение пород, заколообразование или обрушение, которое сопровождается геодинамическими процессами. Некоторые данные о формировании зоны хрупкого разрушения согласно имеющимся научным источникам сведены в таблицу 1.4 [25,30].

Таблица 1.4 - Результаты натуральных наблюдений за формированием зон хрупкого разрушения в окрестности горных выработок

Наименование породы	$\frac{R_f}{a}$	$\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$	σ_3 , МПа	$\sigma_{c,i}$, МПа
Блочный андезит	1.3	1.92	15.3	100
	1.5	2.07	14.8	100
	1.4	2.03	14.7	100
	1.5	2.10	16.3	100
	1.5	2.03	15.4	100
	1.6	2.09	15.8	100
Массивный кварцит [Ortlepp and Gay (1984)]	1.8	2.15	65	350
	1.7	2.15	65	350
	1.4	1.86	60	350
	1.5	1.86	60	350
Слоистый кварцит [Stacey and de Jongh (1977)]	1.4	3.39	15.5	250
	1.3	3.39	15.5	250
Массивный гранит [Martin et al. (1994)]	1.5	5.36	11	220
	1.4	5.36	11	220
	1.4	5.36	11	220
	1.3	5.36	11	220
	1.3	5.36	11	220
	1.0	3.7	11	220
Массивный гранит [Martin (1989)]	1.1	1.31	40	220
Аргиллит [Pelli et al. (1991)]	1.4	2.00	5	36
	1.08	1.69	20	151

Продолжение таблицы 1.4

Наименование породы	$\frac{R_f}{a}$	$\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$	σ_3 , МПа	$\sigma_{c,i}$, МПа
Напластования известняка [Jiayou et al. (1989)]	1.1	1.30	12.1	80
Напластование кварцитов [Kirsten and Klokow (1979)]	1.0	1.69	21	217

Примечание: R_f – расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения; a – эквивалентный радиус выработки; σ_1 – главные максимальные нормальные напряжения нетронутого породного массива; σ_3 – главные минимальные нормальные напряжения нетронутого породного массива; $\sigma_{c,i}$ – предел прочности при одноосном сжатии образца ненарушенной горной породы.

При индексе Бартона Q более 2 и при значительных величинах напряжений, действующих в массиве ($\sigma_1/R_{сж}$ более 0.2) зафиксированы следующие проявления ожидаемых геомеханических процессов:

- хрупкое разрушение пород, сопровождающееся смещениями по существующим поверхностям ослабления. Разрушение пород реализуется в квазистатическом режиме.

- шелушение или стреляние породы средней интенсивности, с раскалыванием и последующим отслоением породы от породного массива. Формирование зоны хрупкого разрушения пород может происходить как в квазистатическом режиме (смещение породного контура), так и в динамическом режиме (в виде выброса породной массы из зоны хрупкого разрушения);

- интенсивное стреляние и динамическое заколообразование сразу за проходкой. Может сопровождаться низкоэнергетическим горным ударом. Хрупкое разрушение пород сопровождается интенсивным увеличением их объема;

- наблюдается высокоэнергетический горный удар и мгновенное динамическое деформирование породного массива сразу после обнажения. Размер зоны хрупкого разрушения максимальный.

Обработка результатов натурных наблюдений за развитием зон хрупкого разрушения в окрестности выработок (рисунок 1.6, б) позволила установить следующую линейную зависимость, которая позволяет определить усредненный размер этой зоны для различных горно-геологических условий (1.3):

$$\frac{R_f}{a} = 0.49(\pm 0.1) + 1.25 \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{c,i}}; \quad (1.3)$$

$$\sigma_{max} = 3\sigma_1 - \sigma_3.$$

Тогда абсолютный размер зоны разрушенной породы l_f может быть определен по формуле (1.4):

$$l_f = R_f - a. \quad (1.4)$$

Графическое пояснение данной зависимости приведено на рисунке 1.6.

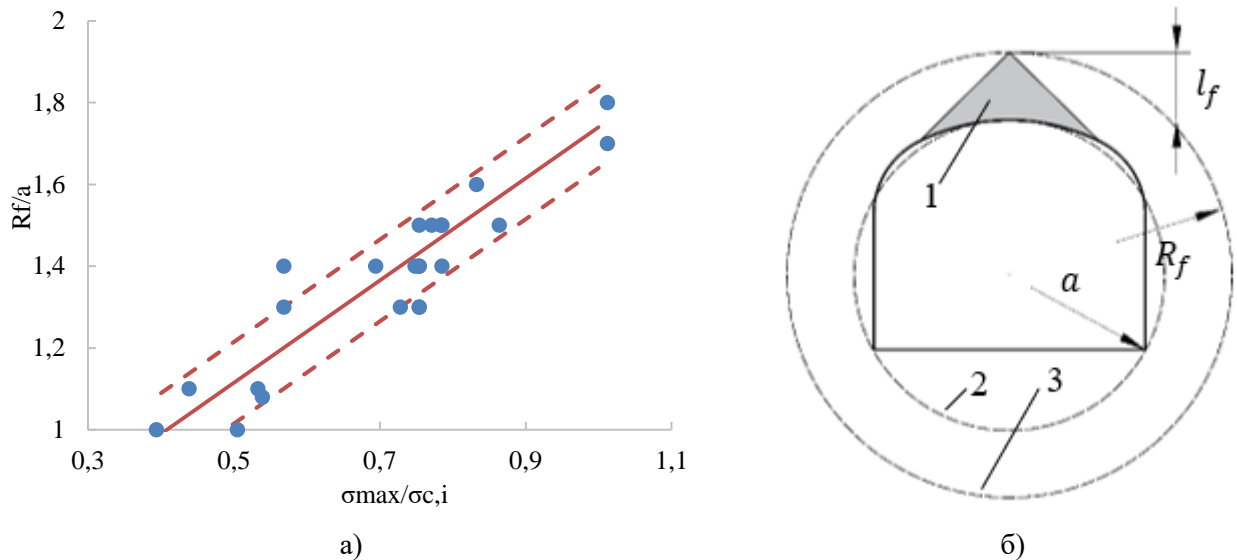


Рисунок 1.6 - Диаграмма взаимосвязи между напряженным состоянием породного массива, прочностью породного массива и размеров зоны хрупкого разрушения по результатам натурных замеров зоны хрупкого разрушения (а); схема формирования зоны хрупкого разрушения (б); 1 – зона хрупкого разрушения; 2 – граница эквивалентного радиуса; 3 – граница радиуса зоны хрупкого разрушения

Для уточнения представленных зависимостей в рамках диссертационной работы разработана методика проведения комплексных исследований развития геомеханических процессов в окрестности горных выработок на подземных рудниках КФ АО «Апатит», а также проведен комплекс исследований по настоящей методике, результаты этих работ изложены в Главе 2.

1.5 Анализ методов оценки устойчивости горных выработок

При проектировании и строительстве горных выработок важен прогноз устойчивости пород, который заключается в предварительном отнесении пород к одной из категорий устойчивости.

Одним из самых распространенных методов определения устойчивости горных выработок является условие, при котором максимальные напряжения, воздействующие на контур, достигают предельных значений для конкретных пород (прочностной критерий устойчивости).. В этом контексте также активно используются критерии, ориентированные на размеры образующихся областей запредельного состояния, остаточную прочность, объем деформаций и величины смещений в породном контуре. Эти параметры помогают оценивать устойчивость выработок и предсказывать возможные обрушения. Таким образом, анализ данных факторов является ключевым при разработке надежных и эффективных критериев для обеспечения безопасности горных работ и предотвращения негативных последствий, связанных с изменениями в геологической среде. Такой подход способствует более глубокому пониманию

поведения горных массивов и позволяет минимизировать риски, связанные с проведением горных выработок в сложных условиях.

Для горных предприятий характерна потеря устойчивости выработок по разным причинам ввиду широкой вариативности литологии вмещающих пород и различных горнотехнических условий [19,21,33]. Поэтому, для условий каждого предприятия разрабатывают локальные критерии, назначая один из критериев устойчивого состояния конкретным характеристикам массива.

Подобный подход позволяет разработать классификацию породных массивов по устойчивости, которые становятся основой разработки мероприятий по обеспечению устойчивого состояния горных выработок.

Конкретные условия строительства горных выработок требуют разработки или адаптации методики оценки их устойчивости. Но на этапе анализа в общем виде она может быть представлены следующим образом (таблица 1.5).

Таблица 1.5 - Общая классификация пород по устойчивости

Категория	Качественная оценка степени устойчивости	Общая характеристика состояния пород		
		Склонных к вывалообразованию	Склонных к разрушению	Склонных к вязкопластическому течению
I	Вполне устойчивые	Вывалы и отслоения отсутствуют	Разрушение отсутствует	Смещение пород до 10 мм
II	Устойчивые	Возможные отдельные незначительные отслоения пород	Возможны неупругие деформации без разрушения, возникновение технологической трещиноватости	Смещение пород до 50 мм
III	Средней устойчивости	Возможно образование вывалов как правило, из кровли выработок	Образование локальных зон разрушения	Смещения пород до 20 см
IV	Неустойчивые	Образование вывалов вскоре после обнажения пород, возможно образование вывалов в боках выработки	Зона разрушения охватывает большую часть сечения выработки	Смещения пород до 50 см
V	Весьма неустойчивые	Обрушение пород вслед за обнажением	Интенсивное развитие зоны разрушения, охватывающий весь контур сечения выработки. Пучение почвы выработки	Высокая скорость смещения породного контура

Оценка устойчивости горных выработок по фактору достижения напряжениями предела прочности пород является одним из наиболее распространённых подходов [44,59]. В качестве условий прочности пород обычно принимается соотношение прочности пород к действующим напряжениям. При этом критерии оценки устойчивости пород учитывают такие аспекты как: влияние структурной нарушенности пород, длительной прочности пород, особенностей формирования напряженного состояния в окрестности горной выработки определенной формы, а также соотношения между величинами напряжений. Сама же оценка устойчивости выполняется качественно, без привязки к особенностям формирования зоны хрупкого разрушения, то есть не позволяет определить количественные ее показатели.

Количественную характеристику динамических проявлений в ходе натурных исследований произвести не представляется возможным, так как характеристика и интенсивность проявлений в значительной степени зависит от отпора крепи, а также напряженно-деформированного состояния массива. А в условиях динамических проявлений горного давления проводить результаты замеров напряженно-деформированного состояния небезопасно, поэтому количественную характеристику необходимо определять в ходе аналитических и численных расчетов.

Стоит отметить, что данный подход является наиболее используемым в мировой практике. Так, в работе Хока и Брауна [119] на основании рассмотрения опыта строительства и эксплуатации горных выработок в породах, склонных к хрупкому разрушению, представлена классификация устойчивости горных выработок (таблица 1.6).

Таблица 1.6 - Классификация устойчивости породного обнажения

Соотношение $\frac{\sigma_1}{\sigma_{c,i}}$	Характер разрушения	Натурные наблюдения
менее 0.1	Выработка устойчива, повреждения породного массива в приконтурной области отсутствуют, крепление по фактору напряженного состояния не требуется.	
0.2	Наблюдается незначительное отслоение породной массы в приконтурной области, требуется легкая ограждающая крепь.	
0.3	Значительное отслоение породной массы в приконтурной области, требуется поддерживающая крепь со средней несущей способностью.	

Продолжение таблицы 1.6

Соотношение $\frac{\sigma_1}{\sigma_{c,i}}$	Характер разрушения	Натурные наблюдения
0.4	Выработка неустойчива, требуется крепь со значительной несущей способностью для поддержания ее устойчивости.	
0.5 и более	Обеспечить устойчивость горной выработки очень сложно, обычно требуется комбинированная крепь с высокой несущей способностью.	

С учетом структурной нарушенности пород и действующих в породном массиве напряжений можно выделить следующие категории состояния горных выработок (таблица 1.7). На основании принятой классификации геомеханического состояния породного массива выполняется оценка интенсивности проявления геомеханических процессов как на стадии строительства горной выработки, так и на стадии воздействия на нее горных работ.

Оценка устойчивости горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» выполняется исходя из соотношения величин действующих сжимающих напряжений на контуре выработок и предела прочности пород на сжатие и условий эксплуатации выработок, согласно регламентирующей документации предприятия. На рудниках КФ АО «Апатит» можно выделить характерные формы проявления горного давления в зависимости от действующих напряжений, представленные в таблице 1.8.

Таблица 1.7 - Классификация категорий состояния горных выработок

Категория состояния выработок	Категория по устойчивости			Форма проявления горного давления
	В устойчивых породах	В среднеустойчивых породах	В слабоустойчивых породах	
А	$\sigma_d \leq 0.3\sigma_c$	не характерна	не характерна	Выработка сохраняет устойчивость (разрушения и отслоений не наблюдается)
Б	не характерна	$0.3 < \sigma_d \leq 0.5\sigma_c$ в породах 4, 5 категории по трещиноватости		Вывалы по трещинам

Продолжение таблицы 1.7

Категория состояния выработок	Категория по устойчивости			Форма проявления горного давления
	В устойчивых породах	В среднеустойчивых породах	В слабоустойчивых породах	
В	$0.3 < \sigma_d \leq 0.5\sigma_c$ в породах 1-4 категории по трещиноватости		не характерна	Постепенное хрупкое разрушение пород на контуре в виде шелушения, незначительного динамического заколообразования и плитчатого расслоения пород, отслоение по трещинам
Г	$0.5 < \sigma_d \leq 0.7\sigma_c$ в породах 1-4 категории по трещиноватости		не характерна	Интенсивное шелушение, динамическое заколообразование
Д	$\sigma_d > 0.7\sigma_c$ в породах 1-3 категории по трещиноватости		не характерна	Стреляние и интенсивное динамическое заколообразование, возможны микроудары и горные удары

Таблица 1.8 - Характеристика проявлений горного давления в зависимости от напряженного состояния массива

Показатель напряженного состояния	Проявления горного давления
$\sigma_d \leq 0.3\sigma_c$	Массив не разрушается, т.е. сохраняет длительную устойчивость в породах 1 категории по устойчивости или разрушается в виде вывалообразования в породах 2 и 3-й категорий по устойчивости
$0.3\sigma_c < \sigma_d \leq 0.5\sigma_c$	Массив постепенно хрупко разрушается на контуре в виде шелушения и плитчатого расслоения пород, отслоения по трещинам
$0.5\sigma_c < \sigma_d \leq 0.7\sigma_c$	Разрушается в виде стреляния пород, динамического заколообразования, интенсивного шелушения пород
$\sigma_d > 0.7\sigma_c$	Массив разрушается в виде интенсивного стреляния пород и динамического заколообразования, микроударов и горных ударов

В ходе исследований в рамках диссертационной работы на основе натуральных данных более точно определены зависимости устойчивого состояний горных выработок от горно-геологических и горнотехнических условий рудников, а также разработаны критерии оценки устойчивого состояния горных выработок.

1.6 Оценка подходов к определению размеров зон хрупкого разрушения

Оценка размеров зоны хрупкого разрушения пород является важной задачей, по результатам которой разрабатываются мероприятия по приведению горной выработки в безопасное состояние и выполняется обоснование параметров ее крепления.

На основании выполненных натурных исследований Kaiser [109,113] установил эмпирическую связь между размером зоны хрупкого разрушения и геомеханическим состоянием породного массива. В последующем данные, полученные им, были дополнены, что позволило получить более представительную картину формирования зоны хрупкого разрушения для более широкого диапазона условий. Полученная эмпирическая зависимость достаточно хорошо позволяет спрогнозировать размер зоны хрупкого разрушения для диапазона изменения относительного показателя напряженного состояния σ_{max}/R_c (отношение максимальных напряжений на контуре выработки σ_{max} к прочности пород на сжатие R_c) от 0.4 до 1.0. Схожие результаты были получены и при проведении горных выработок КФ АО «Апатит», что отражено в «Инструкции по креплению и управлению кровлей...».

Согласно «Инструкции по креплению и управлению кровлей...», зона хрупкого разрушения пород (зона отжима) определяется как участок приконтурной части выработки, где нарушенность, внешне напоминающая динамическое заколообразование, обусловлена действием растягивающих напряжений или деформаций.

Наличие и вид разрушений приконтурного массива (напряженное состояние массива) зависят от соотношения величин действующих сжимающих напряжений на контуре выработок (σ_d) и предела прочности пород на сжатие (σ_c) и условий эксплуатации горных выработок.

При этом выбор крепи основывается на величине нарушенной зоны. Размер нарушенной зоны для выработок и сопряжений выработок всех категорий определяется по формуле (1.5):

$$h_n = 0.02(7.5 + I_T + 2K_c + 6.5B)K_y, \quad (1.5)$$

где I_T – интенсивность трещиноватости, шт/м;

K_c – показатель, характеризующий категорию состояния горной выработки;

B – пролет (ширина) выработки, для сопряжений – пролет наибольшей из выработок;

K_y – показатель, характеризующий условия эксплуатации выработки и геометрические особенности сопряжений.

Аналитические методы прогноза зон хрупкого разрушения пород к окрестности горных выработок не получили распространение на практике. Представленные аналитические решения [53] ограничивались выработками кругового поперечного очертания, расположенными в гидростатическом поле напряженного состояния. То есть эти решения нельзя распространить на выработки прямоугольно-сводчатого поперечного сечения, которые традиционно используются

при разработке апатит-нефелинового месторождений, а также на геомеханические условия, когда одна из компонент главных нормальных напряжений значительно превышает значение второй, что как раз является характерным для условий проведения горных выработок в породах, склонных к хрупкому разрушению. Вторым существенным недостатком данных решений является привязка только одного из показателей пластичности горной породы к величине объемных пластических деформаций или деформаций формоизменения, что не позволяет корректно воспроизвести механизм формирования зоны хрупкого разрушения.

Альтернативным методом прогноза размера зоны хрупкого разрушения является использование методов численного моделирования, которые хорошо зарекомендовали себя при решении различных типов задач геомеханики [26]. Несколько различных подходов было предложено исследователями для прогноза таких зон. Первые из них основаны на методах сплошной среды [83], в то время как вторые оперируют изначально сплошной средой, в которая постепенно по мере накопления повреждения становится квазидискретной [9]. Для прогноза зон предельного состояния в окрестности породных обнажений нашли широкое применение упругопластические модели среды, основанные как на условии пластичности Кулона-Мора [121], так и других более пригодных для описания прочности горных пород условиях пластичности, например, условие пластичности Хока-Брауна [119], Ставрогина [70] и других нелинейных критериях прочности.

Геомеханическая модель упругопластической среды реализована практически во всех программных комплексах для выполнения численного моделирования геомеханических процессов [26,83], что позволяет решать практические задачи с учетом тех особенностей поведения среды, которые заложены в данную модель.

Критерий прочности горной породы Хока-Брауна в главных напряжениях имеет вид (1.6):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^a, \quad (1.6)$$

где σ_1' - предельное значение максимальных главных напряжений;

σ_3 – главное минимальное напряжение;

m_i – показатель форму огибающей прочности горной породы;

σ_{ci} – прочность на одноосное сжатие горной породы.

Представленный выше критерий подходит только для прогноза зоны хрупкого разрушения, вызванного раскалыванием породы в зоне малого всестороннего обжатия, и не может быть использован для прогноза формирования трещин отрыва, вызванных чистым растяжением.

Однако, как показал опыт применения критерия, формирования напряженно-деформированного состояния породного массива, размер зоны предельного состояния,

получаемый при моделировании, не совпадал с фактическими размерами зон хрупкого разрушения пород в окрестности горных выработок.

Последующие исследования позволили разработать ряд подходов, позволяющих в значительной степени повысить достоверность прогнозных значений. Так, в следующих работах [127-128] процесс хрупкого разрушения пород показан как постепенное снижение показателя сцепления пород, вызванный формированием микротрещин на начальной стадии нагружения и мобилизации величины угла внутреннего трения по мере исчерпания прочности цементационных связей.

Таким образом, прогноз напряженного состояния должен основываться на моделях упрочняющейся / разупрочняющейся среды, где показатели величин сцепления или угла внутреннего трения задаются в виде функциональной зависимости от достигнутой величины пластических деформаций. Также исследователями предложен альтернативный подход к формулировке модели деформирования хрупкого разрушения среды. В данном случае в качестве условия пластичности принято условие Хока-Брауна, где поверхность пластического может принимать две формы, одна из которых соответствует допредельной стадии деформирования, а вторая стадия, остаточной прочности пород, переход между которыми происходит мгновенно после достижения предела прочности породы. Таким образом, модель позволяет воспроизводить упругое идеально-хрупкое поведение горных пород. Как было показано авторами работы, такой подход позволяет также получить хорошую сходимость с результатами натурных наблюдений.

Дальнейшие исследования позволили уточнить методы определения параметров моделей хрупкого разрушения пород, а также подходы к подготовке численных моделей для прогноза зон хрупкого разрушения пород в окрестности породных обнажений [34,35].

1.7 Выводы по Главе 1

Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, посвящены изучению развития геомеханических процессов, в результате которых формируется зона хрупкого разрушения вокруг выработок в высоконапряженных массивах.

Интенсивность проявления данных геомеханических процессов определяется величиной напряженного состояния породного массива и соотношением между главными компонентами напряжений, а также механическими характеристиками пород, слагающих породный массив.

Описан принципиальный механизм формирования зоны хрупкого разрушения. При благоприятных условиях разрушения горных пород не происходит, а формируется развитие локальных микротрещин в породном массиве. По мере увеличения напряжений происходит прорастание микротрещин, и порода начинает отслаиваться от контура выработки в квазистатическом режиме. Зоны хрупкого разрушения приурочены к участкам концентрации

напряжений и редко на практике охватывают весь контур выработки, формируя Λ -образную зону обрушения в кровле. При неблагоприятных условиях процесс хрупкого разрушения может сопровождаться геодинамическими процессами – от шелушения пород в приконтурной области до горного удара.

Таким образом, процесс хрупкого разрушения породы – это процесс, который включает формирование трещин отрыва, совпадающих с направлением развития максимальных тангенциальных напряжений. Данный процесс должен быть детально изучен.

Анализ научных работ и существующих нормативных документов показал, что существующие методы прогноза зон хрупкого разрушения посвящены их формированию в окрестности одиночных протяженных горных выработок и не рассматривают вопросы формирования зон хрупкого разрушения на участках сопряжений горных выработок.

Анализ возможных форм потери устойчивости породного обнажения позволяет заключить, что единая методика сложна с математической точки зрения и требует избыточное количество геомеханических показателей. Методика должна создаваться для конкретных горно-геологических условий апатит-нефелиновых месторождений; должна быть уточнена и упрощена на основании натурных изысканий и математического моделирования, что позволит эффективнее обосновывать параметры мероприятий по обеспечению устойчивости горных выработок.

Таким образом, в диссертационной работе поставлены следующие задачи:

1. Проведение натурных наблюдений за формированием и развитием геомеханических процессов в породном массиве в окрестности горных выработок и их сопряжений на рудниках КФ АО «Апатит».
2. Обоснование модели деформирования и разрушения горных пород для породных массивов, склонных к хрупкому разрушению.
3. Исследование развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок на основании применения численного моделирования.
4. Разработка методики прогноза зон хрупкого разрушения в окрестности выработок, расположенных в высоконапряженных породных массивах для условий рудников КФ АО «Апатит».

Актуальной задачей является изучение закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния высоконапряженного массива горных пород для условий месторождений апатит-нефелиновых руд и повышение достоверности прогноза устойчивости выработок.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗВИТИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ВЫСОКОНАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ

2.1 Общие положения

Диссертационная работа посвящена повышению достоверности прогноза устойчивости выработок за счет выявления зависимостей изменения напряженно-деформированного состояния высоконапряженного массива горных пород и обоснование зависимости формирования зоны хрупкого разрушения вокруг выработок и их сопряжений.

В Главе 1 проанализированы формы потери устойчивости и факторы, приводящие к ним, для условий апатит-нефелиновых месторождений. Анализ произведен на основании изучения научно-технической литературы, а также данных исследований специализированных организаций непосредственно для условий рудников КФ АО «Апатит». Основные формы и факторы можно обобщить следующим образом:

- геодинамические факторы приводят к процессам шелушения, динамического заколообразования и стреляния пород;

- в зоне влияния очистных работ крепь горных выработок и приконтурный слой породного массива подвергаются потере сплошности (появление трещин, отслоения и другое), следовательно, снижается их несущая способность;

- в слабоустойчивых трещиноватых породах, а также в переходных зонах происходят вывалообразования по естественной трещиноватости и дополнительной нарушенности (образующейся при проходке выработок и ведении очистных работах), которые при отсутствии своевременных мер приводят к образованию «куполов» значительной величины, постепенно увеличивающихся во времени;

- еще одним фактором, приводящим к потере устойчивости выработок, является наличие геологических включений в породном массиве (дайки, жилы и другие) в таких случаях в выработках происходит обрушение горных пород по контурам, описывающих включение или, зачастую, несколько включений, имеющих взаимное влияние или пересечение.

Наиболее сложным в понимании причин и прогнозировании потерь устойчивости являются ситуации, в которых перечисленные выше факторы накладываются друг на друга и на сопряжениях большепролетных выработок. Так, на рисунке 2.1 показан участок горной выработки на Расвумчоррском руднике, на устойчивость которого одновременно влияет несколько осложняющих факторов: сильнотрещиноватый (слоистый) массив с геологическими включениями повышенные концентрации напряжений и как следствие проявление динамических процессов в приконтурном слое; также в дальнейшем выработка попадет в зону влияния очистных работ.



Рисунок 2.1 - Участок горной выработки в сложных геологических и геодинамических условиях.

Статистическая обработка зафиксированных на рудниках форм потерь устойчивости показывает, что более 60 % потерь устойчивости выработок связаны с одновременным действием повышенных напряжений, сильной трещиноватостью и влиянием очистных работ. В 20 % случаях потеря устойчивости связана с проходкой выработок в слабоустойчивых и трещиноватых массивах. В остальных случаях причиной нарушений крепи и вывалов является дополнительное раскрытие трещин и перемещения массива от влияния очистных работ и наличие геологических включений в породный массив.

Натурные исследования, представленные в данной главе, направлены на оценку взаимосвязи размеров зон хрупкого разрушения в окрестности горных выработок с факторами, влияющими на устойчивость выработок:

- с размерами горной выработки и от геометрии выработок в целом;
- с напряженным состоянием массива;
- с прочностью и структурной нарушенностью массива вокруг горной выработки.

Для изучения формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок проведены инструментальные измерения в виде маркшейдерской съемки на участках формирования зон хрупкого разрушения пород, а также исследование методом акустической эмиссии. Инструментальные замеры выполнялись в Т-образных и Y-образных сопряжениях горных выработок на различных горизонтах Кировского рудника, расположенных как в уртилах, так и в ийолитах. Выработки закреплены набрызгбетонной крепью толщиной 5 см, что не вносило существенное влияние в результаты замеров.

2.2 Горно-геологические условия проведения горных выработок на рудниках

КФ АО «Апатит»

Диссертационная работа выполнена для условий Хибинских апатит-нефелиновых месторождений. Хибинский массив слагают: апатит-нефелиновые руды, ийолит-уртиты, хибиниты, рисчорриты, лявочорриты и другие породы, относящиеся к семейству нефелиновых сиенитов.

Абсолютные отметки рельефа составляют 300-700 м, относительные превышения достигают 400 м. Месторождения характеризуются сложным строением, изменчивыми отдельными мощностями рудных тел с разными параметрами залегания. Рудные залежи чаще представлены многослойными рудными зонами, которые могут быть разделены разделены безрудными толщами трахтоидных ийолит-уртитов и рисчорритов мощностью до нескольких сотен метров.

Горные выработки проходятся в крепких скальных породах: трахтоидных хибинитах, рисчорритах, урритах, ийолитах, ювитах и в апатит-нефелиновых рудах. Вмещающие породы характеризуются наличием окисленных (шпрейуштенизированных) зон и даек с повышенными деформационно-прочностными свойствами.

Трахтоидные хибиниты представляют собой крупнозернистые породы с отчетливой трахтоидностью, обусловленной параллельной ориентировкой крупных зерен полевого шпата.

Рисчорриты подстилают и перекрывают продуктивный комплекс ийолит-уртитов, образуя тела мощностью до десятков метров. Рисчорриты представляют собой крупнозернистые породы, с пойкилитовой структурой, преимущественно состоят из полевого шпата с включениями нефелина, пироксена, сфена. Характерной чертой рисчорритов является преобладание в их составе калиевой составляющей по сравнению с натриевой.

Ийолит-уртиты, ювиты занимают более 40 % объема продуктивной зоны, образуя толщу в верхних и средних слоях продуктивной зоны. Главной особенностью внутреннего строения толщи пород является их расслоенность, проявляющаяся в чередовании слоев и пачек ийолит-уртитового состава и выдержанности разреза на всем протяжении толщи.

Породный массив с точки зрения структурной нарушенности весьма различен. Регион имеет блочное строение. Поле напряженного состояния характеризуется тектоническим характером его начального распределения, где величины наибольших горизонтальных напряжений в несколько раз больше вертикальной компоненты напряжений. Все это позволяет отнести условия разработки месторождений КФ АО «Апатит» к весьма сложным, удароопасным.

Данные о физико-механических свойствах и формах потери устойчивости проанализированы для Юкспорского, Кукисвумчоррского месторождений, а также для месторождений Апатитовый Цирк и Плато Расвумчорр. Анализ физико-механических свойств

пород выполнен на основании изучения материалов лабораторных испытаний, проводимых в различные периоды времени и представленные в основном в отчетах о НИР Санкт-Петербургского горного университета, ГИ КНЦ РАН. В общем можно отметить, что величины деформационных и прочностных характеристик пород весьма высокие. Так, прочностные свойства пород и руд при сжатии изменяются в диапазоне от 60 до 340 МПа [42], а при растяжении – от 5 до 37 МПа.

В целом можно отметить, что степень изученности физико-механических свойств горных пород весьма высокая, а разница между результатами исследований, проводимых разными организациями и исследовательскими группами, хотя и существует, не является принципиальной. Основные параметры механического поведения горной породы, такие как модуль деформации, коэффициент поперечной деформации, прочность на одноосное сжатие и прочность на одноосное растяжение могут быть использованы в качестве первичных данных для последующей оценки как механических свойств породного массива, так и параметров уравнений состояния горной породы и породного массива.

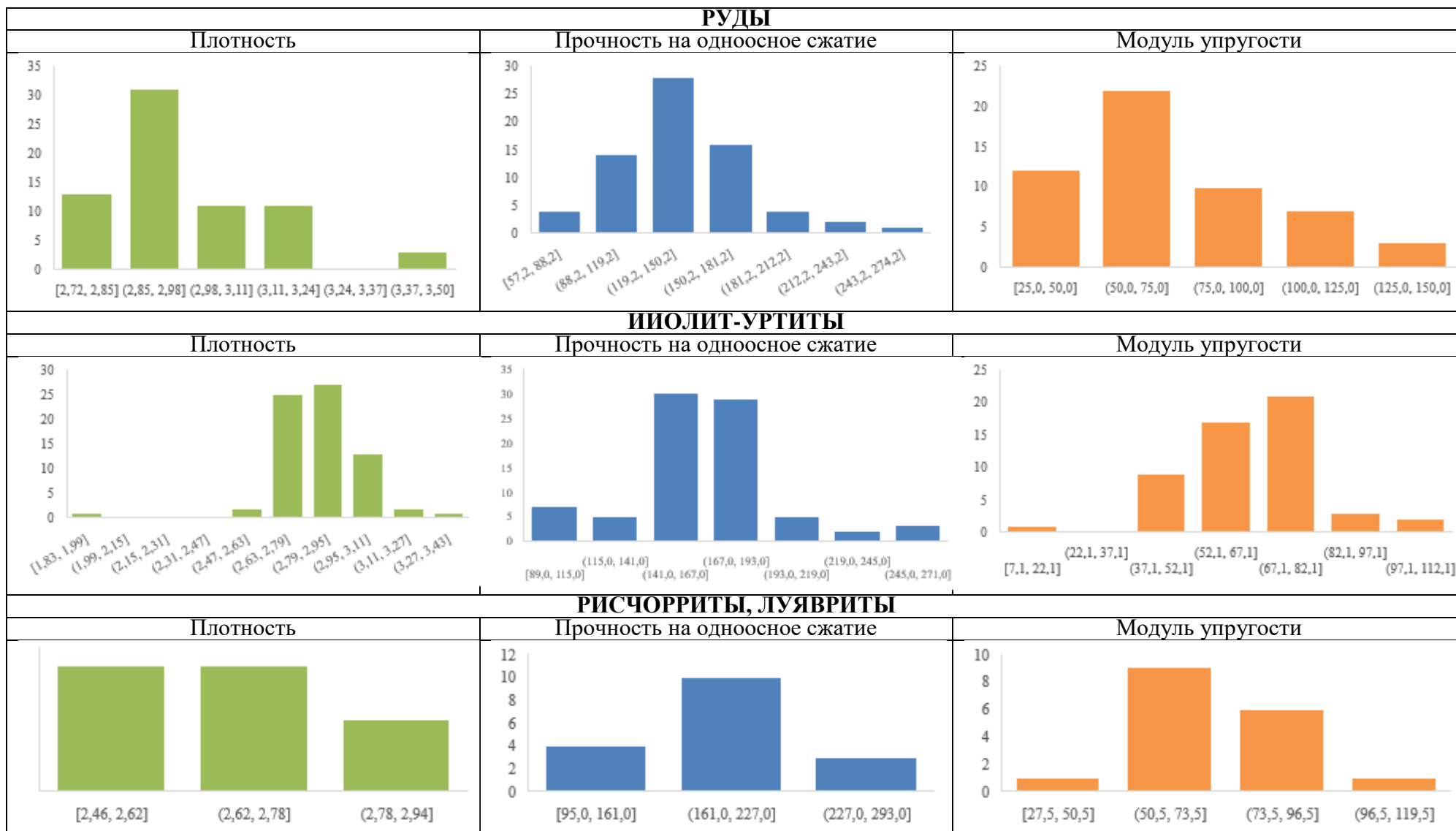
Распределения параметров плотности, прочности на одноосное сжатие и модуля упругости для руд и вмещающих пород усредненно представлены в таблице 2.1.

Механические свойства породного массива не могут быть напрямую ассоциированы с механическими свойствами, полученными по результатам лабораторных испытаний. На прочностные и деформационные свойства породного массива значительное влияние оказывает его структурная нарушенность, которая характеризуется как интенсивностью трещиноватости, так и качеством самих трещин.

Породный массив в значительной степени нарушен и это должно быть учтено при выполнении прогноза устойчивости горных выработок.

По степени трещиноватости вмещающие горные породы и руды на месторождении располагаются в следующем порядке: наиболее трещиноватыми являются массивные уртиты и тонкополосчатые апатитовые руды; затем по степени снижения трещиноватости: уртиты, линзовидно-полосчатые руды, рихчорриты; богатые апатитовые руды; пегматоидные уртиты; мелкозернистые ийолиты являются наименее трещиноватыми.

Таблица 2.1 – Распределение параметров плотности, прочности и модуля упругости для различных литотипов



2.3 Натурные наблюдения за развитием геомеханических и геодинамических процессов в окрестности горных выработок

Проведенные в рамках диссертационной работы натурные наблюдения представляют собой комплекс визуальных и инструментальных методов длительностью 5 лет. Основной целью являлось определение закономерностей формирования зон хрупкого разрушения пород на рассматриваемых месторождениях в окрестности горных выработок и их сопряжений различного поперечного сечения. Исследования включали в себя следующие этапы:

1. Сбор натуральных данных о фактических размерах зон хрупкого разрушения на различных рудниках КФ АО «Апатит» и их сопоставление с параметрами сечения горных выработок.
2. Сбор информации о свойствах вмещающего массива, в первую очередь определение прочности пород по геологическому описанию участков.
3. Оценку напряженного состояния на участках измерений на основе регламентирующей документации предприятия, данных службы прогноза и предотвращения горных ударов, данных локальных измерений напряжений методами торцевой и щелевой разгрузок.

В дальнейшем полученные результаты сравниваются и дополняются данными численного моделирования, что показано в Главе 3.

2.3.1 Методика проведения исследований

Объектом наблюдений является породный (рудный) контур вокруг подземной горной выработки. Основной задачей этапа натуральных исследований является получение и обобщение результатов визуально-инструментальной оценки зон хрупкого разрушения вокруг выработок. На основании полученных результатов могут быть сформулированы основные критерии для разработки расчетных положений прогноза устойчивости горных выработок и выбора параметров крепей.

Определение напряженно-деформированного состояния массива методом визуально-инструментальной оценки зон хрупкого разрушения вокруг выработок принципиально состоит из нескольких этапов (рисунок 2.2).

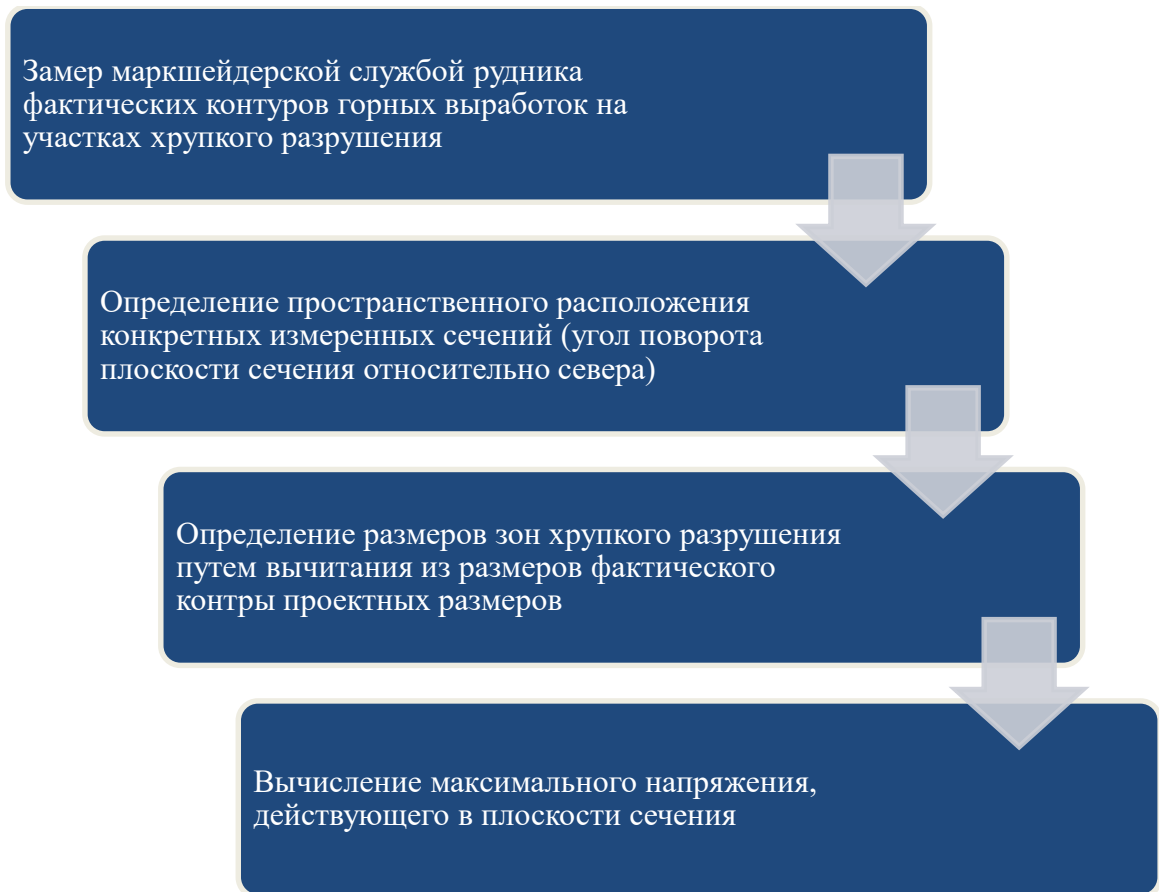


Рисунок 2.2 – Этапы проведения визуально-инструментальной оценки зон хрупкого разрушения

Определение размеров зон хрупкого разрушения в натуральных условиях в общем случае подразумевает под собой следующую последовательность геомеханического анализа:

1. Установление литотипа пород на основании визуального наблюдения, определение механических характеристик пород методами неразрушающего контроля.
2. На основании структурного картирования участка горной выработки установление величины рейтинга Q и выделение направлений основных систем трещин и отдельных трещин.
3. Установление на основании модельного расчета напряженного состояния участка породного массива, характеризуемое величинами трех главных напряжений и ориентацией главных площадок. Напряжения определяются для нетронутого породного массива и после воздействия очистных работ.
4. Определение геологического индекса прочности породы GSI .
5. Установление категории устойчивости горной выработки и назначение модели для прогноза геомеханических процессов в окрестности горной выработки.
6. Оценка интенсивности проявления хрупкого разрушения породы для выбранных участков.

Также проведены исследования, позволившие сделать вывод о том, что на выбор модели прогноза геомеханических процессов в окрестности горной выработки (между моделью хрупкого

разрушения породы и моделью трещиноватой эквивалентной среды), зависит в первую очередь от соотношения прочности на сжатие $R_{сж}$ к прочности на растяжение R_p массива, вмещающего горную выработку, и значения показателя GSI .

2.3.2 Результаты натуральных исследований

Основными данными, требуемыми для оценки геомеханических процессов в породах, склонных к хрупкому разрушению, в окрестности сопряжений являются геометрические параметры выработки, выражаемые в первую очередь в ее ширине (для сопряжений принимаются в качестве расчетных наибольший пролет из сопрягающихся выработок) и количественном значении напряжений, выражаемом через категорию состояния горной выработки.

В соответствии с приведенной в разделе 2.3.1 методикой, определение напряженно-деформированного состояния массива выполнено в следующей последовательности.

1. Замер маркшейдерской службой рудника фактических контуров горных выработок на участках хрупкого разрушения (пример представлен на рисунке 2.3).



Рисунок 2.3 – Пример замера зоны хрупкого разрушения маркшейдерской службой

2. Определение пространственного расположения конкретных измеренных сечений.
3. Определение размеров хрупкого разрушения путем вычитания из размеров фактического контуры проектных размеров.
4. Вычисление максимального напряжения, действующего в плоскости сечения по формуле (2.1):

$$\sigma_{max} = R_{сж} \cdot \frac{R_f}{1.25a} - \frac{R_{сж} \cdot 0.49(\pm 0.1)}{1.25}, \quad (2.1)$$

где R_f – расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения;

a – эквивалентный радиус выработки;

$R_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии образца ненарушенной горной породы.

Данная формула является основной при определении напряженно-деформированного состояния массива методом визуально-инструментальной оценки зон хрупкого разрушения вокруг выработок [42,49].

Для представления порядка оценки геомеханических процессов вокруг выработок массива, на примере участка кваршлага №2 отм. -10 м Кировского рудника, приведена подробная обработка результатов.

1. Тип вмещающих пород согласно геологическому планшету – уртиты;
2. Прочность пород $R_{сж} = 200$ МПа;
3. Согласно результатам визуальных наблюдений, на данном участке проводились мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРЩ).
4. Пример фактического сечения с проставленными расчетными размерами представлен на рисунке 2.4, из которого видно, что R_f (расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения) равен 3.27.
5. Определяется эквивалентный радиус выработки:

$$a = 0,56 \sqrt{S_{пр}} = 0,56 \sqrt{20,92} = 2,56 \text{ (м)}$$

6. Подставляя полученные значения в формулу (2.1), получаем максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения:

$$\sigma_{max} = 200 \cdot \frac{3,27}{1,25 \cdot 2,56} - \frac{200 \cdot 0,49(\pm 0,1)}{1,25} = 125 \pm 16 \text{ (МПа)}$$

7. Далее определяется фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки. Данный расчет выполняется исходя из известного коэффициента концентрации напряжений на контуре выработки для характерных геометрических форм сечений горных выработок подземных рудников КФ АО «Апатит», составляющий от 2.3 до 2.4. (для расчетов принят 2.35).

отм.+10м Квершлаг(2)_ВС-1

Масштаб 1:50

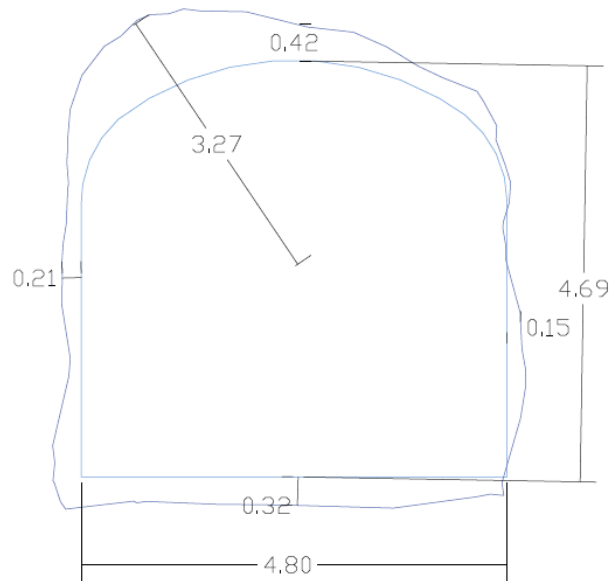
 $S_{пр} = 20,92\text{м}^2$ $S_{\phi} = 26,17\text{м}^2$ 

Рисунок 2.4 – Пример фактического сечения

Таким образом, максимальное напряжение (предварительное значение), действующее в массиве горных пород на момент проходки горной выработки (σ_{\max}^{ϕ}) составит:

$$\sigma_{\max}^{\phi} = \frac{\sigma_{\max}}{2,35} = 47-60 \text{ (МПа)}$$

Значительный разброс полученных напряжений σ_{\max}^{ϕ} связан с введенным в формулу (2.1) параметром (± 0.1), который позволяет использовать эту формулу для широкого спектра условий строительства горных выработок и разных горных предприятий в целом.

Данные проведенной визуально-инструментальной оценки по всем сопряжениям представлены в Журнале наблюдений (Приложение В).

По результатам выполненных исследований получен набор данных о формировании зон хрупкого разрушения пород для различных условий строительства горных выработок для месторождений Кукисвумчорское, Юкспорское и Апатитовый цирк. (рисунок 2.5) и закономерности изменения этих зон в своде одиночных горных выработок и их сопряжений.

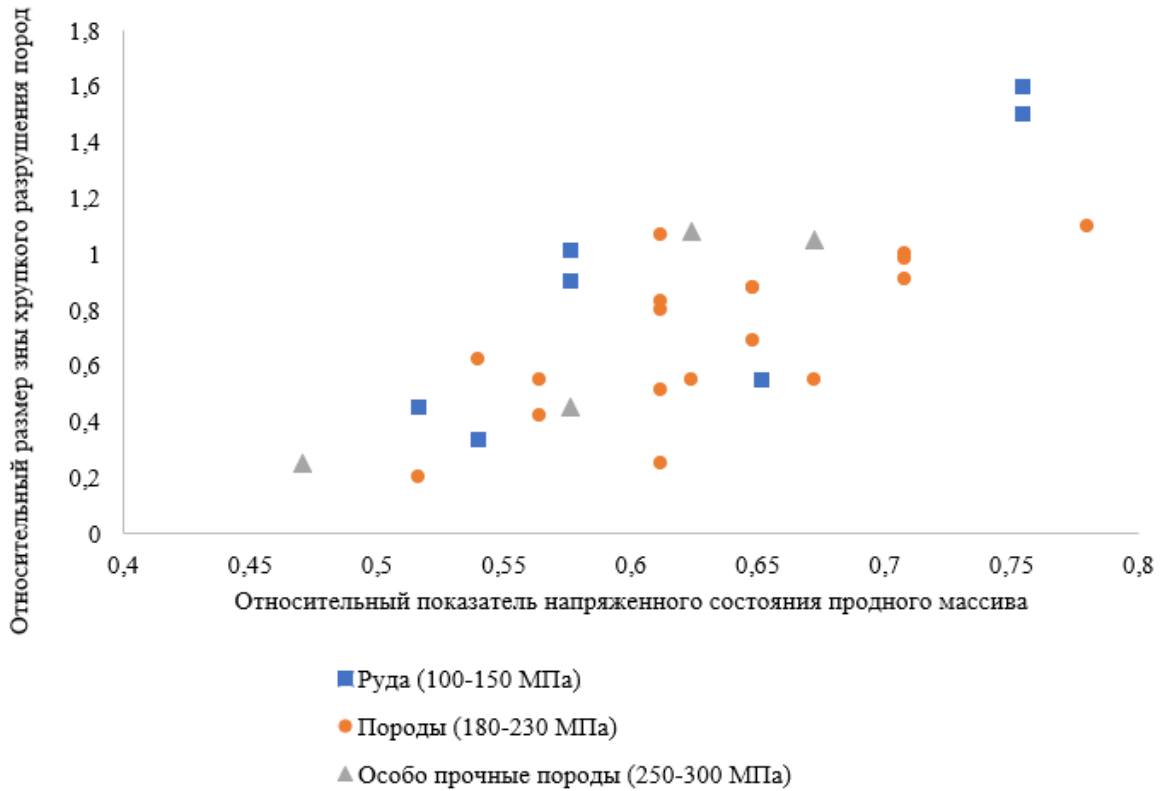


Рисунок 2.5 – Данные о формировании зон хрупкого разрушения пород в зависимости от горно-геологических и геомеханических условий

Под размером зоны хрупкого разрушения понимается разность между расстоянием от подошвы выработки до свода зоны хрупкого разрушения $h_{св}$ и высотой горной выработки $h_{в}$ (2.2):

$$h_{хр} = h_{св} - h_{в}. \quad (2.2)$$

Относительный размер зоны хрупкого разрушения оценивается в сравнении с высотой горной выработки.

Под относительным показателем напряженного состояния породного массива понимается отношение максимальных напряжений на контуре горной выработки σ_{max} к прочности пород в условиях одноосного сжатия σ_c (2.3):

$$П_{в} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_c}; \quad (2.3)$$

$$\sigma_{max} = 3\sigma_1 - \sigma_3.$$

Приведенные на рисунке 2.5 данные позволяют говорить о том, что для условий КФ АО «Апатит» размеры зон хрупкого разрушения пород в своде выработки варьируются в достаточно широком диапазоне для одинаковых геомеханических условий. Это обусловлено тем, что рассматриваемая выборка данных инструментальных наблюдений содержит как данные,

полученные на участках строительства одиночных выработок, так и сопряжений горных выработок.

Выделив отдельно данные для одиночных выработок и сопряжений (рисунок 2.6), можно отметить, что разброс данных существенно снизился.

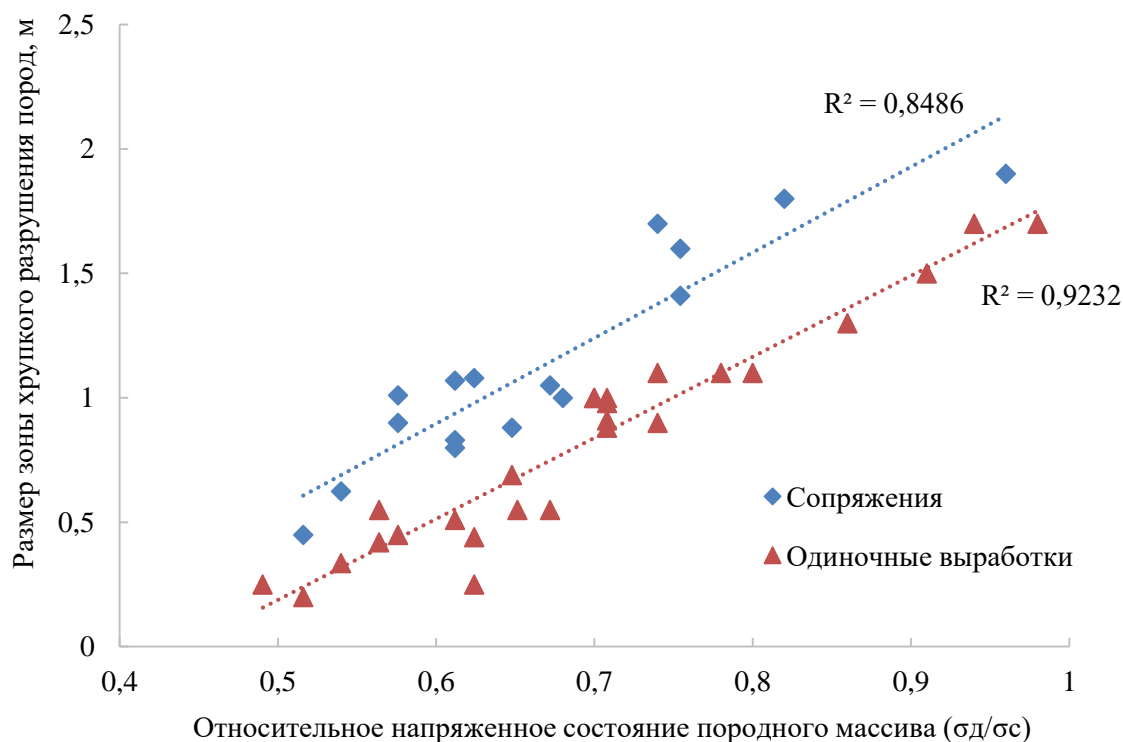


Рисунок 2.6 - Размеры зон хрупкого разрушения для сопряжений и одиночных выработок при различном напряженном состоянии массива

Можно отметить, что при рассмотрении аналогичных условий строительства горных выработок размеры зон хрупкого разрушения несколько выше на участках их сопряжений. В среднем наблюдается увеличение размера зоны хрупкого разрушения в 1.4–1.8 раза. Необходимо отметить, что при сопоставлении размеров зон хрупкого разрушения на представленных диаграммах не учитывался тип сопряжения и размер породного обнажения, что может объяснять столь существенный рост размера зоны хрупкого разрушения по отношению к одиночным горным выработкам.

Для установления зависимости размера зоны хрупкого разрушения по полученным данным от геомеханических условий произведена обработка данных согласно ГОСТ 22690-2015. Уравнение градуировочной зависимости принимает вид линейной функции (2.4):

$$Y = aX + b, \quad (2.4)$$

где x – величина относительного напряженного состояния массива;

y – относительный размер зоны хрупкого разрушения пород;

a и b – коэффициенты, рассчитываемые по формулам (2.5) и (2.6) соответственно:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_l)(X_i - \bar{X}_l)}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_l)^2}, \quad (2.5)$$

$$b = \bar{Y}_l - a\bar{X}_l, \quad (2.6)$$

где n – количество точек измерений;

Y_i, X_i – характеристики в определенной точке;

\bar{Y}_l, \bar{X}_l – средние значения характеристик, определяемые по (2.7), (2.8) соответственно:

$$\bar{Y}_l = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}; \quad (2.7)$$

$$\bar{X}_l = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}. \quad (2.8)$$

Отбраковка результатов испытаний выполняется для корректировки зависимости путем отбраковки единичных испытаний, не удовлетворяющих условию (2.9):

$$\frac{|Y_{i3} - Y_i|}{S} \leq 2, \quad (2.9)$$

где Y_{i3} – i -тое значение, определенное по построенной зависимости;

S – остаточное среднеквадратическое отклонение (2.10):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i3} - Y_i)^2}{n - 2}}. \quad (2.10)$$

После отбраковки зависимость устанавливают вновь по формулам (2.6)-(2.10) по оставшимся результатам испытаний. Зависимость считается скорректированной при выполнении условия (2.9).

Зависимость для обработанных данных представлена на рисунке 2.7. Линейная функция с достаточной точностью описывает получившуюся зависимость, что согласуется с исследованиями других авторов по схожим тематикам. Характер зависимости не меняется от формы и размеров горных выработок и их сопряжений.

Минимальное значение относительного показателя напряженного состояния породного массива (σ_d/σ_c), с которого начинаются процессы хрупкого разрушения на контуре выработки (участок, где линия тренда пересекает значение «0» по оси абсцисс), составляет 0.4.

Приведенную зависимость можно описать следующим образом (2.11):

$$k_d = 0,58 \frac{\sigma_d}{\sigma_c} - 0,24. \quad (2.11)$$

Стоит отметить, что для практического использования формулы при определении прогнозных зон хрупкого разрушения необходимо учитывать возможный разброс результатов коэффициентом запаса не менее 1.15. Более подробно это описано в Главе 4.

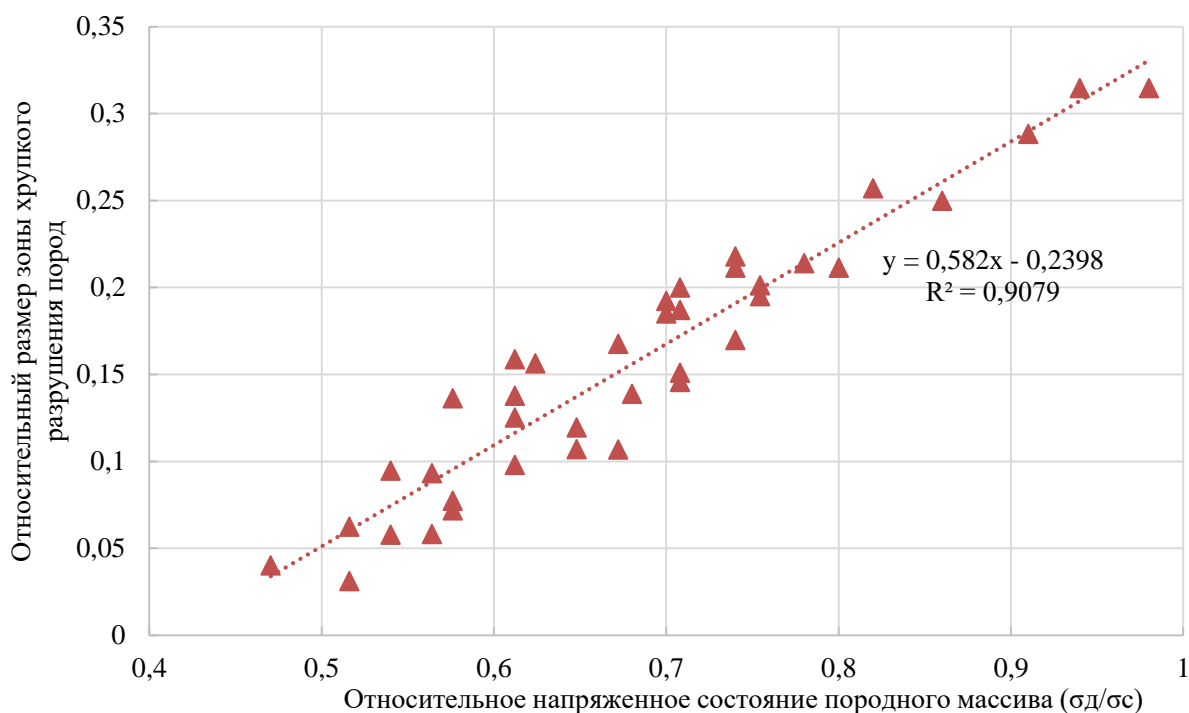


Рисунок 2.7 - Закономерности формирования зон хрупкого разрушения пород для различных горно-геологических и геомеханических условий в зависимости от типа выработки

Достоверность приведенной зависимости подтверждена в ходе исследований 2022-2023 г.г., включавших следующее:

1. Определение геометрических параметров горной выработки, сопряжения горных выработок.
2. Численное определение относительного показателя напряженного состояния породного массива (σ_d/σ_c).
3. Прогноз зоны хрупкого разрушения с учетом определяемого показателя k_d и геометрических параметров горной выработки.

Апробация проведена на более чем сорока участках горных выработок Куисвумчоррского, Юкспорского месторождения и месторождения Апатитовый Цирк.

Результаты апробации приведены в Приложении Г. По данным видно, что прогнозная характеристика на основе выведенной зависимости практически совпадает с результатами маркшейдерской съемки, небольшое различие связано с погрешностью методов измерений, но в целом в рамках решения инженерной задачи показана достаточная сходимость с натурными данными.

Проведенные натурные наблюдения позволили установить, что параметры прогнозной зоны хрупкого разрушения дают приемлемый результат при условии использования достоверных данных о напряженном состоянии горного массива.

2.4 Изучение механизма деформирования и разрушения горных пород методами акустической эмиссии

2.4.1 Методика проведения исследований

Надёжная информация о состоянии массива пород может быть получена с помощью методов геофизики [2,4,5], среди которых наиболее развитыми на сегодняшний день являются методы микросейсмике, геоакустики, ультразвука, электротриии и регистрации электромагнитного излучения (ЭМИ). В горнодобывающих предприятиях наиболее распространены сейсмоакустические и геоакустические подходы. Геоакустический метод позволяет проводить локальный и региональный мониторинги состояния массива пород. Методика основывается на теоретически обоснованном и экспериментально зафиксированном явлении акустической эмиссии (АЭ), которое, наряду с ЭМИ, сопровождает механическое нагружение и разрушение горных пород [3,7].

В диссертационном исследовании используется портативный геоакустический прибор «Prognoz L» для локальной фиксации удароопасности, созданный ИГД ДВО РАН. Этот прибор способен не только фиксировать множество параметров акустической эмиссии, но и обрабатывать и детально анализировать извлечённые данные, что существенно увеличивает достоверность оперативной оценки геомеханического состояния массива горных пород [76]. Схема прибора представлена на рисунке 2.8.

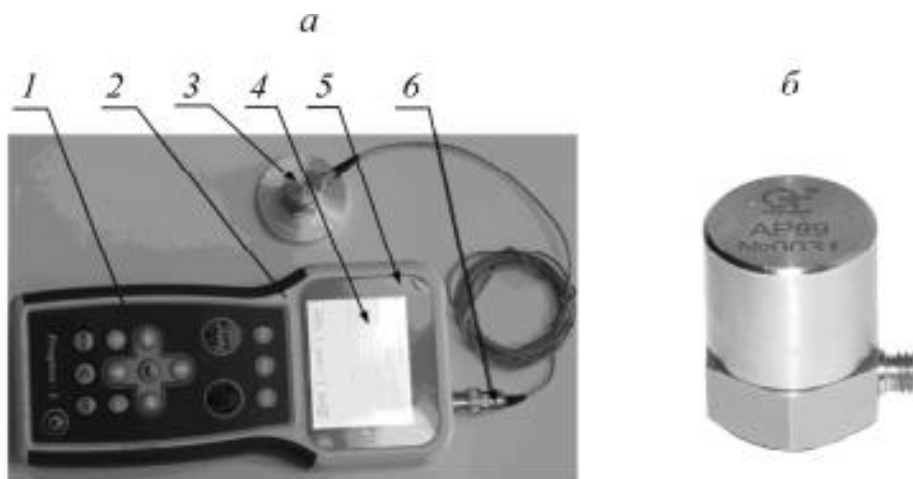


Рисунок 2.8 - Внешний вид прибора «Prognoz L»: измерительный блок (а); акселерометр AP99-1000 (б): 1 — пленочная клавиатура; 2 — корпус прибора; 3 — выносной датчик (акселерометр); 4 — жидкокристаллический дисплей; 5 — защитное стекло из поликарбоната; 6 — разъем подключения выносного датчика

Метод акустической эмиссии в диссертационной работа применен для установления момента начала формирования зоны хрупкого разрушения.

2.4.2 Результаты натуральных исследований

В рамках диссертационного исследования проведена серия измерений в подземных выработках Кировского рудника на отм. +263 м, +288 м с составлением журналов инструментальных наблюдений за состоянием массива (таблица 2.2), журналов фиксации результатов визуальных наблюдений (таблицы 2.3, 2.4).

Таблица 2.2 – Журнал инструментальных наблюдений за состоянием массива №1

Категория прочности пород 1	Категория прочности пород 2	Серия измерений	Дата	Время начала замера	Средняя активность N15 _{ср}	Ь-фактор	Дата и время завершения бурения строчки ОРЦ
4	7	1	22.07.22	10:41	4,13	0,23	-
4	7	2	22.07.22	10:52	1,38	0,08	-
4	7	1	22.07.22	12:15	0,33	0,39	-

Таблица 2.3 - Журнал фиксации результатов визуальных наблюдений в выработке №1

Горизонт, подэтаж	Наименование выработки
бл.7/12, отм. +263 м	18 ВТО
Интервал	Дата
на ЮЗ от 16 БДШ	22.07.2022
Параметр	Значение
Ширина	5,4
Высота	4,3
Тип крепи	н/б
Наличие нарушений крепи:	-
- место расположения	-
- геометрические размеры нарушения:	-
- по длине	-
- по высоте	-
- по ширине	-
- по глубине	-
- эскиз / фото (Да/Нет)	-
Проявления горного давления в выработке (Да/Нет):	Да
- характер проявлений (отслоение, закол, вывал, крупный вывал)	динамическое заколообразование, шелушение
- местоположение (свод, бока, шельга свода, пята свода)	свод, шельга свода
Показатель напряженного состояния (Категория состояния выработки)	Г+ОРЦ

Продолжение таблицы 2.3

Прочие особенности (обводненность, повышенная трещиноватость и т.п.)	линзовидно-полосчатые текстуры
3D съемка выработки с фиксацией времени сканирования (Да/Нет)	нет

Таблица 2.4 - Журнал фиксации результатов визуальных наблюдений в выработке №2

Горизонт, подэтаж	Наименование выработки
бл.12/15, отм. +288 м	подводящая к РС4/12
Интервал	Дата
-	22.07.2022
Параметр	Значение
Ширина	5,4
Высота	4,3
Тип крепи	н/б
Наличие нарушений крепи:	нет
- место расположения	-
- геометрические размеры нарушения:	-
- по длине	-
- по высоте	-
- по ширине	-
- по глубине	-
- эскиз / фото (Да/Нет)	-
Проявления горного давления в выработке (Да/Нет):	да
- характер проявлений (отслоение, закол, вывал, крупный вывал)	динамическое заколообразование по стенкам и пяте выработки
- местоположение (свод, бока, шельга свода, пята свода)	бока, пята свода
Показатель напряженного состояния (Категория состояния выработки)	Г+ОРЦ
Прочие особенности (обводненность, повышенная трещиноватость и т.п.)	линзовидно-полосчатые текстуры.
3D съемка выработки с фиксацией времени сканирования (Да/Нет)	нет

Натурные наблюдения за формированием зон хрупкого разрушения пород показали, что в условиях апатит-нефелиновых месторождений динамические проявления горного давления возникают сразу же за подвижением забоя горной выработки.

Проведенные в данном разделе исследования показали необходимость учета развития микроструктурных нарушений при прогнозе развития геомеханических процессов, что позволит повысить достоверность прогноза.

2.5 Особенности развития геомеханических и геодинамических процессов при проведении и эксплуатации горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит»

С учетом преобладающей горизонтальной компоненты напряжений свод и почва выработки находятся в зоне повышенных сжимающих напряжений, что приводит к формированию трещин растяжения на микроструктурном уровне и проявляется в виде раскалывания пород с дальнейшим формированием макротрещин.

Для анализа характера формирования зоны хрупкого разрушения в окрестности одиночных выработок и сопряжений горных выработок использованы приведенные ранее данные (рисунок 2.6). Полученные закономерности позволяют заключить, что в аналогичных условиях размеры зон хрупкого разрушения несколько выше на участках сопряжений горных выработок. В среднем наблюдается увеличение размера зон хрупкого разрушения в 1.4–2.5 раза.

Несмотря на то, что с механической точки зрения процесс с момента формирования до момента завершения роста трещины происходит достаточно быстро, и его можно с некоторой долей допущения отнести к динамическому процессу, последствия хрупкого разрушения пород не всегда значительны и могут сопровождаться только шелушением породы в приконтурной области. В отдельных случаях хрупкое разрушение может сопровождаться значительными динамическими проявлениями горного давления вплоть до горного удара.

Хрупкое разрушение может формироваться как непосредственно в процессе ведения проходческих работ, так и развиваться во времени. Обычно в условиях месторождений КФ АО «Апатит» процесс хрупкого разрушения пород на контуре горной выработки начинает проявляться при достижении напряжениями на контуре горной выработки величин 0.3 от прочности пород на сжатие, что в целом соответствует и результатам исследований в аналогичных геомеханических условиях [41,71].

Процесс хрупкого разрушения в основном контролируется прочностью породы на растяжение и в основном характерен при малых величинах бокового обжатия породы. Таким образом, использование критериев прочности горной породы, основанных на сдвиговом характере разрушения пород, не является корректным для прогноза хрупкого разрушения. В основу склонности пород к хрупкому разрушению обычно закладывают величину прочности на одноосное сжатие и соотношение между прочностью на одноосное сжатие и прочностью на одноосное растяжение (рисунок 2.9).

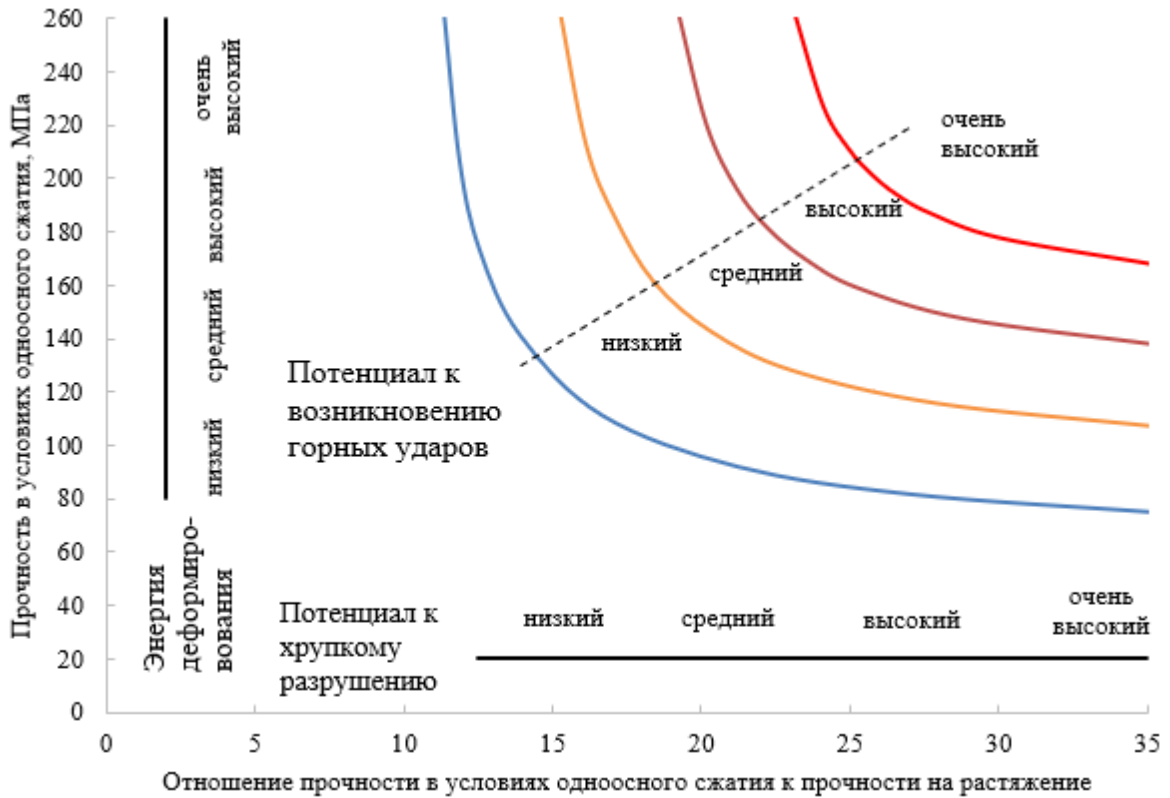


Рисунок 2.9 – Оценка склонности пород к хрупкому разрушению

С механической точки зрения процесс хрупкого разрушения пород нельзя описать, используя классические критерии прочности (критерий прочности Кулона-Мора, критерий прочности Хока и Брауна), без внесения в методику определения их параметров некоторых изменений, которые рассматривают пластический сдвиг пород, в то время как хрупкое разрушение является результатом формирования параллельных друг другу пластин породы, оконтуренными трещинами отрыва.

Разрушение таких систем включает в себя сложный геомеханический процесс, сопровождающийся формированием пластин, их взаимодействием между друг другом и последующим разрушением. Одним из наиболее важных аспектов является отсутствие или малое влияние внутреннего трения на прочность породы при хрупком разрушении. Как было отмечено выше, процесс разрушения происходит на микроуровне и связан со структурой породы. Момент начала формирования трещин отрыва в породе обычно составляет $1/3$ от прочности на одноосное сжатие для изверженных пород и $1/2$ для плотных обломочных пород. Анализ данных натурных наблюдений за формированием зон хрупкого разрушения показал, что процесс начала хрупкого разрушения в зависимости от условий проведения выработки начинается при достижении тангенциальными напряжениями величины сравнимой $33 \div 50\%$ прочности породы в условиях одноосного сжатия.

Переходная огибающая прочности, характеризующая прочность горной породы в окрестности горной выработки, формируется по нижнему и верхнему пределу прочности породы (рисунок 2.10).

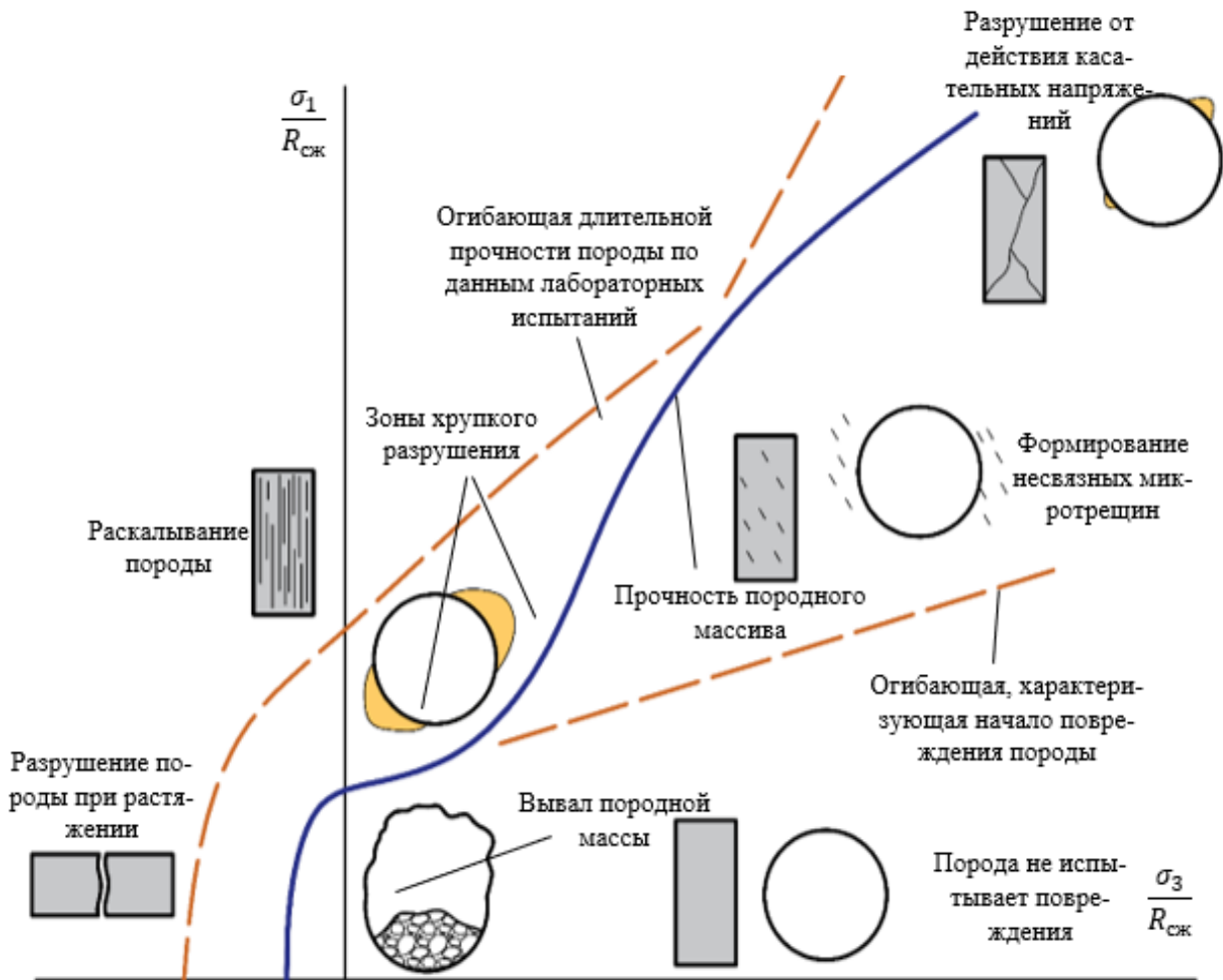


Рисунок 2.10 - Обобщенная диаграмма прочности породы склонной к хрупкому разрушению в массиве, представленная в относительных осях главных максимальных и минимальных напряжений

Отдельные компоненты этой кривой могут быть выражены через условие прочности Хока-Брауна. Модель показывает, что, если напряжения располагаются ниже переходной огибающей прочности, то все деформации упругие и разрушения не происходит. При значительных величинах бокового обжатия превышение напряжениями огибающей, характеризующей начальный этап повреждения породы, приведет к формированию микротрещин и микросейсмичности. При значительных значениях бокового обжатия прочность породного массива соответствует прочности породы, полученной на образцах в лабораторных условиях. При низких значениях бокового обжатия микротрещины, формируемые на контакте между частицами породы, могут легко распространяться и вырасти до макротрещин, что и приводит к возникновению процессов так называемого хрупкого разрушения в окрестности

горных выработок, когда напряжениям в породном массиве значительно ниже предела прочности на одноосное сжатие полученного в лабораторных условиях.

С учетом известной величины напряжений, при которых инициируется процесс повреждения породы CI , размер зоны хрупкого разрушения определяется как (2.12):

$$\frac{R_f}{a} = 0.5 \left(\frac{\sigma_{max}}{CI} + 1 \right). \quad (2.12)$$

В работе [123] показано, что начальная прочность образца, до момента активного развития микротрещин, формируется за счет цементационных связей, в то время как внутреннее трение не оказывает значительного влияния на прочность породы (рисунок 2.11). По мере увеличения нагрузки и формирования новых микротрещин, количество цементационных связей уменьшается, а угол внутреннего трения увеличивается, также увеличивается и доля его влияния на прочность породы.



Рисунок 2.11 – Развитие сцепления и угла внутреннего трения по мере нагружения образца горной породы и формирования трещин [16]

Деграцию цементационных связей можно связать с увеличением эквивалентных пластических деформаций по зависимости (2.13):

$$c = c_r + (c_i - c_r) \left[2 - \frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p^{c.r.}}\right)} \right]; \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_p = \sqrt{\frac{2}{3} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2]},$$

где c_i – начальное значение сцепления;

c_r – остаточная величина сцепления;

ε_p – эквивалентные пластические деформации;

$\varepsilon_p^{c.r.}$ – эквивалентные пластические деформации на момент достижения остаточной прочности;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – соответственно главные максимальные, средние и минимальные нормальные деформации.

Угол внутреннего трения при этом меняется по зависимости (2.14):

$$\varphi = \varphi_i + (\varphi_{max} - \varphi_i) \left[\frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p^{\varphi_{max}}}\right)} - 1 \right] - (\varphi_{max} - \varphi_r) \left[\frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{2\varepsilon_p - \varepsilon_p^{\varphi.r.} - \varepsilon_p^{\varphi_{max}}}{\varepsilon_p^{\varphi.r.} - \varepsilon_p^{\varphi_{max}}}\right)} - 1 \right], \quad (2.14)$$

где φ_i – начальное значение угла внутреннего трения;

φ_{max} – максимальное значение угла внутреннего трения на момент мобилизации всех площадок скольжения;

φ_r – остаточная величина угла внутреннего трения на момент разрушения всех цементационных связей;

$\varepsilon_p^{\varphi_{max}}$ – величина эквивалентных пластических деформаций, соответствующая максимальной величине угла внутреннего трения;

$\varepsilon_p^{\varphi.r.}$ – величина эквивалентных пластических деформаций, соответствующая остаточной величине угла внутреннего трения.

Зависимости, характеризующие упрочнение/разупрочнение материала, построенные по зависимостям (2.13) и (2.14) приведены на диаграмме (рисунок 2.12).

Необходимо отметить, что момент достижения остаточной величины сцепления и угла внутреннего трения на ассоциированы друг с другом, что приводит при математической реализации данной аналитической модели к возникновению участка, где наблюдается сначала падение, а затем набор прочности, что не характерно для работы материала и может приводит к серьезным проблемам при решении практической задачи численными методами анализа.

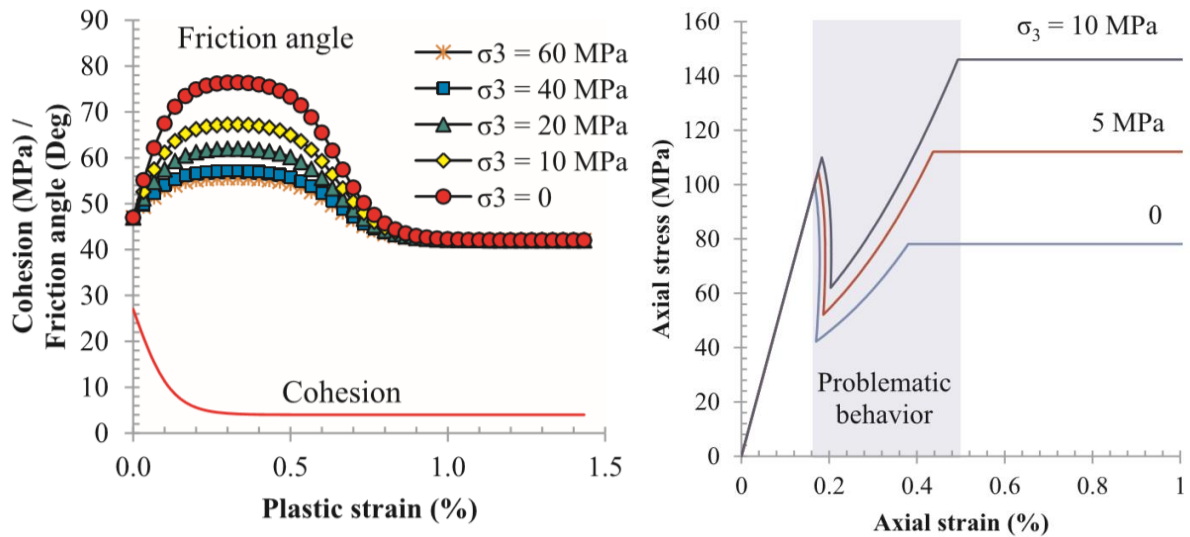


Рисунок 2.12 – Характерные зависимости изменения сцепления и угла внутреннего трения от величины эквивалентных пластических деформаций [99]

Формирование зон хрупкого разрушения сопровождается изменением объема пород в этой зоне, что частично связано с дилатансионными процессами, но более активно в этот процесс вовлечено перемещение и вращение разрушенных блоков относительно друг друга. Достоверный прогноз развития деформаций в зоне хрупкого разрушения является важным для выбора крепи и ее параметров, так как ее выбор зависит от ожидаемых радиальных смещений породного контура. Представленные выше модели с достаточной степенью достоверности могут описать только дилатансионные процессы, процессы же, связанные с перестроением структуры пород в зоне хрупкого разрушения, в явном виде описаны быть не могут. При наличии фактических наблюдений за развитием деформаций пород в зоне хрупкого разрушения показатель дилатансии можно подобрать таким образом, чтобы расчетные величины соответствовали фактическим. Однако на практике рекомендуется воспользоваться эмпирической зависимостью, которая связывает величину радиальных смещений с размером зоны хрупкого разрушения пород и величиной отпора крепи

Рекомендуется определять величину радиальных смещений породного контура в приуроченных к зоне хрупкого разрушения по эмпирической зависимости (2.15):

$$u_r = 0.3h_{\text{хр}}e^{-\frac{p_{\text{кр}}}{70}}, \quad (2.15)$$

где $h_{\text{хр}}$ – высота зоны хрупкого разрушения;

$p_{\text{кр}}$ – отпор крепи.

В средне- и сильнотрещиноватых породных массивах развитие деформаций сопряжено со взаимным смещением породных блоков относительно друг друга. Хрупкое разрушение породы для таких условий не характерно или ограничено, так как развитие новых трещин всегда встречает на своем пути существующие трещины, где происходит затухание процесса хрупкого разрушения (рисунок 2.13).

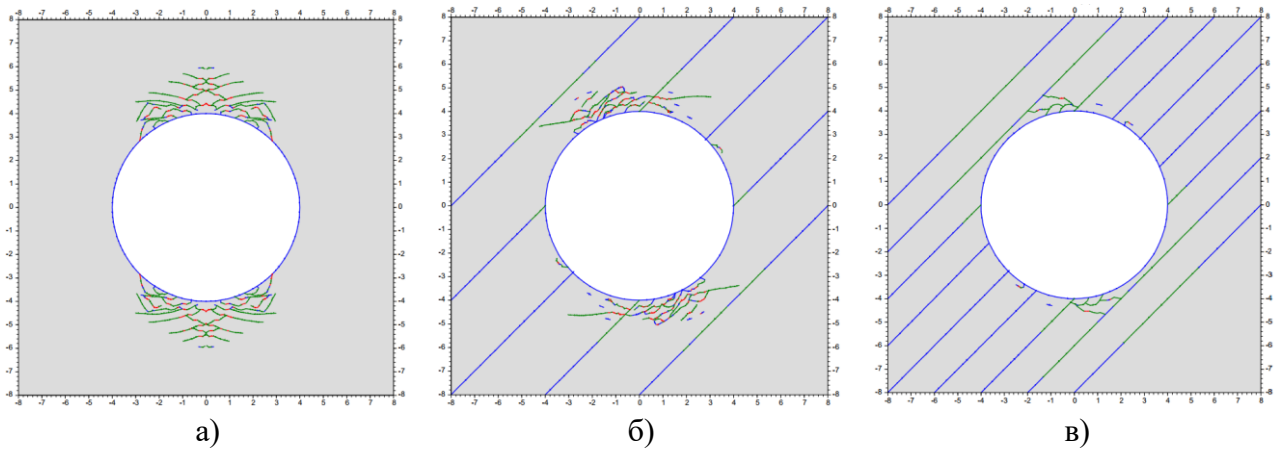


Рисунок 2.13 – Влияние интенсивности трещиноватости на размер зоны хрупкого разрушения: значение R_f/a для 1.5 (а), для 1.25 (б), для 1.18 (в)

Более полно процесс хрупкого разрушения пород может быть реализован в рамках метода конечно-дискретных элементов, где процесс инициации и распространения трещин сдвига и отрыва моделируется в явном виде. Однако достоверность такого расчета напрямую зависит от детализации представления горной породы на микроструктурном уровне и задания макротрещин, присущих породному массиву, на макроуровне.

Такой подход на настоящий момент недостижим на практике по причине отсутствия необходимой информации о структуре породного массива и очень серьезных требований к вычислительным ресурсам. Данный подход все же может быть использован для прогноза развития зон хрупкого разрушения в окрестности горной выработки в упрощенной форме, однако в таком случае он не имеет существенного преимущества перед представленными выше моделями прогноза зон хрупкого разрушения.

2.6 Анализ рекомендаций по креплению горных выработок в различных горно-геологических условиях

Расчет крепи выработки производят на основании данных о структурной нарушенности массива с учетом рейтинговых классификаций [114,120-124] или коэффициента структурного ослабления [14].

В начале обоснования выбора конструкции и параметров крепления производственных выработок необходимо провести анализ устойчивости обнаженного массива, а также разобраться с воздействием нагрузок на конструкцию крепи. Эти этапы могут быть выполнены как на основе эмпирических данных, так и с применением численных методов. В результате анализа мы получаем данные о размерах смещений в зоне добычи или о масштабах участков, где горные породы могут быть подвержены обрушению (неустойчивые породы). На выбор расчетного варианта поддерживающей конструкции также оказывает влияние характер распространения нарушений, которые могут быть как в пределах локальных участков, так и затрагивать весь

периметр укрепления. Определение наиболее эффективной конструкции крепления осуществляется лишь после тщательного анализа возможного типа потери устойчивости в соседних массиве выработки или её соединениях.

Выбор конструкции крепления осуществляется на основании характера структурных деформаций окружающего массива. В последнее время в условиях апатит-нефелиновых месторождений выполняется переход на упрочняющие типы крепей – анкерную и комбинированную. Для пояснения степени эффективности перехода на упрочняющие и облегченные виды крепей на рисунке 2.14 представлены круговые диаграммы, позволяющие оценить качественный переход рудников КФ АО «Апатит» на новые подходы в креплении выработок.

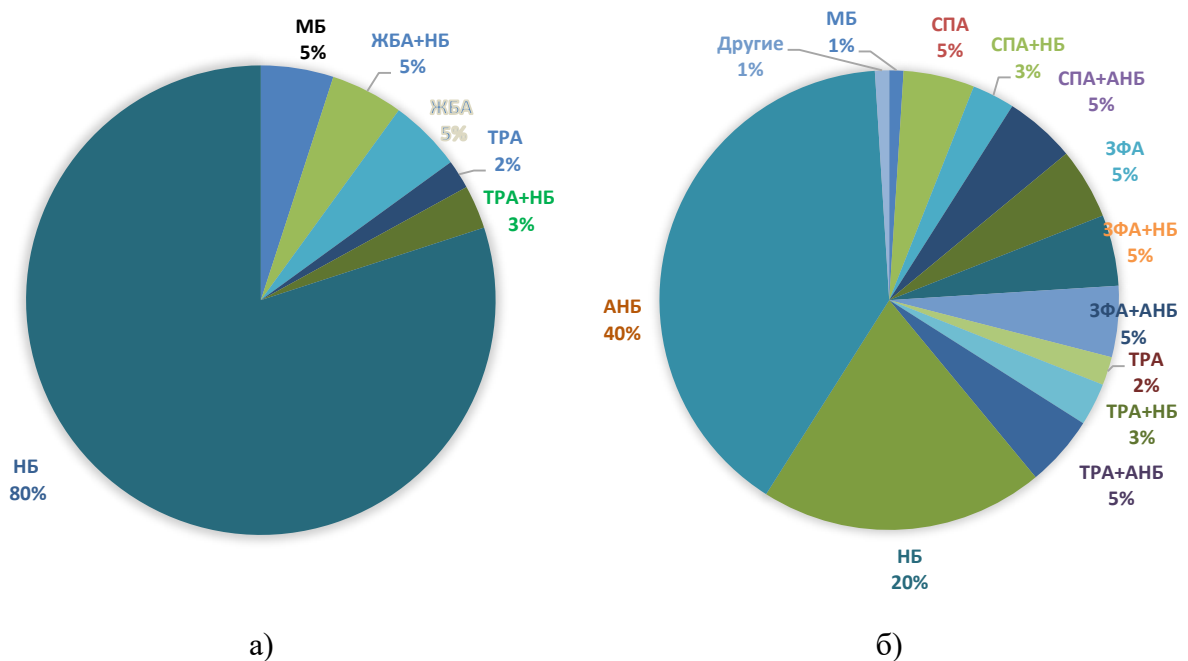


Рисунок 2.14 – Диаграммы распределения объемов крепления по видам крепи на 2010 г. (а) и 2020 г. (б): АНБ – армированная набрызгбетонная крепь; ЖБА – железобетонная анкерная крепь, ЗФА – забивная фрикционная анкерная крепь; НБ – набрызгбетонная крепь; МБ- монолитная бетонная крепь; СПА- сталеполимерная анкерная крепь, ТРА – тросовая анкерная крепь; другие – крепи, проходящие ОПИ

Из диаграмм, представленных на рисунке 2.14, можно сделать вывод, что с 2010 г. на рудниках КФ АО «Апатит» произошли следующие изменения:

- значительно увеличен ассортимент применяемых видов крепей;
- практически не используются трудоемкие и малопроизводительные (монолитный бетон, рамные крепи и другое) и низко механизированные (железобетонные анкера) виды крепей;
- осуществляется переход на комбинированные крепи, позволяющие обеспечивать несущую способность даже в самых сложных условиях;
- расширяется применение армированного набрызгбетона.

С другой стороны, можно определить, что с увеличением глубины отработки месторождений все больше проявляется негативное влияние повышенных напряжений на устойчивое состояние выработок, все больше участков требует противодействию хрупкому разрушению массива вокруг горных выработок.

В этой связи необходимыми являются исследования в области применения крепей, способных противодействовать динамическим нагрузкам при возникающим хрупком разрушении. Также необходимы рекомендации по выбору способов крепления для условий с различными формами проявления горного давления даже в пределах одной категории выработки.

2.7 Выводы по Главе 2

Результаты изучения форм потери устойчивости, встречающиеся на подземных рудниках КФ АО «Апатит», показали необходимость разработки новой классификации пород и руд по устойчивости. Новая классификация должна позволять четко определять преобладающую (вызывающую максимальное разрушение или нагрузку на крепь) форму разрушения в данной категории, а, значит, определять расчетную схему нагружения, а также уточнять типы крепей для использования в этих условиях. Все это позволит эффективно выбирать тип крепи и иметь количественные показатели, позволяющие рационально определять параметры крепей.

Кроме того, в общем случае под прогнозом развития зон хрупкого разрушения понимается суждение о возможном формировании этой зоны на контуре горной выработки в конкретных горнотехнических условиях, что на сегодняшний день на рудниках КФ АО «Апатит» хорошо апробировано и приведено в «Указаниях...». Однако необходимо более тщательно изучить параметры зоны хрупкого разрушения.

В результате комплекса натурных исследований, результаты которых приведены в данной главе, установлено, что при определении размеров зон хрупкого разрушения необходимо учитывать не только напряженное состояние массива. Размер зоны хрупкого разрушения пропорционален размеру горной выработки. На размер зоны хрупкого разрушения значительно влияет наличие сопряжений горных выработок. Также необходимо учитывать микроструктуру пород при прогнозе.

Оценка данных взаимовлияющих факторов возможна при применении численного моделирования, позволяющего, помимо геометрии и свойств структурных нарушений, учесть и микроуровень развития нарушений, необходимость чего обоснована в Главе 1 в результате анализа существующих подходов к оценке устойчивости контура горных выработок в массивах, склонных к хрупкому разрушению.

Обоснование математической модели поведения массива пород и результаты численных расчетов геомеханических процессов приведены в Главе 3.

ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА РУДНИКАХ КФ АО «АПАТИТ»

3.1 Общие положения

В данной главе рассмотрены подходы к моделированию развития геомеханических процессов в окрестности одиночных горных выработок и сопряжений горных выработок. Использование методов численного моделирования, которые хорошо зарекомендовали себя при решении различных задач геомеханики, является альтернативным методом прогноза размера зоны хрупкого разрушения.

Несколько различных подходов было предложено исследователями для прогноза таких зон. Первые из них основаны на методах сплошной среды [97], в то время как вторые оперируют изначально сплошной средой, в которая постепенно по мере накопления повреждения становится квазидискретной [125].

Перспективным подходом к прогнозу размеров зон хрупкого разрушения является использование численного моделирования, основанного на методе конечно-дискретной среды. Такой подход позволяет осуществить естественный переход от сплошной среды к дискретной за счет формирования и прорастания микро и макротрещин. Данный подход нашел широкое применение как для решения различных задач геомеханики [137] и, в частности, прогноза размеров зон хрупкого разрушения [123,134]. Однако недостатком данного метода на современном этапе развития вычислительной техники являются значительные требования к вычислительным ресурсам, что ограничивает его распространение на решение задач в пространственной постановке.

В рамках диссертационной работы среда рассматривается как квазисплошная упругопластическая. При этом при развитии геомеханических процессов учитывается микроструктура пород.

3.2 Геомеханические модели породного массива для типовых условий подземных рудников КФ АО «Апатит»

Прогноз развития геомеханических процессов, который включает в себя определение размеров зон вывала пород, определения размеров зон хрупкого разрушения или смещений породного контура, в итоге должен позволить рассчитать нагрузки на крепь горной выработки.

Породные массивы, сложенные различными породами, имеющие различную структурную нарушенность и расположенные в различном поле напряженного состояния, показывают различный отклик на обнажение при проведении горной выработки. В зависимости от характера отклика, необходимо подобрать соответствующую геомеханическую модель массива для прогноза развития геомеханических процессов.

Для естественного перехода от сплошной среды к дискретной за счет формирования и прорастания микро- и макротрещин, прогноз параметров зон хрупкого разрушения может осуществляться на основании численного моделирования в рамках механики сплошной среды с учетом положений теории пластического течения и модели хрупкого разрушения пород.

На настоящий момент в практике геомеханических расчетов, несмотря на значительное количество критериев прочности горной породы, которые позволяют с достаточной степенью достоверности описать ее прочность, существует только одна общепринятая геомеханическая модель, которая базируется на нелинейном критерии прочности Хока-Брауна [119]. Данная геомеханическая модель реализована практически во всех программных комплексах численного моделирования, что позволяет решать практические задачи с учетом тех особенностей поведения среды, которые заложены в данную модель.

Поверхность пластического течения принимает две формы, одна из которых соответствует допредельной стадии деформирования, а вторая стадия – остаточной прочности пород, переход между которыми происходит мгновенно после достижения предела прочности породы. Модель позволяет воспроизводить упругопластическое поведение горных пород. Критерий прочности горной породы Хока-Брауна в главных напряжениях имеет следующий вид (3.1):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^a, \quad (3.1)$$

где σ_1 – предельное значение максимальных главных напряжений;

σ_3 – главное минимальное напряжения;

m_i – показатель формы огибающей прочности горной породы;

σ_{ci} – прочность на одноосное сжатие горной породы.

Критерий Хока-Брауна для условий хрупкого разрушения может быть адаптирован за счет установки показателя, отвечающего за внутреннее трения пород s , равного 0, показателя $\sqrt{s} = 1/3$ и, приняв значение $a = 0.5$, что соответствует работе ненарушенной породе. Проведя соответствующие алгебраические операции, получим следующее выражение (3.2):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{s \sigma_{c,i}^2}. \quad (3.2)$$

Представленный выше критерий подходит только для прогноза зоны хрупкого разрушения, вызванного раскалыванием породы в зоне малого всестороннего обжатия и не может быть использован для прогноза формирования трещин отрыва, вызванных чистым растяжением, а также не позволяет ввести границу в области напряжений, за пределом которой хрупкое разрушение практически прекращается, а прочность породы возвращается к значениям,

полученным в лабораторных условиях (длительная прочность породы с учетом естественной структурной нарушенности).

На практике напряжения в окрестности горной выработки значительно изменяются по мере удаления от ее контура. В качестве условия прочности рассматривается условие прочности Хока-Брауна (3.1).

Рассматривается два состояния породного массива, характеризующие пиковые показатели (процесс начала хрупкого разрушения пород) и остаточные показатели (характеризующие прочность породы после завершения процесса хрупкого разрушения), что показано на рисунке 3.1.

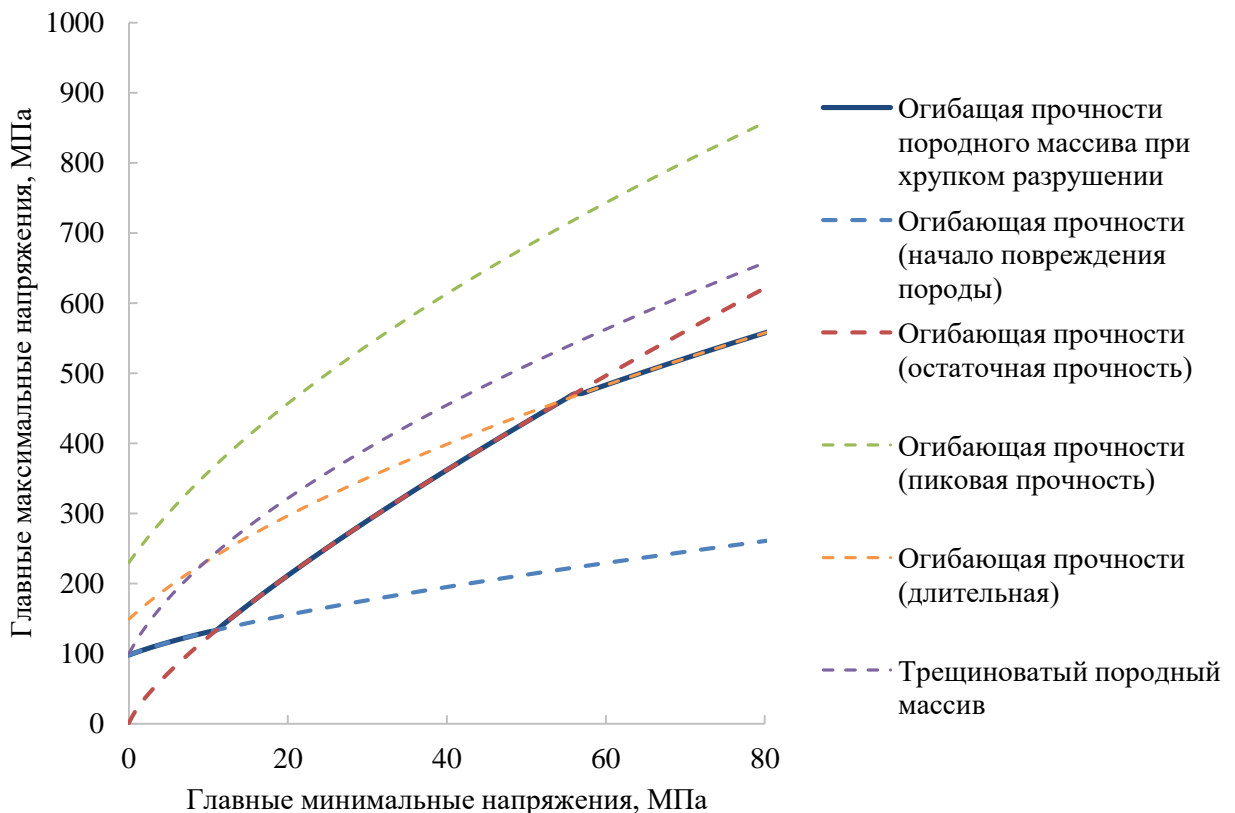


Рисунок 3.1 - Построение огибающей прочности для прогноза хрупкого разрушения в окрестности горной выработки

Рекомендации по определению параметров упругопластической модели, основанной на условии прочности Хока-Брауна, сведены в таблицу 3.1.

Альтернативный подход, который позволяет определять размеры зоны хрупкого разрушения в окрестности горной выработки, основан на применении упругопластической модели деформирования среды, включающей законы упрочнения/разупрочнения. Упрочнение/разупрочнение среды активируется в условный момент начала активного развития микротрещин в породе.

Таблица 3.1 – Уравнения для определения параметров условия прочности Хока-Брауна для прогноза хрупкого разрушения пород в окрестности горной выработки

Пиковые значения параметров условия прочности Хока-Брауна		Остаточные значения условия прочности Хока-Брауна	
a_p	0.2/0.25	a_r	0.75
s_p	$\left(\frac{CI}{R_{сж}}\right)^{\frac{1}{a_p}}$	s_r	0.001
$m_{b.p}$	$s_p \frac{R_{сж}}{R_p}$	$m_{b.r}$	6-12
		m_{dil}	не более $0.25m_{b.r}$

Примечание: a_p , s_p , m_p , a_r , s_r , m_r – соответственно пиковые и остаточные показатели условия прочности Хока-Брауна; $R_{сж}$ – прочность в условиях одноосного сжатия; R_p – прочность в условиях одноосного растяжения; CI – величина напряжений соответствующая моменту начала формирования микротрещин (увеличению объемных деформаций); m_{dil} – угол дилатансии пород; В числителе дано значение показателя a_p основанное на консервативном прогнозе размера зоны хрупкого разрушения, в знаменателе – основанное на реалистичном представлении о размере зоны хрупкого разрушения.

Анализ данных лабораторных исследований горных пород показывает, что величина угла внутреннего трения увеличивается от начального значения до пикового. После достижения критической величины деформаций угол внутреннего трения больше не изменяется и остается постоянным. Сцепление и прочность породы в условиях одноосного растяжения уменьшаются от максимального значения до практически нулевого значения по мере достижения критических деформаций формоизменения. За критическое значение деформаций формоизменения принимается величина деформаций на момент достижения остаточной прочности. Угол дилатансии при этом принимается равным величине близкой к нулю при прогнозе развития зоны хрупкого разрушения в своде выработки, где возможна потеря обжатия породы. При рассмотрении формирования зоны хрупкого разрушения в почве выработки, угол дилатансии принимается равным приблизительно равным значению $\varphi_p - 30^\circ$. Более точное значение угла дилатансии устанавливается по результатам лабораторных испытаний пород.

Несмотря на то, что законы упрочнения/разупрочнения в целом являются нелинейными, при отсутствии детальных результатов лабораторных испытаний допускается их аппроксимировать прямолинейными участками.

В зависимости от принятой модели хрупкого разрушения породы в окрестности горной выработки по результатам лабораторных исследований необходимо определить конкретные механические показатели, как показано на рисунке 3.2.

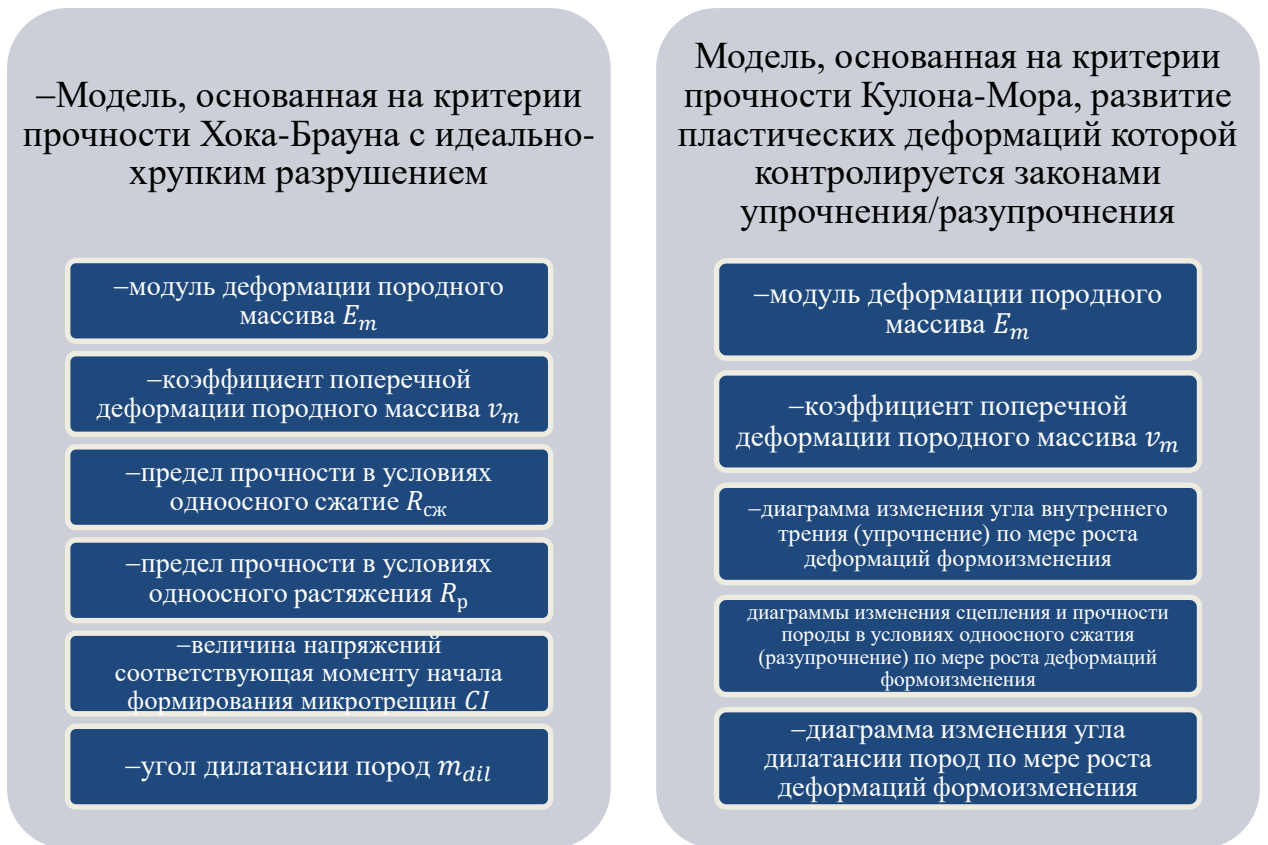


Рисунок 3.2 – Требуемые показатели для геомеханических моделей

По результатам расчета определяется размер зоны хрупкого разрушения: ширина, высота, и форма. С учетом установленных размеров и формы зоны хрупкого разрушения определяется нагрузка на крепь горной выработки.

В диссертационном исследовании принят отдельный подход оценки развития геомеханических процессов для разных горно-геологических условий. Выделено четыре основных формы потери устойчивости, характерные для горных выработок рудников КФ АО «Апатит»:

- потеря устойчивости горной выработки в результате формирования сплошного свода обрушения пород;
- потеря устойчивости горной выработки в результате обрушения пород по существующим трещинам;
- потеря устойчивости горной выработки в результате пластического деформирования горных пород;
- потеря устойчивости породного обнажения в результате хрупкого разрушения пород и локального обрушения породной массы.

При выполнении практических расчетов каждая из форм потери устойчивости подразделяется на подклассы. В рамках каждого подкласса механический принцип потери

устойчивости не изменяется, однако интенсивность проявления геомеханических процессов может быть различна.

Таким образом, обоснование устойчивости горной выработки и оценка интенсивности проявления геомеханических процессов должны выполняться на основании геомеханических моделей, учитывающих происходящие сложные геомеханические процессы в приконтурном массиве. Геомеханические процессы, связанные с формированием зон хрупкого разрушения, нелинейны и требуют учета показателей, характеризующих данную нелинейность. На основании полученных данных о развитии геомеханических процессов определяется нагрузка (характер распределения, участок локализации и величина) на крепь горных выработок.

3.3 Обоснование модели деформирования и хрупкого разрушения пород в окрестности горных выработок

3.3.1 Математическая формулировка модели деформирования и хрупкого разрушения пород

При моделировании участка ведения горных работ массив, как сложная иерархически блочная среда, должен быть идеализирован для возможности решения задачи. В современной геомеханике массив можно представить сплошной или дискретной средой (рисунок 3.3).

Идеализированный массив может быть представлен сплошной средой в определенных случаях, например, когда можно игнорировать влияние структурных дефектов. Это возможно при отсутствии анизотропии в самом массиве (небольшая микротрещиноватость и минимальное количество нарушений). Этот способ применим также при высокой степени структурной нарушенности массива (прочность в отличных друг от друга направлениях снижается из-за множества поверхностей ослабления и небольших размерам элементарных блоков).

При совпадении системы трещин и блочности массива необходимо корректно оценить вариации давления блоков друг на друга во время разработки выработок. При таком раскладе математические зависимости необходимо определять различно для всех блоков, воспринимаемых как условные сплошные тела, и для их поверхностей контакта [118,136,138].



Рисунок 3.3 – Классификация численных методов для анализа напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Описание трещиноватого массива с использованием методов механики дискретных сред способен обеспечить приемлемую степень точности в прогнозировании. Тем не менее, для этого подхода необходимы завидные вычислительные ресурсы компьютерного оборудования.

Как было отмечено ранее, прогноз хрупкого разрушения пород при использовании положений механики сплошной среды должен выполняться с учетом особенностей мобилизации прочности пород по мере роста пластических деформаций. То есть модель деформирования геоматериала при использовании положений теории пластического течения должна быть сформулированы как модель упрочняющейся/разупрочняющейся среды. Такой подход позволяет достаточно гибко регулировать влияние цементационных связей и трения по контакту стенок формируемых микро- и макротрещин на глобальную прочность породы.

При этом принимается, что на начальной стадии деформирования горной породы, величина глобальной прочности определяется прочностью цементационных связей, а влияние внутреннего трения ограничено. Однако, с момента формирования макротрещин в породе, баланс изменяется, влияние сцепления на глобальную прочность снижается, в то время как трение по поверхности вновь формируемых трещин оказывает все большее влияние. Такое представление механизма изменения параметров пластичности в модельном подходе позволяет без каких-либо дополнительных допущений обеспечить переход от хрупкого к пластичному характеру деформирования горной породы с увеличением средних напряжений, а также отделить зону хрупкого разрушения от участка условно линейно-деформируемой среды.

В общем виде модель хрупкого разрушения пород (условие пластичности Кулона-Мора) выражают через три функциональные зависимости, определяющие упрочнение/разупрочнение среды (3.3):

$$\begin{aligned}
 \varphi_{mob} &= f(\varepsilon_q, \varepsilon_v, p); \\
 c_{mob} &= f(\varepsilon_q, \varepsilon_v, p); \\
 \psi_{mob} &= f(\varepsilon_q, \varepsilon_v, p),
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

где φ_{mob} , c_{mob} , ψ_{mob} – соответственно мобилизованный угол внутреннего трения, мобилизованная величина сцепления и мобилизованный угол дилатансии.

В настоящее время предложено множество законов упрочнения/разупрочнения (мобилизации показателей φ_{mob} , c_{mob} и ψ_{mob}), которые с различной степенью достоверности позволяют описать механизм деформирования и разрушения пород (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Законы упрочнения и разупрочнения геоматериалов

Авторы закона	Законы упрочнения/разупрочнения геоматериала
Hajiabdolmajid V., Kaiser P.K., Martin C.D. [123]	$c_{mob} = c_r + (c_i - c_r) \left[2 - \frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_q^{c.r.}}\right)} \right]$ $\varphi_{mob} = \varphi_i + A - B$ $A = (\varphi_{max} - \varphi_i) \left[\frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_q^{\varphi.max.}}\right)} - 1 \right]$ $B = (\varphi_{max} - \varphi_r) \left[\frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{2\varepsilon_q - \varepsilon_q^{\varphi.r.} - \varepsilon_q^{\varphi.max.}}{\varepsilon_q^{\varphi.r.} - \varepsilon_q^{\varphi.max.}}\right)} - 1 \right].$
Renami H.R., Martin C.D.	$c_{mob} = c_r + (c_i - c_r) \left[2 - \frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_q^{c.r.}}\right)} \right]$ $\varphi_{mob} = \varphi_r + (\varphi_i - \varphi_r) \left[2 - \frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_q^{\varphi.r.}}\right)} \right].$

Продолжение таблицы 3.2

<p>Chen J., Peng H., Fan J</p>	$c_{mob} = c_i \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_q^c}\right)^2\right)$ $\varphi_{mob} = \arcsin \begin{cases} 2 \sin(\varphi_i) \frac{\sqrt{\varepsilon_q \varepsilon_q^\varphi}}{\varepsilon_q + \varepsilon_q^\varphi}, \varepsilon_q < \varepsilon_q^\varphi \\ \sin(\varphi_i), \varepsilon_q \geq \varepsilon_q^\varphi \end{cases}$ $\psi = a \ln\left(b \frac{\varepsilon_q}{d(\varepsilon_q)^f} + 1\right)$ <p>где a, b, d, f – параметры закона упрочнения/разупрочнения / parameters of hardening/softening law</p>
<p>Vakili A.</p>	$c_{mob} = c_p - \frac{(c_p - c_r)\varepsilon_q}{\varepsilon_q^{cr}}$ $\varphi_{mob} = \varphi_p - \frac{(\varphi_p - \varphi_r)\varepsilon_q}{\varepsilon_q^{cr}}$ $\varepsilon_q^{cr} = \frac{12.5 - 0.125GSI}{100d}$ $d = \sqrt[3]{V_{el}}$

Примечание: c_i – начальное значение сцепления; c_r – остаточная величина сцепления; ε_q – эквивалентные пластические деформации; $\varepsilon_q^{c.r.}$ – эквивалентные пластические деформации на момент достижения остаточной прочности; φ_i – начальное значение угла внутреннего трения; φ_{max} – максимальное значение угла внутреннего трения на момент мобилизации всех площадок скольжения; φ_r – остаточная величина угла внутреннего трения на момент разрушения всех цементационных связей; $\varepsilon_p^{\varphi.max.}$ – величина эквивалентных пластических деформаций соответствующая максимальной величине угла внутреннего трения; $\varepsilon_p^{\varphi.r.}$ – величина эквивалентных пластических деформаций соответствующая остаточной величине угла внутреннего трения; V_{el} – объем конечного элемента; d – характерный размер конечного элемента.

Предложены также и обобщенные алгоритмы [134] получения функциональных зависимостей вида (3.3). И в том, и в другом случае параметры законов упрочнения/разупрочнения геоматериала определяются на основании калибровки по данным лабораторных испытаний пород. Некоторые из получивших наибольшее распространение законов упрочнения/разупрочнения среды, сведены в таблицу 3.2. Как видно, представленные зависимости являются феноменологическими, параметры их необходимо определять на основании калибровки по данным фактического деформирования и разрушения пород.

Для условий КФ АО «Апатит» предложенные Renami H.R. и Martin C.D в качестве законов упрочнения/разупрочнения среды для аналогичных условий [123], показали хорошую сходимость результатов натуральных замеров и модельного подхода (3.4):

$$\begin{aligned}
 c_{mob} &= c_r + (c_i - c_r) \left[2 - \frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_q^{c.r.}}\right)} \right], \\
 \varphi_{mob} &= \varphi_r + (\varphi_i - \varphi_r) \left[2 - \frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_q^{\varphi.r.}}\right)} \right].
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Для построения кривых упрочнения/разупрочнения породы в качестве исходных данных принимается прочность породы в условиях одноосного сжатия и угол внутреннего трения, соответствующий остаточной прочности. Величина прочности породного массива на сжатие определялась с учетом следующих допущений.

Как было показано в ряде исследований, в которых рассматривалось формирование зон хрупкого разрушения на контуре породных обнажений в натуральных условиях, величина прочности породного массива при которой порода начинала разрушаться в среднем, изменялась в диапазоне от 0.4 до 0.6 от прочности образца породы. Необходимо отметить, что было показано, что в отдельных случаях коэффициент перехода от прочности образца к условной прочности породного массива достигала величин 0.15–0.20.

Представленные выше коэффициенты перехода получены на основании сравнения максимальных напряжений на гладком контуре горной выработки без учета сформированных в результате ведения проходческих работ неровностей. При задании расчетной модели с учетом фактических неровностей контура горной выработки, значение переходного коэффициента составляет 0.7–0.8 от прочности породы в условиях одноосного сжатия, что достаточно близко к величине коэффициента перехода от прочности в образце к прочности породного массива, учитывающего масштабный эффект [69]. Для скальных пород величина этого коэффициента также может достигать величины 0.8.

С учетом того, что прогноз напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности сопряжений выполнен в пространственной постановке, задание неровного контура горных выработок в значительной степени увеличивает вычислительные ресурсы, в связи с чем при выполнении численного моделирования контур горных выработок принимался гладким, а переходной коэффициент равным 0.45, что достаточно хорошо согласуется с данными натуральных наблюдений за формированием зон хрупкого разрушения.

Значение угла внутреннего трения породы при достижении остаточной прочности φ_{res} обычно изменяется в диапазоне от 40 до 45°. Величина начального угла внутреннего трения φ_i при выполнении расчетов принималась равной 1/5 от φ_r . Начальная величина сцепления c_i

определена из величины прочности породы на одноосное сжатие $\sigma_{c.i}$. Остаточная величина сцепления породы c_r принята равной 1/25 от c_i .

3.3.2 Апробация модели для прогноза зон хрупкого разрушения в окрестности горных выработок

Для оценки корректности численной реализации рассмотренных положений модели хрупкого разрушения пород рассмотрены следующие типовые задачи:

- прогноз развития зон хрупкого разрушения пород в окрестности горных выработок подземной исследовательской лаборатории в Канаде [123];
- прогноз зон хрупкого разрушения пород для горно-геологических и геомеханических условий предприятий КФ АО «Апатит».

Ниже кратко приведена постановка задачи, включая начальные и граничные условия, а также параметры модели хрупкого разрушения пород.

Все расчеты выполнены при следующем наборе показателей модели хрупкого разрушения пород: прочностные параметры модели хрупкого разрушения пород сведены в таблицу 3.3 для механизированного и буровзрывного способов строительства. Модуль деформации пород принимался равным 60 ГПа, коэффициент поперечной деформации пород 0.25, прочность породы в условиях одноосного сжатия 3.7 МПа, угол дилатансии 30^0 .

Таблица 3.3 - Прочностные показатели модели хрупкого разрушения пород для условий горных выработок подземной лаборатории

Способ строительства	c_i , МПа	c_r , МПа	φ_i , град.	φ_r , град.	$\varepsilon_q^{c.r.}$, Д.е.
Механизированный способ строительства	55	5.5	0	42	0.005
Буровзрывной способ строительства	48	4.8	0	42	0.005

Прогноз напряженно-деформированного состояния в окрестности породного обнажения выполнялся для условий горных выработок подземной лаборатории объекта для захоронения радиоактивных отходов. Данные выработки представляют собой выработки кругового и овального поперечного сечения, пройденные в различных геомеханических условиях (рисунок 3.4). Строительство выработок осуществлялось как механизированным способом, так и буровзрывным способом. Основные параметры, характеризующие горнотехнические и геомеханические условия, сведены в таблицу 3.4.

Результаты прогноза зон хрупкого разрушения пород согласно предложенной модели упрочняющейся/разупрочняющейся среды в окрестности одиночной горной выработки показали хорошее согласие как по форме, так и по размеру этой зоны (рисунок 3.4).

Таблица 3.4 - Горнотехнические и геомеханические условия строительства горных выработок [34]

Наименование выработки	Геометрические параметры	Способ строительства	Начальное напряженное состояния породного массива, МПа				
			Положение сечения выработки относительно направления действия σ_1	σ_1	σ_2	σ_3	α , град.
Mine-by	Круглое сечение, диаметр выработки 3.5 м	Механизированный способ строительства	Поперек действия σ_1	60	45	11	11
TSX	Эллиптическое сечение, высота выработки 3.5 м, ширина выработки 4.4 м	Буровзрывная технология строительства	Вдоль действия σ_1				
ESS-M1	Эллиптическое сечение, высота выработки 3 м, ширина выработки 6.6 м	Буровзрывная технология строительства	Поперек действия σ_1				
ESS-U1	Эллиптическое сечение, высота выработки 3 м	Буровзрывная технология строительства	Поперек действия σ_1				

Примечание: σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные нормальные максимальные, средние и минимальные напряжения; α – угол отклонения направления действия минимальных главных напряжений от вертикальной оси.

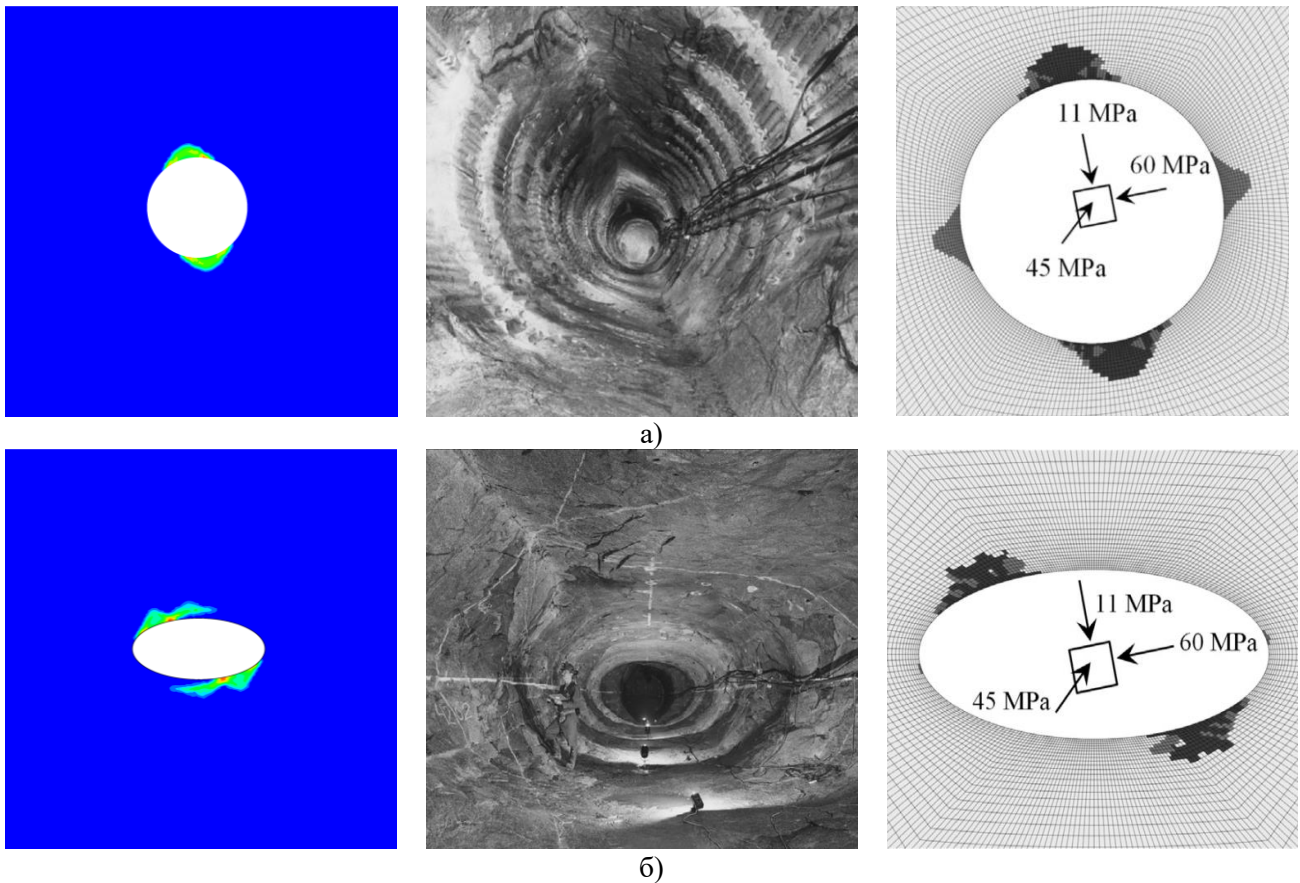


Рисунок 3.4 - Формирование зон хрупкого разрушения пород в окрестности горной выработки кругового очертания (а) и эллиптической формы (б) [123]

Как видно из представленных результатов, наблюдается хорошая сходимость между результатами численного моделирования, фактической картиной формирования зоны хрупкого разрушения пород в приконтурной зоне горной выработки и данными представленными в работе Н. Rafiei Renani, C.D. Martin.

Таким образом, корректность модели прогноза хон хрупкого разрушения пород, реализованная в программном комплексе Abaqus в виде пользовательской процедуры, подтверждена. Модель может быть использована для прогноза зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок.

3.3.3 Обоснование параметров математических моделей и граничных условий

Численное моделирование для одиночных горных выработок выполнено в пространственной постановке. Начальное поле напряженного состояния варьировалась в диапазоне σ_{max} от 125 до 245 МПа, что характеризует как существующие геомеханические условия разработки месторождений, так и их изменение по мере увеличения глубины разработки. При выполнении расчетов условно принято, что главное минимальное нормальное напряжение совпадает с величиной вертикального напряжения, в то время как главное среднее и максимальное соответствуют наименьшему и наибольшему горизонтальным напряжениям.

Граничные условия моделей стандартные для решения задач геомеханики такого типа. Смещения в направлении перпендикулярном границам модели запрещены. В начале напряженное состояние определялось с помощью тензора главных напряжений. Когда главные плоскости поворачивались относительно глобальных координат, тензор напряжений обновлялся с использованием соответствующей формулы (3.5):

$$\sigma' = T\sigma T^T, \quad (3.5)$$

где σ – тензор напряжений в глобальной системе координат;

σ' - тензор напряжений в глобальной системе координат после поворота главных площадок на соответствующий угол;

T – матрица трансформации напряжений.

Расчет напряженно-деформированного состояния в окрестности горной выработки выполняется для условий, когда соотношение максимальных напряжений на контуре выработки к прочности образца ненарушенной породы соответствует 0.5, 0.7 и 1.0. Приняв прочность породы равной 200 МПа и задавшись величиной вертикальных напряжений равных 20 МПа, получены начальные напряжения породного массива, сведенные в таблицу 3.5). Соотношение между σ_1/σ_2 с учетом фактических замеров величин напряжений, действующих в породном массиве рудниках КФ АО «Апатит», принято равным 2.

Параметры модели деформирования среды, адаптированные для условий КФ АО «Апатит», сведены в таблицу 3.6. Типовые диаграммы упрочнения/разупрочнения среды представлены на рисунке 3.5.

Таблица 3.5 – Начальное поле напряженного состояния

$\frac{\sigma_{\theta,max}}{\sigma_{c,i}}$	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа	σ_3 , МПа
0.5	40	20	20
0.7	55	27,5	20
1.0	80	40	20

Таблица 3.6 - Параметры модели деформирования горной породы

E_0 , МПа	ν	$\sigma_{c,i}$, МПа	c_i , МПа	c_r , МПа	φ_i , град.	φ_r , град.	ε_q^r , %
60000	0.3	150	28.9	1.15	9	45	0.5

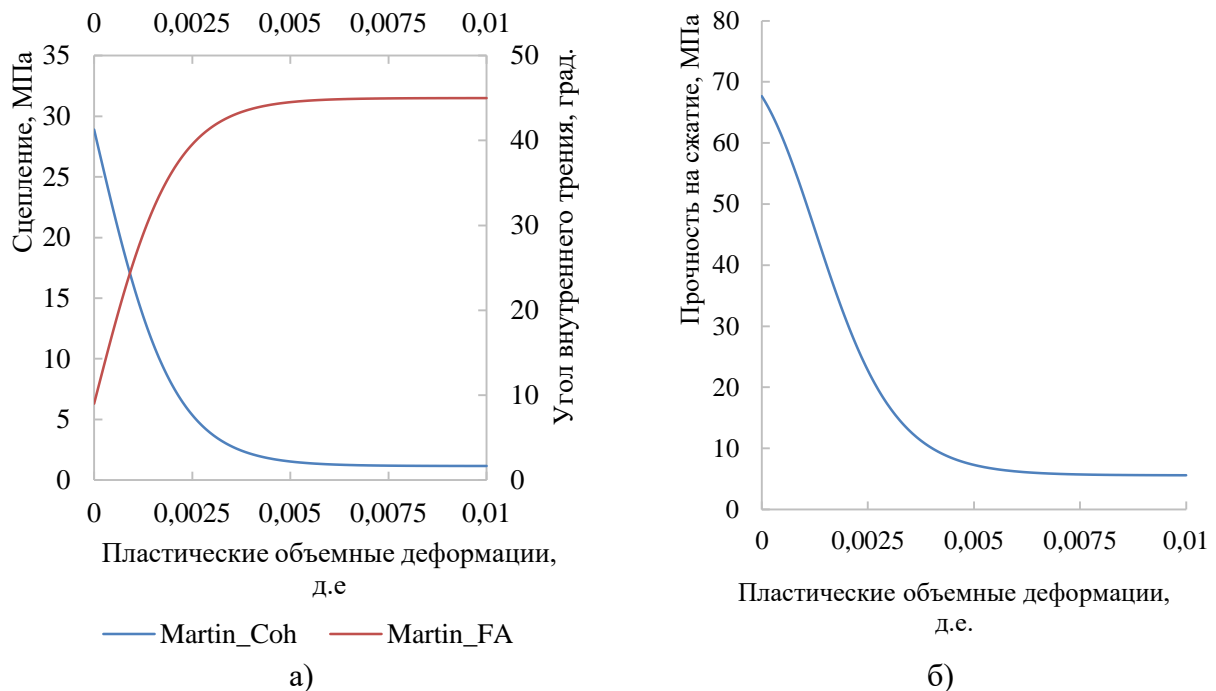


Рисунок 3.5 - Закон упрочнения/разупрочнения среды (а) и диаграмма пластического деформирования породы в условиях одноосного сжатия (б)

3.3.4 Выводы по проведенным расчетам

С помощью математических расчетов были определены участки массива, подверженные хрупкому разрушению (зоны раскалывания и расслоения пород) с последующим их сдвигом, формирующие значительные необратимые деформации породы. Характерная картина формирования такой зоны представлена на рисунке 3.6.

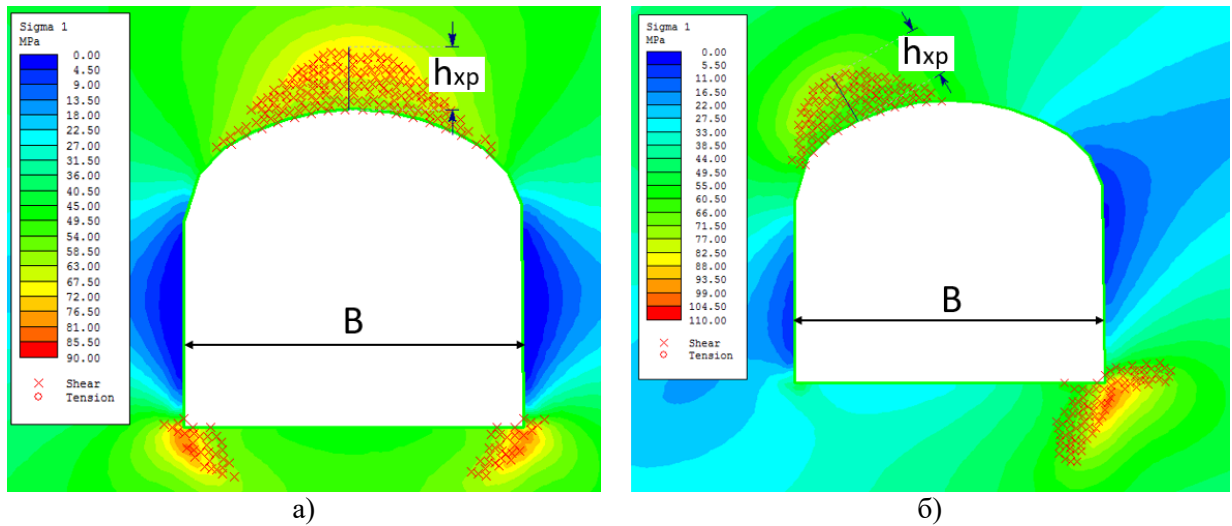


Рисунок 3.6 – Распределение главных максимальных напряжения в окрестности горной выработки и локализация зоны хрупкого разрушения пород в приконтурной зоне (соотношение главных напряжений 55:27,5:20): угол наклона главных напряжений 0^0 (а); угол наклона главных напряжений 30^0 (б)

Степень активности геомеханических процессов характеризуется соотношением площади зоны, подверженной хрупкому разрушению, к ширине самой выработки h_{xp}/B . Напряженность породного массива представлена в виде относительного показателя напряженного породного $\sigma_1/R_{сж}$ или относительного показателя вида напряженного состояния $(q + p)/R_{сж}$, где $R_{сж}$ – прочность породы в условиях одноосного сжатия. Величина относительной напряженности породного массива изменяется от 0.2 до 0.6, что в целом охватывает условия проведения горных выработок в породах категории от «В» до «Д».

В следующих разделах на основании описанных исходных данных представлены результаты расчетов для одиночных выработок и сопряжений горных выработок. Выполнена оценка влияния вида напряженного состояния на развитие геомеханических процессов в окрестности породного обнажения, поворота площадок главных напряжений. Выполнено сравнение результатов формирования зон хрупкого разрушения для различных условий проведения горных выработок и форм выработок, а также выработок со взаимным влиянием и в зонах сопряжения.

3.4 Численное моделирование развития геомеханических процессов в окрестности одиночной горной выработки

3.4.1 Разработка численных моделей

Численное моделирование прогноза развития напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности одиночной выработки выполнено в плоско-деформационной постановке. Размеры численной модели приняты 50x50 м, с условным размером горной выработки 5.1 м.

Рассмотрены два варианта геометрического представления горной выработки. Первый вариант представляет собой выработку с коробовым сводом, то есть конфигурация выработки соответствует проектным размерам. Второй вариант представляет выработку с плоским сводом, то есть ее возможная конфигурация после фактического проведения буровзрывных работ и выполнения работ по приведению выработки в безопасное состояние.

Последовательность моделирования развития напряженно деформированного состояния для различных вариантов расчетов сведена в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Последовательность моделирования развития напряженно-деформированного состояния в окрестности выработки

Одиночная выработка вне зоны влияния очистных работ	Одиночная выработка в зоне влияния очистных работ
1. Формирование начального напряженного состояния породного массива (рисунок 3.7,а) 2. Моделирование развития напряженно-деформированного состояния породного массива в результате формирования полости (горной выработки) в породном массиве (рисунок 3.7,б)	1. Формирование начального напряженного состояния породного массива (рисунок 3.7,а) 2. Моделирование развития напряженно-деформированного состояния породного массива в результате формирования полости (горной выработки) в породном массиве (рисунок 3.7,б) 3. Моделирование изменения НДС массива в результате подхода горных работ непосредственно к участку проведения горной выработки (рисунок 3.7,в) 4. Моделирование изменения НДС массива в окрестности горной выработки в результате непосредственного влияния горных работ на породный массив в окрестности горной выработки (рисунок 3.7,г-ж)

Граничные условия при решении задач принимались следующими. Смещения по низу модели запрещены в вертикальном направлении, по боковым граням в горизонтальном направлении. К верхней поверхности модели приложено эквивалентное давление. В процессе моделирования фиксировался размер зоны хрупкого разрушения. За размер зоны хрупкого разрушения пород принимался участок, характеризующийся значительным развитием эквивалентных пластических деформаций.

Влияние горных работ на изменение напряженно-деформированного состояния в окрестности выработки и размер зоны хрупкого разрушения рассмотрено в плоско-деформационной постановке. В процессе моделирования рассматривалось влияние горных работ на одиночную выработку, расположенную непосредственно под участком ведения горных работ.

Нагрузка от зоны обрушенных пород задавалась в виде эквивалентного давления, обусловленного удельным весом разрушенных пород и высотой этой зоны. Моделирование развития горных работ выполнялось поэтапно (рисунок 3.7, в-ж). Моделирование горных работ выполнялось за счет изменения механических характеристик пород в зоне непосредственного ведения горных работ и обнуления напряжений. В процессе расчета напряженное состояние элементов зоны ведения очистных работ формировалось снова за счет воздействия гравитационных сил и совместного деформирования с окружающими зону очистных работ породами нераздробленного сложения при их разгрузке.

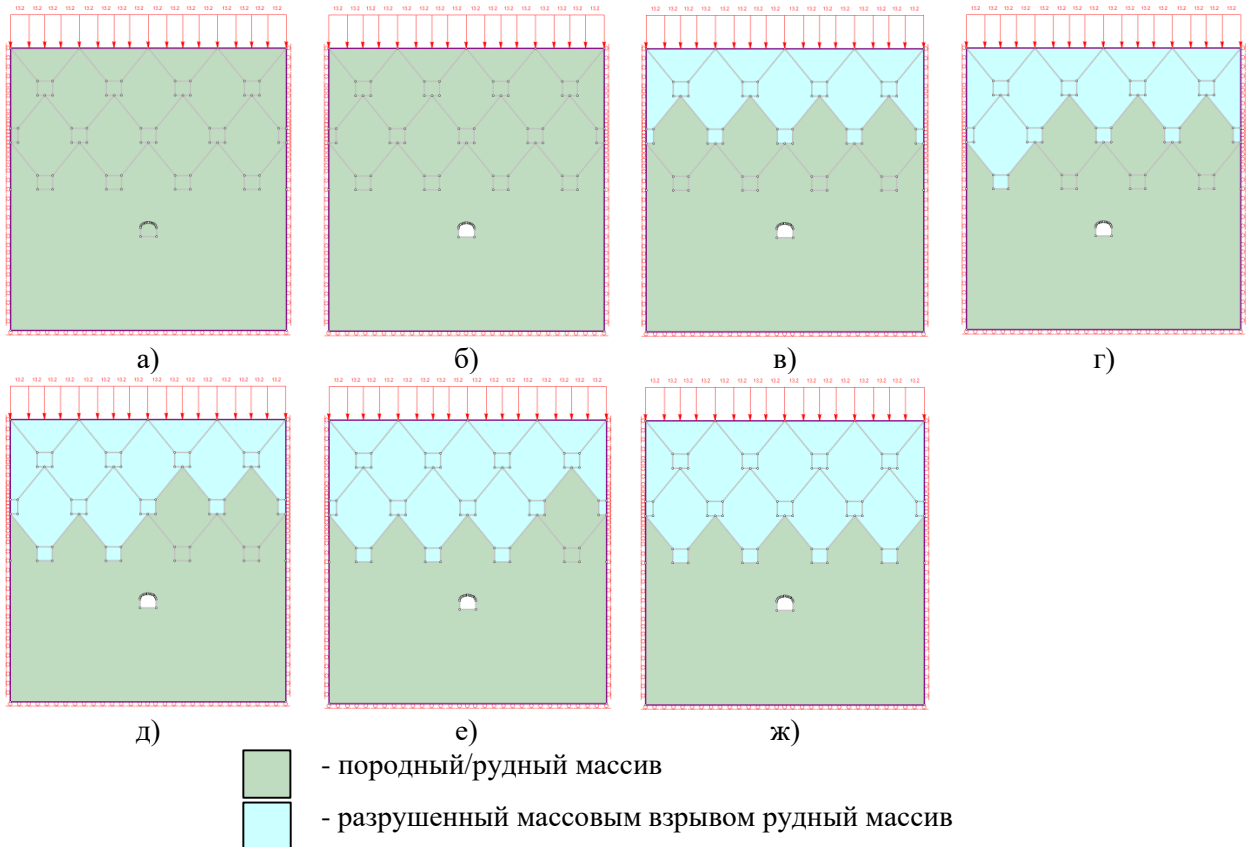


Рисунок 3.7 - Последовательность моделирования: а-ж – этапы развития горных работ

3.4.2 Оценка влияния направления действия главных напряжений на размер и характер формирования зоны хрупкого разрушения

Прогноз размера зон хрупкого разрушения в окрестности одиночной выработки выполнен по двум наборам механических характеристик, один из которых (нижний предел) позволяет оценить минимальный размер зоны хрупкого разрушения, в то время как второй набор (верхний предел) показывает максимальный размер зоны хрупкого разрушения. Размеры зон представлены для одиночной выработки с плоским сводом (рисунок 3.8,а) и арочным сводом (рисунок 3.8,б).

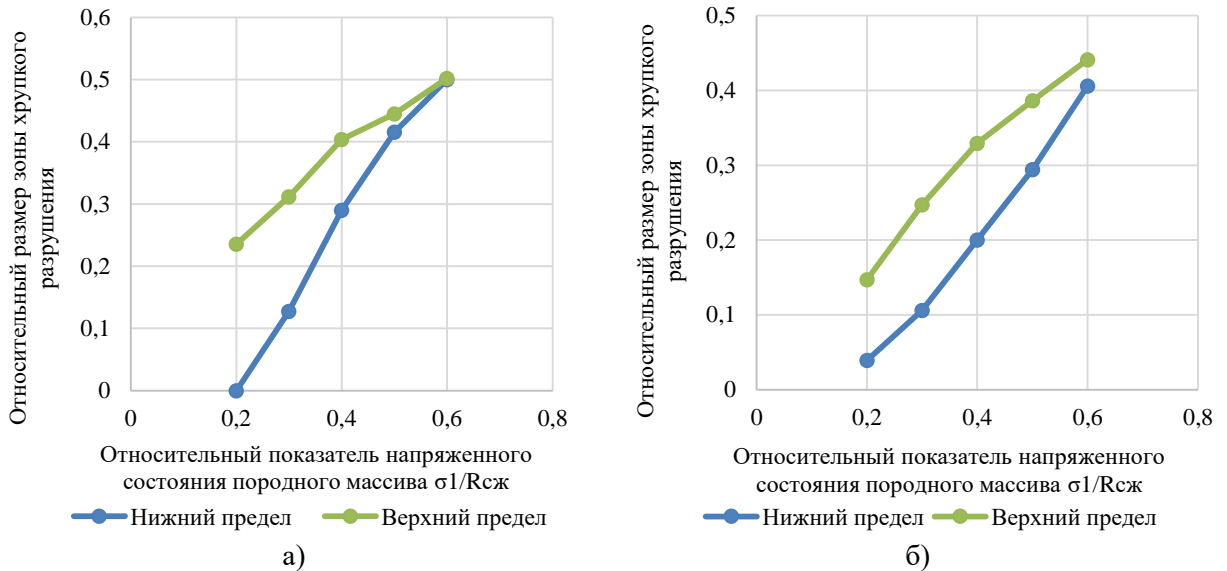


Рисунок 3.8 – Размер зоны хрупкого разрушения пород в окрестности одиночной выработки: плоской свод (а); арочный свод (б)

Результаты расчетов показывают, что изменение относительного показателя напряженности породного массива с 0.2 до 0.6 приводит к изменению относительно размера зоны хрупкого разрушения с 0 до 0.5 по нижнему пределу и с 0.25 до 0.5 по верхнему пределу при плоском своде. При арочном своде величина относительно размера зоны хрупкого разрушения изменяется с 0.05 до 0.4 по нижнему пределу и с 0.15 до 0.45 по верхнему пределу.

В целом можно отметить, что размер зоны хрупкого разрушения, если рассматривать результаты по верхнему пределу выше при плоском своде по сравнению с арочным сводом. Величина зоны хрупкого разрушения в окрестности выработки в среднем при плоском своде по сравнению с арочным сводом выше на величину подъемистости свода. Связь между величиной относительной напряженности породного массива и размером зоны хрупкого разрушения в целом подчиняется линейному закону. Необходимо отметить, что по мере увеличения показателя напряженности породного массива с 0.2 до 0.6 размер зоны по нижнему и верхнему пределам сходятся.

Результаты расчета зоны хрупкого разрушения при плоском своде выработки при различных углах поворота площадок главных напряжений относительно глобальной системы координат показывают (рисунок 3.9,а), что размеры зоны остаются примерно в одном диапазоне при угле θ от 0 (горизонтальные напряжения наибольшие) до 60° и она несколько увеличивается при достижении θ от 90° (вертикальные напряжения наибольшие). Увеличение размера зоны хрупкого разрушения при θ от 90° объясняется наличием плоского вертикального участка стены выработки. Результаты расчета получены по верхнему пределу. Перестроив данные (рисунок 3.9,б) можно наглядно удостовериться о незначительном влиянии угла наклона площадок главных напряжений на размер зоны хрупкого разрушения. Наибольшее влияние наблюдается при $\sigma_1/R_{сж} = 0.2$.

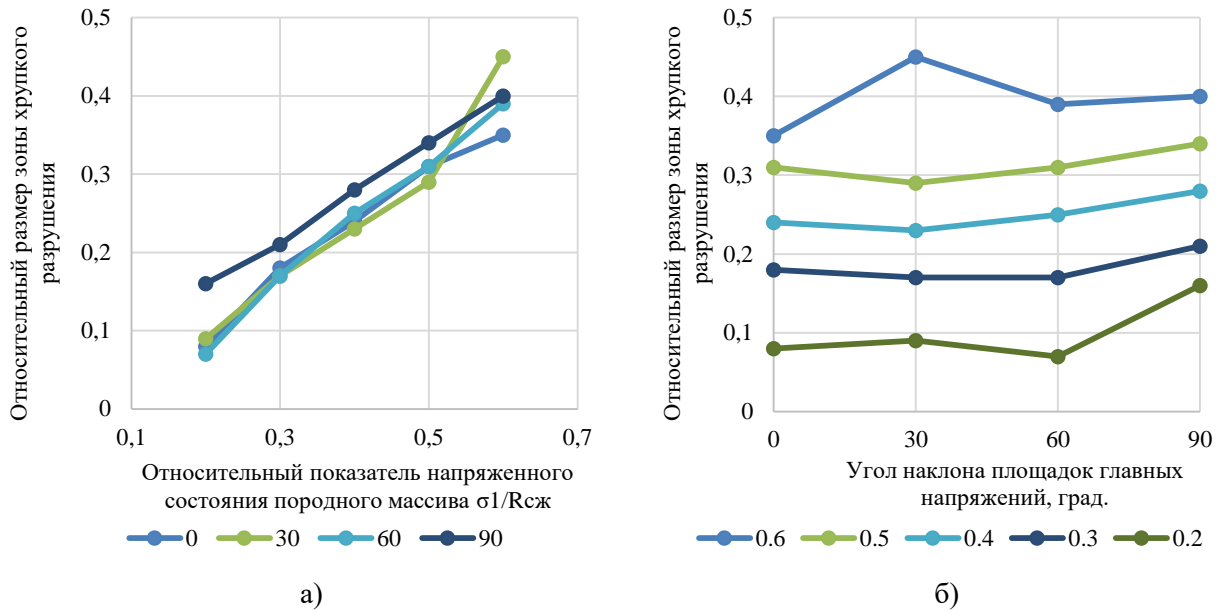


Рисунок 3.9 – Размер зоны хрупкого разрушения пород в окрестности одиночной выработки (арочный свод) при различных углах наклона площадок главных напряжений

Результаты расчета зоны хрупкого разрушения при арочном своде выработки при различных углах поворота площадок главных напряжений относительно глобальной системы координат показывают (рисунок 3.10, а), что размер зоны хрупкого разрушения максимален при угле θ равном 0^0 (горизонтальные напряжения наибольшие) и постепенно уменьшается до конечного значения при θ равном 90^0 (вертикальные напряжения наибольшие).

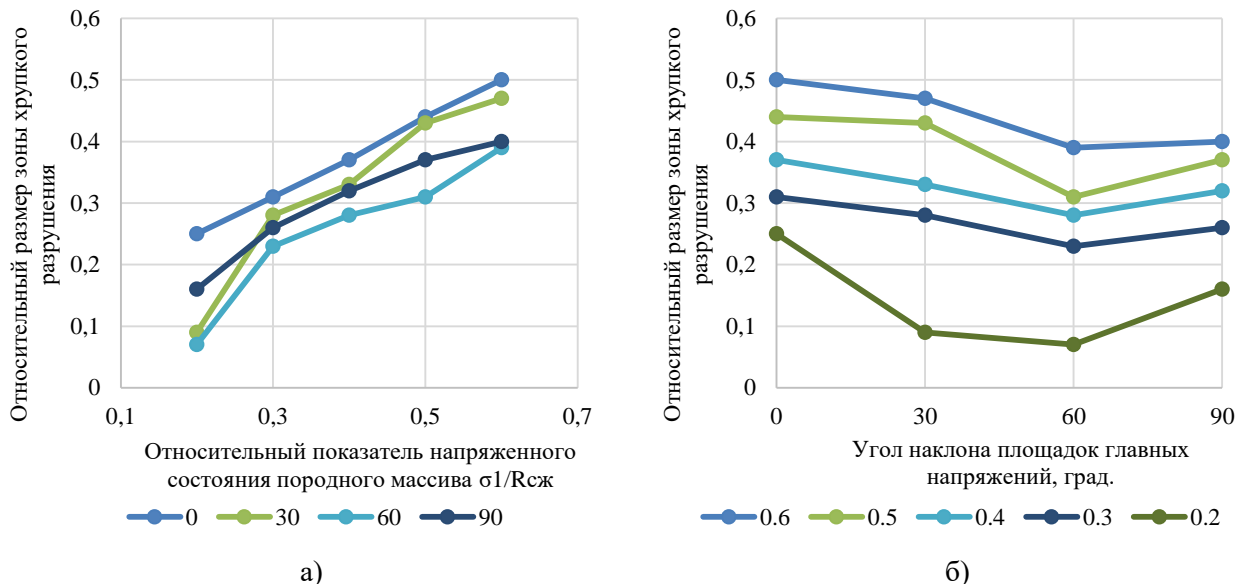


Рисунок 3.10 – Размер зоны хрупкого разрушения пород в окрестности одиночной выработки (арочный свод) при различных углах наклона площадок главных напряжений

Такая тенденция сохраняется при $\sigma_1/R_{сж}$ от 0.3 до 0.6. При величине $\sigma_1/R_{сж} = 0.2$ минимальная величина размера зоны хрупкого разрушения наблюдается при углах θ от 30^0 до 60^0 .

Характер распределения зон в окрестности выработок в зависимости от напряженного состояния породного массива и угла поворота площадок главных напряжений представлены на рисунках 3.11-3.13.

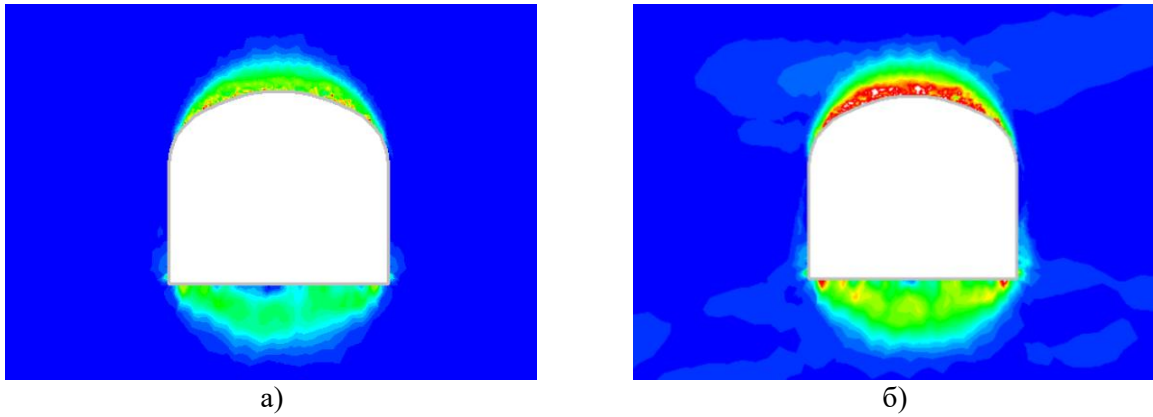


Рисунок 3.11 – Формирование зон хрупкого разрушения пород в окрестности горной выработки после проведения горной выработки (а) и после проведения горных работ в соответствии с расчетной схемой (б) для угла наклона главных напряжений $\theta = 0^\circ$

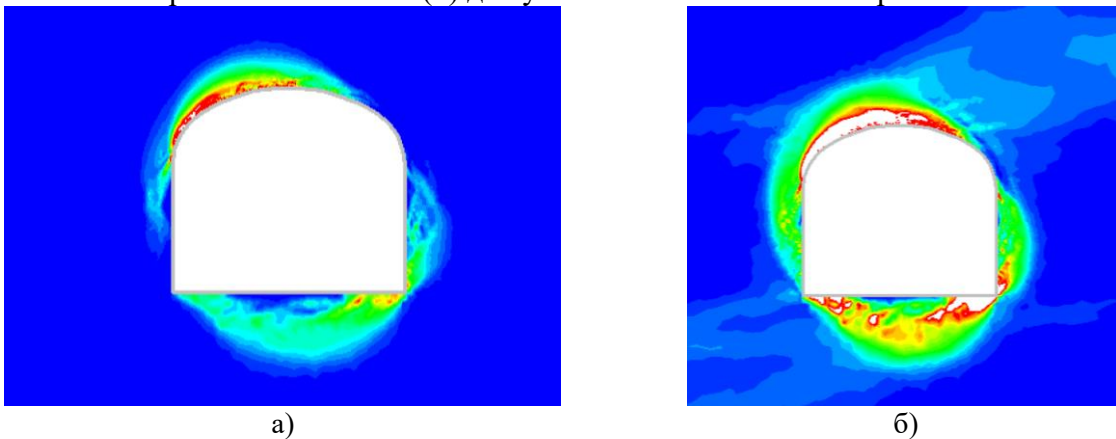


Рисунок 3.12 – Формирование зон хрупкого разрушения пород в окрестности горной выработки после проведения горной выработки (а) и после проведения горных работ в соответствии с расчетной схемой (б) для угла наклона главных напряжений $\theta = 30^\circ$

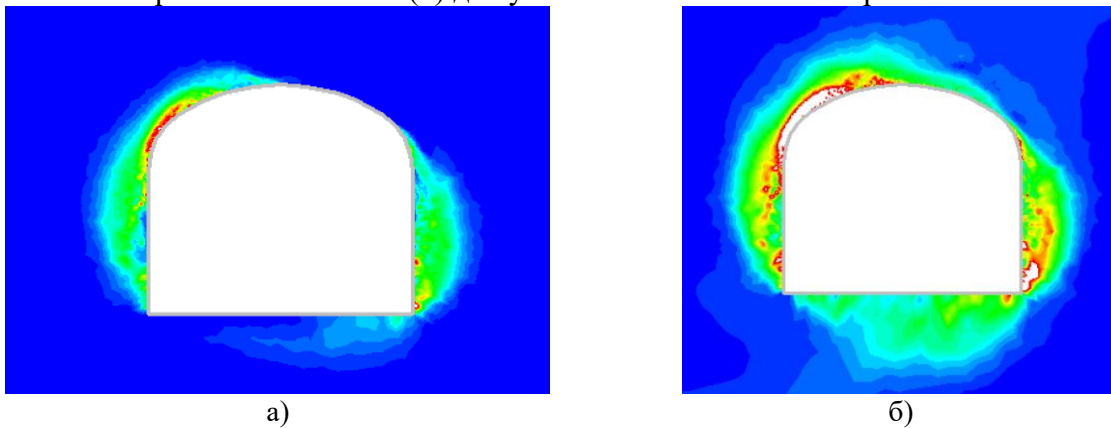


Рисунок 3.13 – Формирование зон хрупкого разрушения пород в окрестности горной выработки после проведения горной выработки (а) и после проведения горных работ в соответствии с расчетной схемой (б) для угла наклона главных напряжений $\theta = 60^\circ$

Таким образом, естественное напряженное состояние массива существенно влияет на характер формирования зон хрупкого разрушения на контуре горной выработки. Так, если направление действия главных максимальных напряжений совпадает с направлением горизонтальной оси, то зона хрупкого разрушения преимущественно формируется в своде выработки и ниже уровня почвы, в то время как при повороте направления главных напряжений относительно горизонтальной оси, зона хрупкого разрушения не только смещается относительно

сводовой части горной выработки по направлению к пяте свода, но начинает охватывать стенки выработки. В целом, в рассматриваемых условиях зоны хрупкого разрушения локализуются в определенной части горной выработки и не распространяются по всему периметру, что облегчает задачу прогноза размеров зон и нагрузок на крепь.

3.4.3 Оценка влияния соотношения главных напряжений на размер и характер формирования зон хрупкого разрушения

Оценка влияния соотношения главных напряжений на размер и характер формирования зоны хрупкого разрушения выполнялась для породного массива представленного соотношениями $\sigma_1/R_{сж}$ равных 0.4 и 0.5. Соотношение между главными напряжениями $\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3$ приняты 4:2:1, 3:2:1, 2:1.5:1, 1:1:1, где σ_3 – всегда равна величине вертикальных напряжений (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Исходные поля напряжений для расчета зон хрупкого разрушения

Соотношение напряжений	Значение главных напряжений (МПа)		
	σ_1	σ_2	σ_3
Вариант 1			
4:2:1	40	20	10
3:2:1	30	20	10
2:1.5:1	20	15	10
1:1:1	10	10	10
Вариант 2			
4:2:1	60	30	15
3:2:1	45	30	15
2:1.5:1	30	22.5	15
1:1:1	15	15	15
Вариант 3			
4:2:1	80	40	20
3:2:1	60	40	20
2:1.5:1	40	30	20
1:1:1	20	20	20

Построение диаграммы, характеризующей изменение размера зоны хрупкого разрушения и в то же время вид напряженного состояния, основанной на показателе относительной напряженности породного массива, невозможно, так как данный показатель не учитывает вид напряженного состояния.

Для того, чтобы учесть объемный характер напряженного состояния породного массива, удобно воспользоваться инвариантами напряжений p (средние напряжения) и q (интенсивность касательных напряжений), где первый характеризует средние напряжения в массиве, таким образом определяет абсолютную напряженность пород, в то время как второй показатель

характеризует отличие напряжений от среднего значения. Каждый из этих показателей в отдельности не позволяет хорошо описать взаимосвязь между напряженным состоянием и размером зоны хрупкого разрушения. Комбинация двух инвариантов напряжения, отнесенных к величине прочности одноосного сжатия породы, позволяет достаточно хорошо описать связь между напряжениями породного массива и размерами зоны хрупкого разрушения. Этот параметр характеризуется как относительный показатель вида напряженного состояния породного массива.

Результаты расчетов для выработки с плоским сводом и арочным сводом сведены в таблицы 3.9, 3.10.

Таблица 3.9 – Результаты расчета влияния вида напряженного состояния на размер зоны хрупкого разрушения в своде выработки (арочный свод)

Главные напряжения, МПа			Относительный показатель вида напряженного состояния породного массива $\frac{p+q}{R_{сж}}$	Зона хрупкого разрушения	
σ_1	σ_2	σ_3		Абсолютная, м	Относительная, д.е.
40	20	10	1.09	1.38	0.27
30	20	10	0.77	0.89	0.17
20	15	10	0.44	0.5	0.10
10	10	10	0.11	0.1	0.02
60	30	15	1.64	2.07	0.41
45	30	15	1.15	1.57	0.31
30	22.5	15	0.66	1	0.20
15	15	15	0.17	0.2	0.04
80	40	20	2.18	2.96	0.58
60	40	20	1.53	2.03	0.40
40	30	20	0.88	1.44	0.28
20	20	20	0.22	0.27	0.05

Таблица 3.10 – Результаты расчета влияния вида напряженного состояния на размер зоны хрупкого разрушения в своде выработки (плоский свод)

Главные напряжения, МПа			Показатель напряженности породного массива $\frac{p+q}{R_{сж}}$	Зона хрупкого разрушения	
σ_1	σ_2	σ_3		Абсолютная, м	Относительная, д.е.
40	20	10	1.09	2.12	0.42
30	20	10	0.77	1.71	0.34
20	15	10	0.44	0.51	0.10
10	10	10	0.11	0.2	0.04
60	30	15	1.64	2.85	0.56
45	30	15	1.15	2.28	0.45
30	22.5	15	0.66	1.6	0.31
15	15	15	0.17	0.3	0.06
80	40	20	2.18	3.5	0.69
60	40	20	1.53	2.8	0.55
40	30	20	0.88	1.82	0.36
20	20	20	0.22	0.2	0.04

Результаты расчетов размера зоны хрупкого разрушения в зависимости от вида напряженного состояния представлены в виде диаграмм для выработки с арочным сводом и плоским сводом (рисунки 3.14, 3.15).

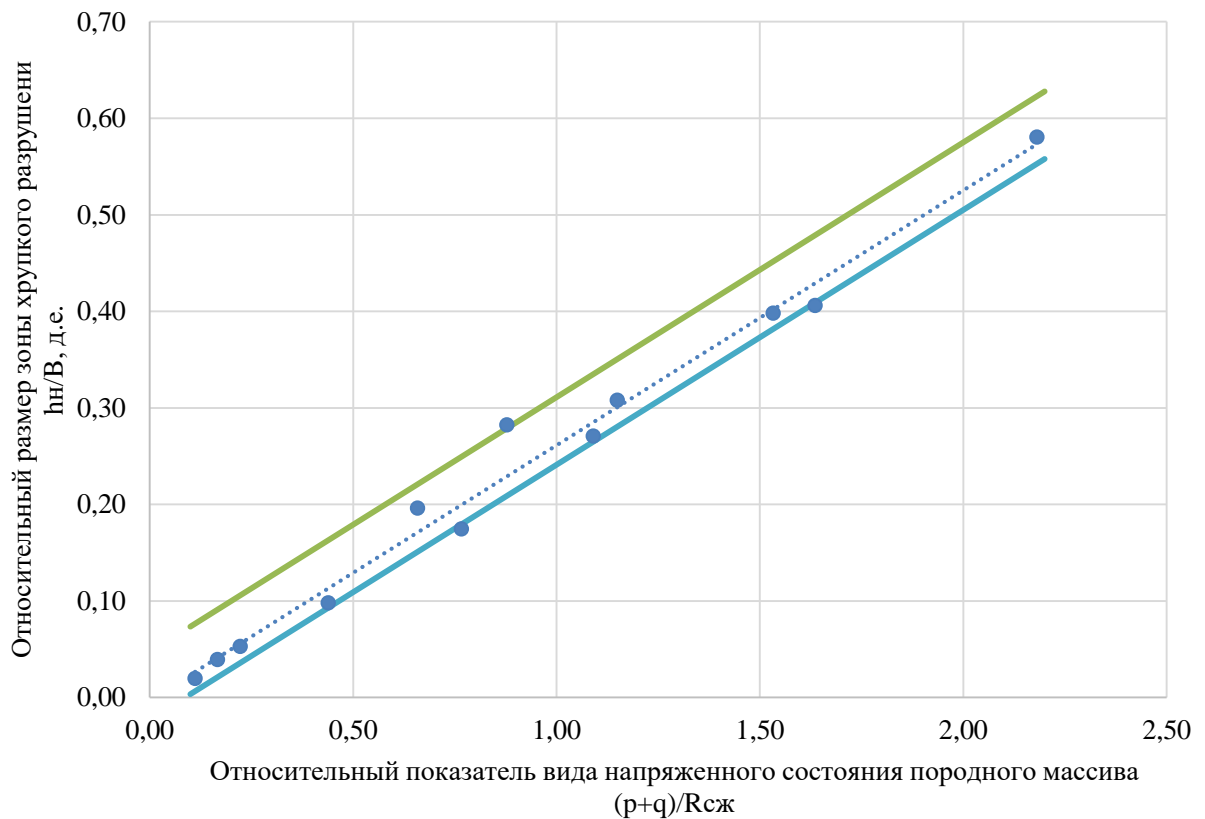


Рисунок 3.14 – Диаграмма размера зоны хрупкого разрушения в окрестности одиночной выработки с арочным сводом при различных видах напряженного состояния

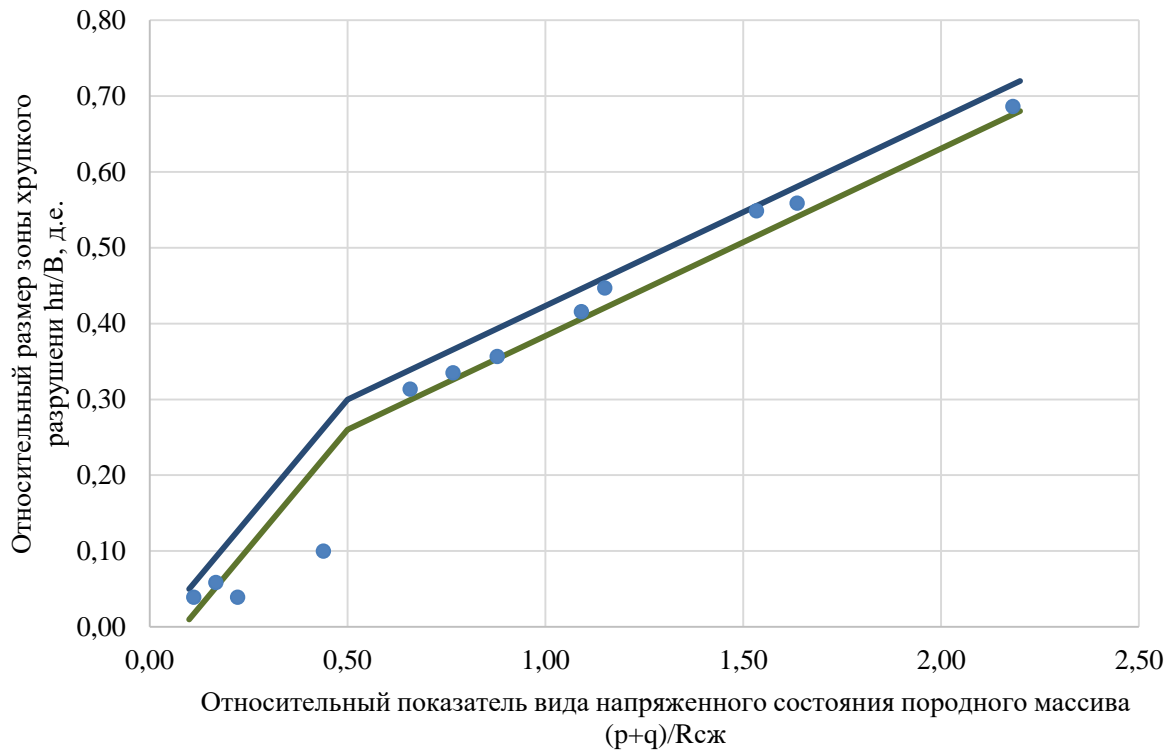


Рисунок 3.15 – Диаграмма размера зоны хрупкого разрушения в окрестности одиночной выработки с плоским сводом при различных видах напряженного состояния

Видно, что для выработки с арочным сводом результаты можно аппроксимировать двумя параллельными линиями, пространство между которыми характеризует возможный диапазон изменения размера зоны хрупкого разрушения. Относительный размер зоны хрупкого разрушения в рассматриваемом диапазоне напряжений и видах напряженного состояния изменяется от 0 до 0.6.

Для выработки с плоским сводом полученная зависимость имеет более сложный вид, в ней можно выделить два участка. Первый участок характеризует изменение относительного размера зоны в диапазоне изменения $(p + q)R_{сж}$ от 0 до 0.5. Далее угол наклона линий уменьшается и начинается второй участок, характеризующий изменение относительного размера зоны хрупкого разрушения в диапазоне изменения $(p + q)R_{сж}$ от 0.5 до 2.5. Величина относительного размера зоны хрупкого разрушения изменяется от 0 до 0.7.

Полученные диаграммы позволяют описать изменение размера зоны хрупкого разрушения в виде простой аналитической зависимости, которая будет описана далее.

3.4.4 Сравнение результатов с эмпирической методикой

Результаты расчетов численным методом сравниваются с размерами зоны хрупкого разрушения, получаемыми по эмпирической методике, представленной в «Инструкции по креплению и управлению кровлей...». С учетом того, что в эмпирической формуле изменение напряженного состояния породного массива не задается в явном виде, сравнение между

результатами расчета размера зоны хрупкого разрушения выполнено с привязкой к параметру B (ширина горной выработки).

При сравнении по эмпирической формуле и результатам численного расчета оценивается влияние параметра B на величину зоны хрупкого разрушения (рисунок 3.16).

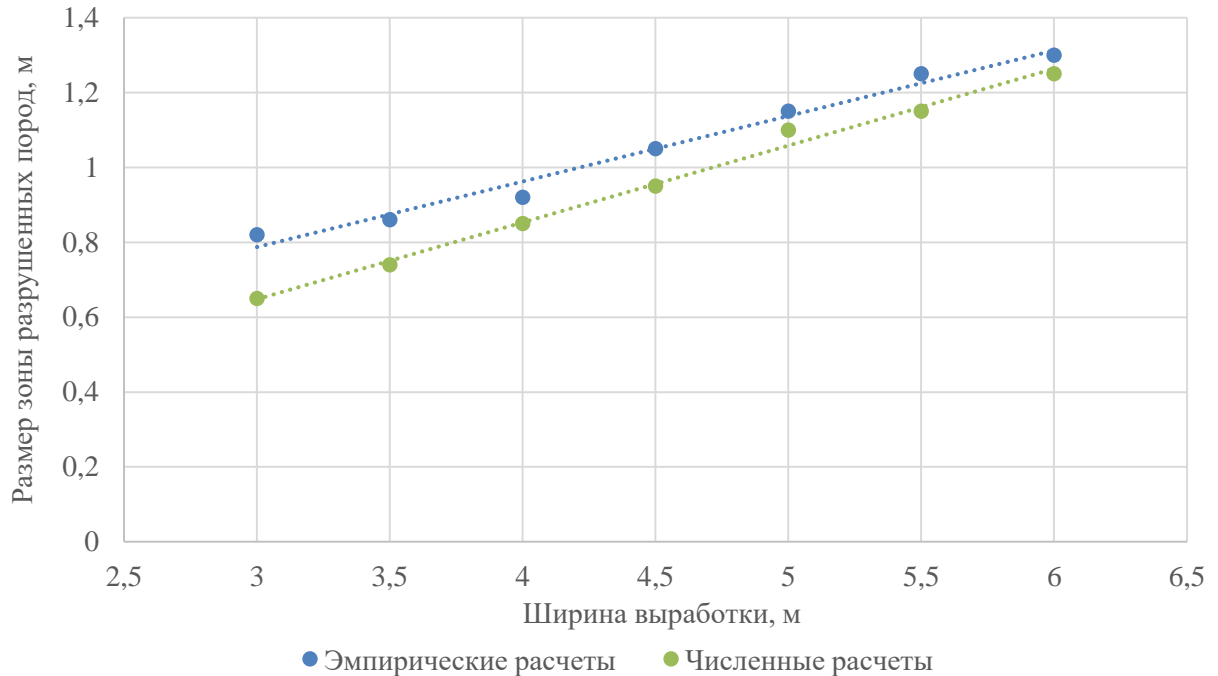


Рисунок 3.16 – Результаты сравнения численных расчетов и расчетов по эмпирической методике

Видно, что скорость изменения размера зоны хрупкого разрушения по разным методикам различна, при этом скорость изменения размера зоны хрупкого разрушения выше по результатам математического моделирования. Необходимо отметить, что эмпирическая методика не учитывает вид напряженного состояния, поэтому скорость изменения нагрузки при различном объемном напряженном состоянии одинакова, в то время как результаты численного расчета показывают некоторое влияние вида напряженного состояния на скорость изменения размера зоны хрупкого разрушения, поэтому эти результаты можно считать более достоверными.

3.5 Численное моделирование развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок

3.5.1 Разработка численных моделей

Для прогноза развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок рассмотрены типовые для условий КФ АО «Апатит» виды сопряжений (рисунок 3.17): одностороннее сопряжение, двухстороннее сопряжение с арочным сводом (Тип А), двухстороннее сопряжение с плоским сводом (Тип Б); двухстороннее сопряжение с купольным сводом (Тип В). Размеры сопрягающихся выработок принимались равными друг другу.

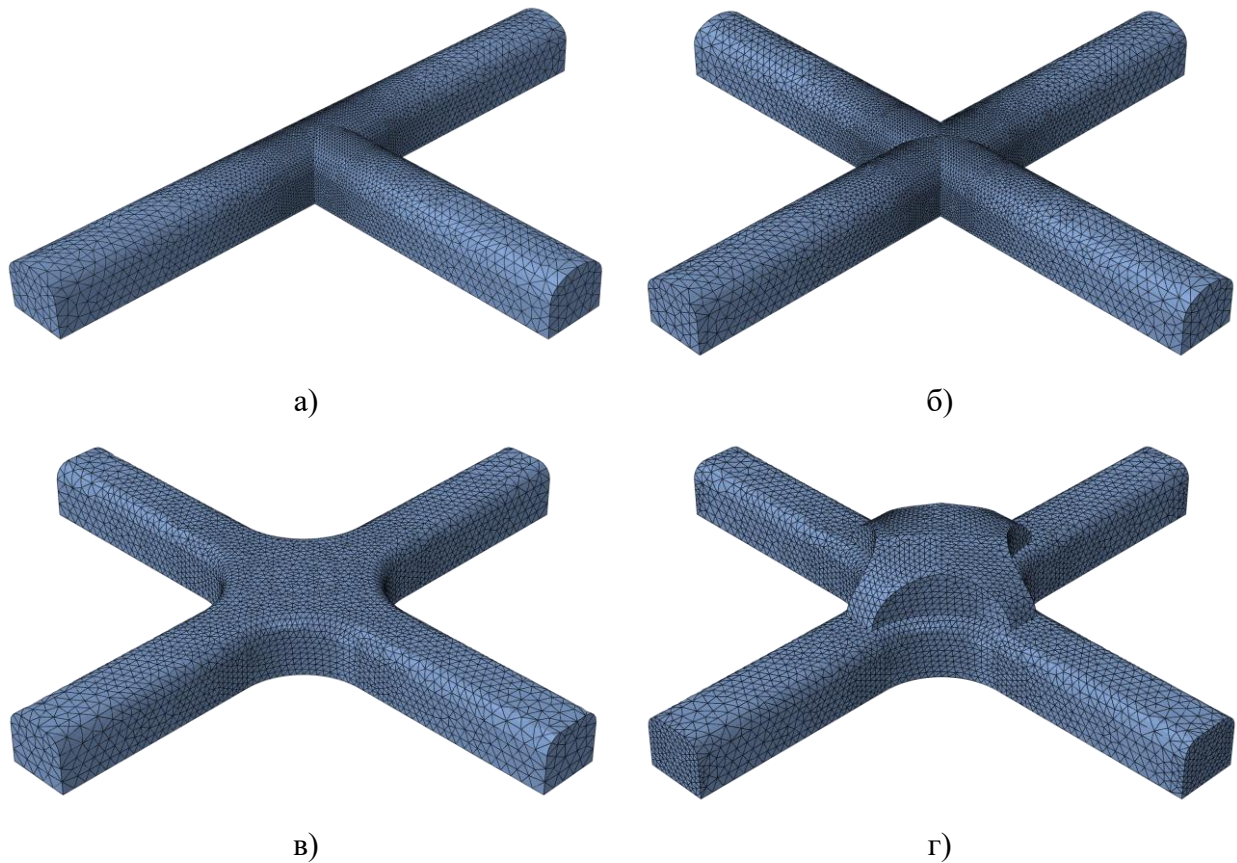


Рисунок 3.17 - Модель прогноза напряженно-деформированного состояния сопряжений горных выработок: одностороннее сопряжение (а); двухстороннее сопряжение – Тип А (б); двухстороннее сопряжение – Тип Б (в); двухстороннее сопряжение – Тип В (г)

Численное моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния в окрестности горных выработок выполнено в обобщенной плоско-деформационной постановке (трехмерная постановка с заданием соответствующих граничных условий). Начальное поле напряженного состояния задавалось в виде тензора напряжений, который в каждой точке рассматриваемой модели одинаковый. С учетом того, что направление действия главных напряжений не совпадает с глобальной системой координат рассматриваемой модели, выполнено преобразование исходного тензора напряжений в требуемый. Такое преобразование выполнялось по зависимости (3.6):

$$\sigma_{\text{глоб}} = A \times \sigma_{\text{исх}} A^T, \quad (3.6)$$

где A – матрица трансформации напряжений;

$\sigma_{\text{исх}}$ – тензор исходного поля напряженного состояния;

$\sigma_{\text{глоб}}$ – тензор напряженного состояния после трансформации.

Граничные условия при выполнении численного моделирования приняты следующими: смещения в направлении, перпендикулярном поверхностям модели, запрещены. Границы модели удалены от участка сопряжения на 10 эквивалентных диаметров выработки, что

достаточно для минимизации влияния граничных условий на развитие напряженно-деформированного состояния в окрестности сопряжения.

3.5.2 Анализ результатов развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок

Прогноз размера зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжений выполнен по двум наборам механических характеристик, один из которых (нижний предел) позволяет оценить минимальный размер зоны хрупкого разрушения, в то время как второй набор (верхний предел) показывает максимальный размер зоны хрупкого разрушения. Размеры зон представлены для двухстороннего сопряжения с плоским сводом (рисунок 3.18, а) и арочным сводом (рисунок 3.18, б).

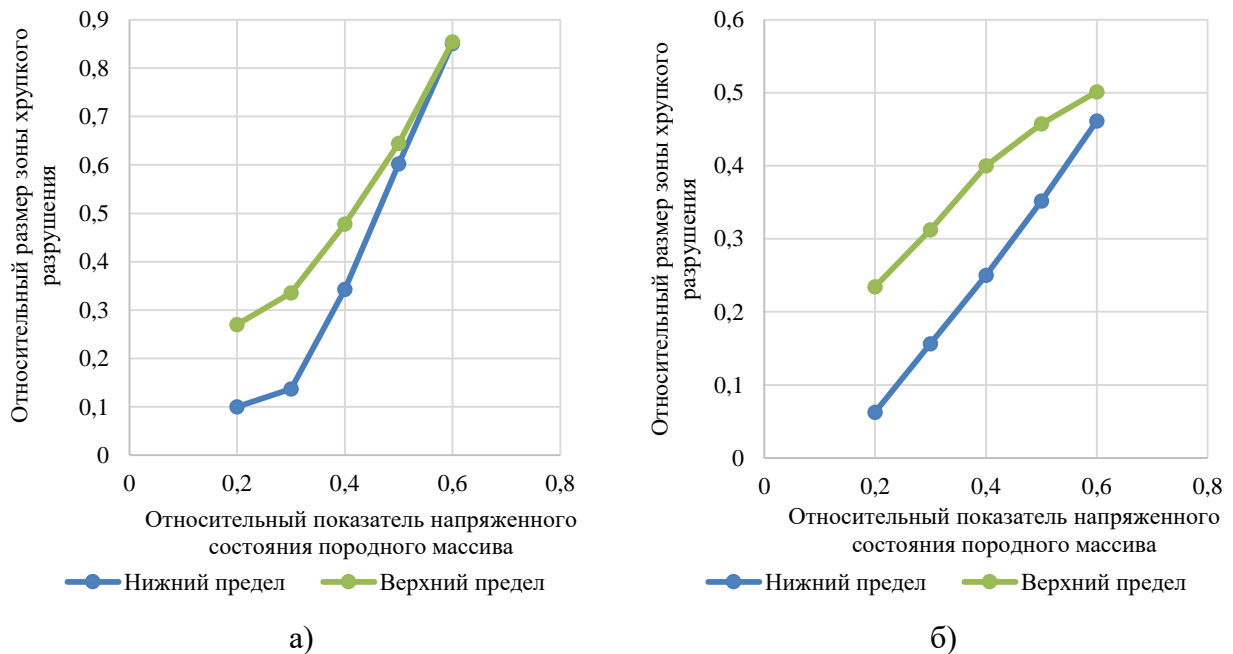


Рисунок 3.18 – Размер зоны хрупкого разрушения пород в окрестности одиночной выработки: а – плоской свод; б – арочный свод

Детальные картины развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжений при различных величинах напряженного состояния породного массива приведены на рисунке 3.19. На левой стороне рисунка представлена пространственная форма зоны хрупкого разрушения пород, на правой стороне контуры зон хрупкого разрушения по центру сопряжения, на контакте сопрягающихся выработок и на удалении от сопряжения.

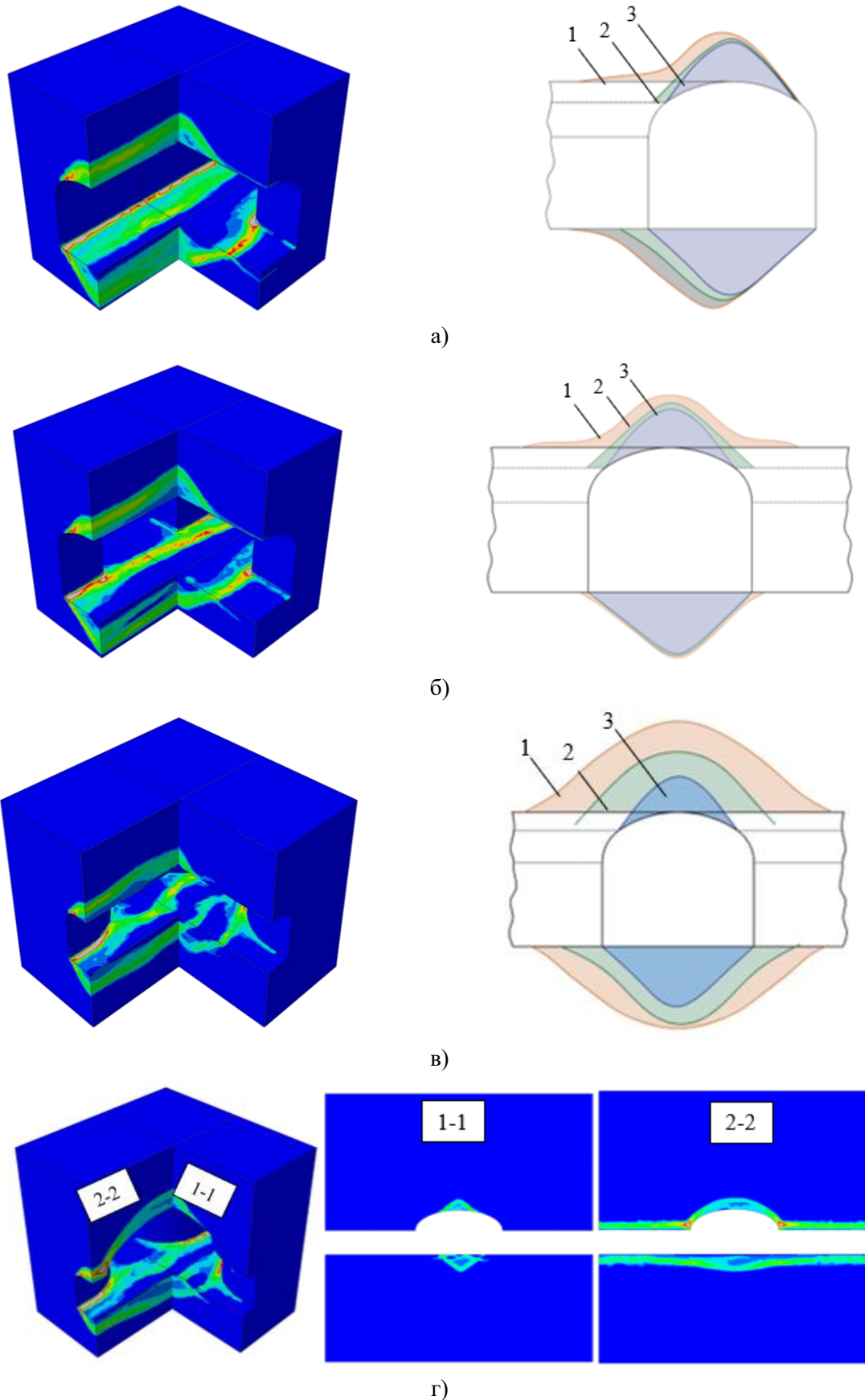


Рисунок 3.19 - Картины формирования зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжений: одностороннего (а); двухстороннего, тип А (б); двухстороннего, тип Б (в); двухстороннего, тип В (г); 1 – граница зоны хрупкого разрушения пород на участке сопряжения; 2 – граница зоны хрупкого разрушения пород на участке подхода к сопряжению; 3 – граница зоны хрупкого разрушения на удалении от сопряжения

Размер зоны хрупкого разрушения постепенно увеличивается по мере приближения к центру сопряжения, в центре сопряжения расширяется и переходит на выработку, расположенную в направлении действия максимальных главных напряжений.

Данная картина характерна для всех рассмотренных типов сопряжений горных выработок. Таким образом, обрушение может происходить не только непосредственно в своде сопряжения, но и в виде отдельных пластин в сопрягаемой выработке, отнесенной по напряженному состоянию породного массива к средненапряженному

Граница зоны хрупкого разрушения формируется в виде поверхности с Λ -образным поперечным сечением. Анализ представленных результатов численного моделирования также позволяет говорить о том, что увеличение размера зоны хрупкого разрушения тем больше, чем больше формируемый сопрягаемыми выработками пролет. Максимальный размер зоны хрупкого разрушения пород (таблица 3.11) формируется в окрестности двухстороннего сопряжения – Тип Б, характеризуемого плоской кровлей. При сводчатой кровле (двухстороннее сопряжение – Тип В) размер зоны хрупкого разрушения пород снижается. Однако, если принять во внимание высоту подъема свода такого сопряжения, формируемого на стадии ведения проходческих работ, можно отметить, что полная высота свода после формирования зоны хрупкого разрушения пород в сопряжениях типа Б и В сопоставима.

Таблица 3.11 - Размеры зоны хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжения

Тип сопряжения	Размер зоны хрупкого разрушения (м) в зависимости от положения рассматриваемого участка от центра сопряжения		
	На удалении сопряжения	На подходе к сопряжению	Центр сопряжения
Одностороннее сопряжение	1.21	1.31	1.50
Двухстороннее сопряжение – Тип А	1.21	1.40	1.65
Двухстороннее сопряжение – Тип Б	1.21	2.04	3.08
Двухстороннее сопряжение – Тип В	1.21	1.60	2.17

Размер зоны хрупкого разрушения на сопряжениях в сравнении с одиночными выработками больше в 1.4-1.8 раз при куполообразном своде сопряжения, до 2.5 раз – при плоском своде сопряжения это подтверждено численным моделированием и натурными измерениями.

Размер зоны хрупкого разрушения по длине сопрягающихся выработок различен, что связано с различием в величинах наибольших и наименьших горизонтальных напряжений

(таблица 3.12). В целом форма зоны хрупкого разрушения напоминает полусферу эллипсоидной формы.

Таблица 3.12 - Формирование зон хрупкого разрушения пород в окрестности горной выработки при различных величинах напряженного состояния породного массива

Тип сопряжения	Размер зоны хрупкого разрушения (м) в зависимости от величины максимальных напряжений σ_{max} (МПа)				
	125	155	185	215	245
Одностороннее сопряжение	1.21/1.29	1.50/1.82	1.75/2.26	2.02/2.65	2.21/2.90
Двухстороннее сопряжение – Тип А	1.21/1.31	1.50/1.86	1.75/2.32	2.02/2.74	2.21/3.01

Изучение влияния геомеханического состояния породного массива на формирование зон хрупкого разрушения (таблица 3.12, рисунок 3.20) позволяет утверждать, что с увеличением относительного показателя напряженного состояния породного массива наблюдается быстрое увеличение размера зоны хрупкого разрушения на участке сопряжения относительно такого размера в одиночной выработке. Это характерно вплоть до величины $\sigma_{отн}$, равной 1.0. Дальнейший рост показателя $\sigma_{отн}$ сопровождается снижением скорости роста отношения размеров зон хрупкого разрушения пород и при достижении им величин 1.4–1.6 этот рост останавливается.

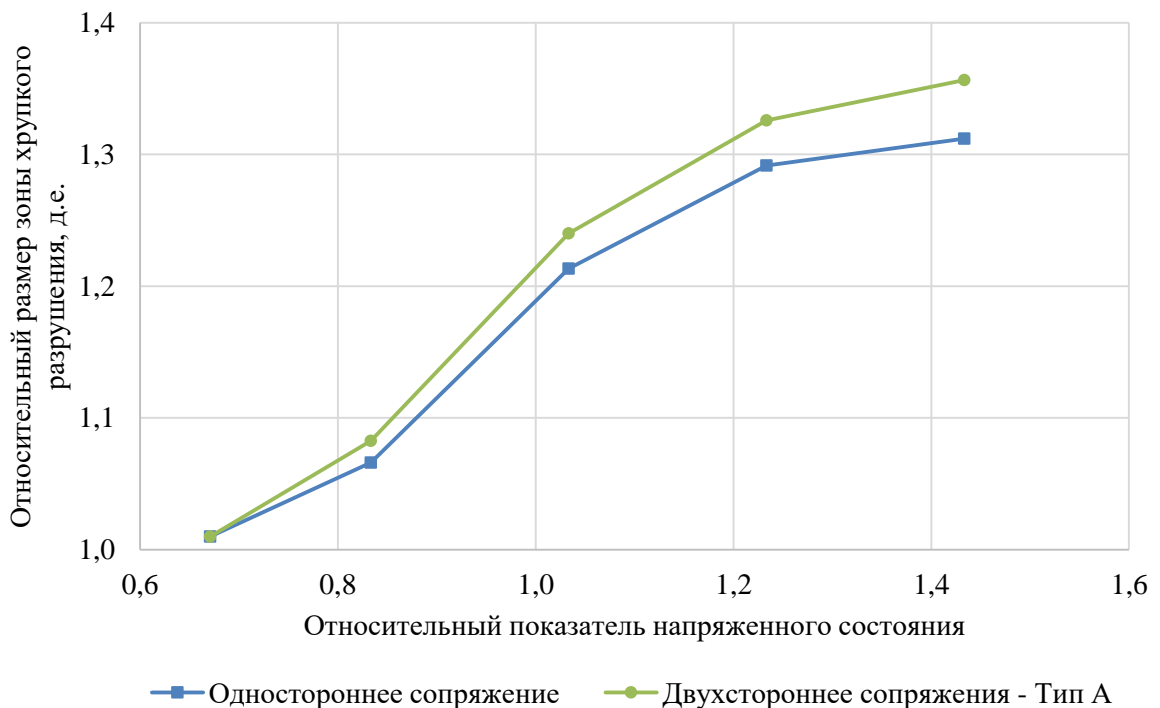


Рисунок 3.20 - Закономерности развития зон хрупкого разрушения пород в зависимости от геомеханических условий проведения горных выработок

Схожий характер формирования зон хрупкого разрушения наблюдается при 4 рассмотренных вариантах сопряжений горных выработок. В среднем за граничное значение, где

отношение роста зон хрупкого разрушения пород остается постоянным можно принять величину $\sigma_{отн}$ равную 1.5. Данный эффект представляется весьма интересным, так как предполагает, что начиная с определенной глубины (напряженного состояния массива) рост размера зоны хрупкого разрушения по отношению к одиночной выработке замедлится и будет определяться фиксированным значением. При малых значениях $\sigma_{отн}$ разница между размерами зоны хрупкого разрушения на участке сопряжения и в окрестности одиночной выработки не существенна, то есть влияние сопряжения отсутствуют.

3.6 Обобщение полученных параметров размеров зон хрупкого разрушения в окрестности горных выработок

На диаграммах (рисунки 3.21, 3.22) выполнено сравнение размеров зон хрупкого разрушения, полученных для одиночных выработок и сопряжений горных выработок для нижнего и верхнего предела. Видно, что размер зоны хрупкого разрушения в окрестности сопряжений выше по отношению к одиночной выработке. Особенно это становится заметно при увеличении показателя напряженного состояния породного массива с 0.4 до 0.6. Наименьшая величина нарушенной зоны наблюдается на сопряжении с купольной кровлей, наибольшая – с плоской кровлей. Схожая тенденция сохраняется при расчете размера зоны хрупкого разрушения как по нижнему, так и по верхнему пределам.

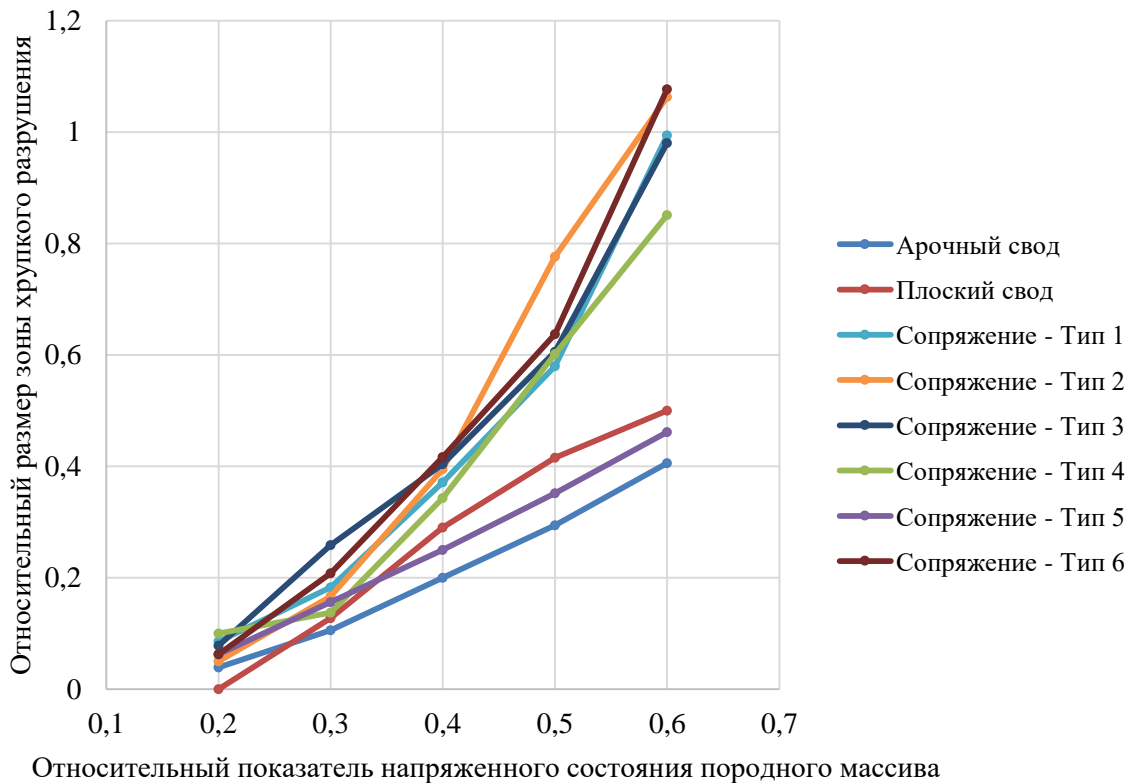
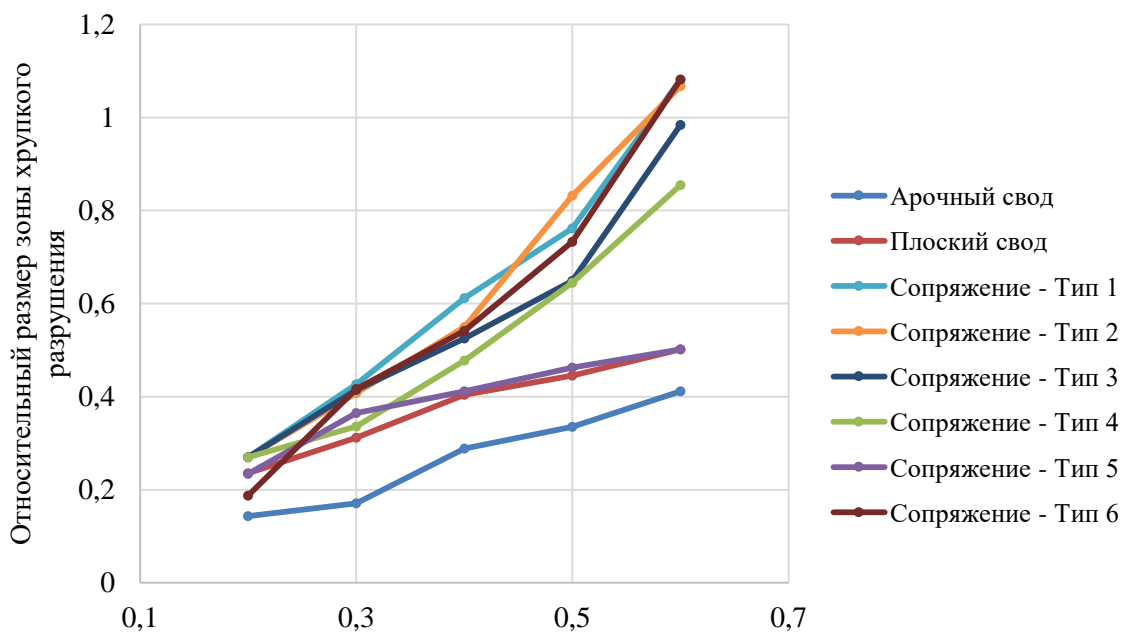


Рисунок 3.21 – Результирующие диаграммы расчета зон хрупкого разрушения в окрестности горных выработок (нижний предел)



Относительный показатель напряженного состояния породного массива

Рисунок 3.22 – Результирующие диаграммы расчета зон хрупкого разрушения в окрестности горных выработок (верхний предел)

Полученные результаты численного моделирования достаточно хорошо как качественно, так и количественно описывают явления, наблюдаемые в реальных условиях. Отмечается хорошее совпадение с распространением зоны хрупкого разрушения от центра сопряжения в краевые зоны (рисунок 3.23). Абсолютные размеры зоны хрупкого разрушения также находятся в допустимых границах, установленных на основании натуральных наблюдений.

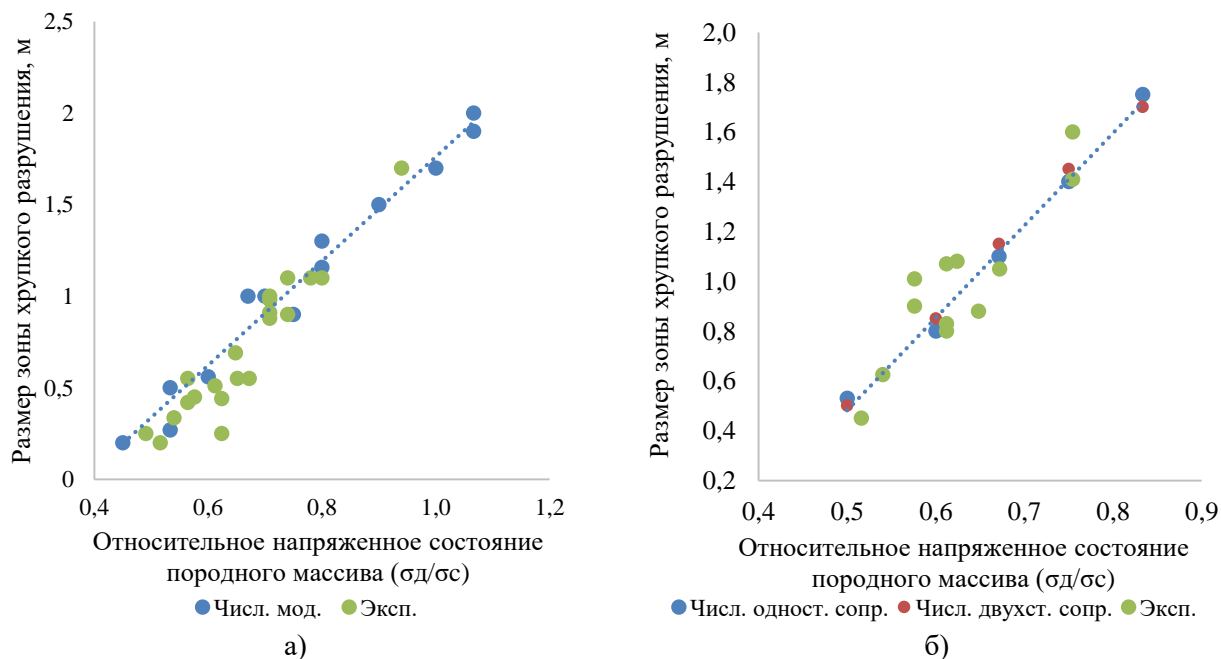


Рисунок 3.23 – Сравнение результатов численного моделирования прогноза зон хрупкого разрушения и натуральных наблюдений в окрестности одиночной выработки (а) и сопряжения (б) для условий КФ АО «Апатит»

Представленные результаты позволяют получить представление о закономерностях формировании зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжений горных выработок. Можно выявить следующие общие тенденции:

- размер нарушенной зоны увеличивается по мере роста показателя относительной напряженности породного массива для всех рассмотренных типов сопряжений;
- рост размера нарушенной зоны в целом соответствует линейной зависимости;
- неопределенность в величине размера нарушенной зоны снижается по мере роста показателя относительной напряженности.

На основании проведенных исследований для определения прогнозного размера зоны хрупкого разрушения пород на участке горных выработок рекомендуется зависимость (3.7):

$$h_{\text{хр}} = 0.64k_{\text{д}}b\sqrt{H}s, \quad (3.7)$$

где $k_{\text{д}}$ – относительный показатель напряженного состояния (3.8);

$$k_{\text{д}} = 0,58 \frac{\sigma_{\text{д}}}{\sigma_{\text{с}}} - 0,24, \quad (3.8)$$

b – ширина одиночной горной выработки (для сопряжений - размер наибольшей из сопрягающихся выработок);

H – высота горной выработки / сопряжения;

s – коэффициент формы сопряжения: может принимать значение от 1.4 до 1.8 для сопряжений с куполообразным сводом, и до 2,5 с плоским сводом.

В целом можно заключить, что модель упругопластической среды с разупрочнением позволила повысить достоверность прогноза деформаций в зоне хрупкого разрушения и ее параметров.

3.7 Выводы по Главе 3

В данной главе подробно изучен механизм потери устойчивости контура горной выработки, расположенной в высоконапряженном, склонном к хрупкому разрушению массиве. Наиболее характерной для таких условий проведения горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» формой потери устойчивости является хрупкое разрушение пород с последующим их обрушением в выработанное пространство.

В рамках проведенных исследований выполнена разработка моделей деформирования и разрушения горных пород, которые позволяют эффективно выполнять прогноз зон хрупкого разрушения. На основании разработанных моделей деформирования и разрушения хрупких пород выполнены параметрические расчеты, которые позволили установить влияние различных факторов на развитие геомеханических процессов в окрестности породных обнажений.

Получены следующие результаты формирования напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности сопряжений горных выработок:

- размер зоны хрупкого разрушения пород в целом имеет тенденцию к увеличению на участках сопряжения горных выработок, при этом тип сопряжения играет существенную роль на ее размер;

- чем выше значение показателя σ_{max} тем отчётливее проявляется влияние сопряжения на размер зоны хрупкого разрушения пород, в то время как при соотношении $\sigma_{max}/\sigma_c < 0.8$ разница в размерах зон на участке сопряжения и протяженном участке горной выработки не существенна;

- граница зоны хрупкого разрушения над сопряжением горных выработок представляет собой поверхность с Λ -образным поперечным сечением, размер этой зоны обусловлен геометрией сопряжения горных выработок и направлением действия главных напряжений, при этом высота зоны в сравнении с одиночными выработками больше в 1.4-1.8 раз при куполообразном своде сопряжения и до 2.5 раз – при плоском своде сопряжения.

- отмечено, что сопряжение горных выработок оказывает не только влияние на размер зоны хрупкого разрушения пород, но и на характер формирования этой зоны. Наблюдается «перетекание» зоны хрупкого разрушения пород от непосредственно участка сопряжения к сопрягаемой выработке, направление которой совпадает с направлением действия максимальных главных напряжений. Таким образом возможно формирование отслоения пород в выработке расположенной в средненапряженном породном массиве;

- предложенная модель прогноза зон хрупкого разрушения пород, основанная на задании функций упрочнения/разупрочнения среды, позволяет эффективно выполнять прогноз зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок.

В целом результаты исследований подтверждают полученные закономерности развития зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок, однако, усовершенствованная модель описания развития геомеханических процессов в рамках рассмотрения среды как упругопластической с учётом разупрочнения, позволяет в значительной степени повысить достоверность прогноза формы зоны хрупкого разрушения, а также повысить точность прогноза размеров зоны при значительном соотношении между напряжениями и прочностью породного массива.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИВЕДЕНИЮ В УСТОЙЧИВОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫРАБОТОК, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ПОРОДАХ, СКЛОННЫХ К ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ

4.1 Общие положения

В первых трех главах диссертационной работы представлены результаты проведенного комплексного исследования, позволяющие осуществлять достоверный прогноз геомеханических процессов в окрестности горных выработок различной конфигурации в породах, склонных к хрупкому разрушению. В настоящей главе выполнено обобщение проведенных исследований, адаптация их для практического применения, а именно, на их основе предложена методика оценки устойчивости горных выработок, расположенных в породах, склонных к хрупкому разрушению, и рекомендации по приведению этих выработок в устойчивое состояние и их поддержанию (креплению).

4.2 Классификация условий проведения горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» по виду и степени проявления геомеханических процессов

Условия отработки Хибинских апатит-нефелиновых месторождений характеризуются как сложные. Перечень опасных факторов, приводящих к потере устойчивости горной выработки или возникновения динамических форм проявления горного давления; для каждого месторождения индивидуален и обусловлен геологическим строением массива в районе ведения работ, сформированным полем напряжений, а также технологическими аспектами: порядком отработки, применяемыми типами крепей и форм выработок и т.д. Общие факторы, влияющие на условия отработки месторождения, представлены на рисунке 4.1.

На предприятии КФ АО «Апатит» принято условия проведения горных выработок классифицировать через назначение категории состояния выработки. Категория состояния определяется на основании оценки устойчивости и наличия на контуре выработки внешних признаков динамического проявления горного давления.

Все участки горного массива с высокими упругими свойствами, способные к хрупкому разрушению под действием нагрузки, где имели место стреляния пород и динамическое заколообразование, относятся к склонным по горным ударам, и им назначается категория «В», «Г» или «Д» (опасно) согласно таблице 1.7.



Рисунок 4.1 – Перечень опасных факторов

В ходе натурных наблюдений и измерений были сделаны выводы об эффективности применяемых на сегодняшний день способов обеспечения безопасности работ в высоконапряженных массивах. Наибольшую эффективность в этом направлении показывают:

- разделка отрезных щелей путем создания зоны неупругих деформаций, образующих защитную зону, в которой блок (часть блока) отработываются в обычном порядке.
- бурение разгрузочных строчек скважин или шпуров (далее – скважин), способствующей переносу концентрации напряжений от контура выработки вглубь массива.
- крепление контура, предотвращающего выброс породы в выработку [50,60].

Ввиду эффективности применяемых методов можно рекомендовать применять эти способы для приведения выработок в неудороопасное состояние, а также проводить исследования по их совершенствованию.

4.3 Разработка методики оценки устойчивости горных выработок, расположенных в породах, склонных к хрупкому разрушению

4.3.1 Общие положения

Анализ условий проведения горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» позволил установить, что они варьируются в достаточно широком пределе, а геомеханические и геодинамические проявления весьма различны. Так, выделяются следующие зоны:

- зоны с повышенной трещиноватостью (сильнотрещиноватые, разрушенные, перемятые) где ожидаются вывалы породной массы по трещинам;

- зоны средне трещиноватые, где процесс обрушения пород определяется раскрытием/сдвигом существующих трещин или выпадением отдельных заколов породы. Раскрытие существующих трещин в основном связано с изменением напряженно-деформированного состояния породного массива в результате ведения проходческих работ или ведения очистных работ, которые сопровождаются массовыми взрывами;

- зоны слаботрещиноватые, где процессу обрушения пород предшествует хрупкое их разрушение в приконтурной области.

Геомеханический анализ с целью установления устойчивости выработки и прогноза развития проявлений геомеханических процессов рекомендуется осуществлять в последовательности, представленной на рисунке 4.2.

Геомеханическая модель поведения геоматериала назначается на последнем шаге на основании геомеханических показателей согласно данным таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Рекомендации по выбору модели прогноза геомеханических процессов в окрестности горной выработки

Соотношение прочности на сжатие $R_{сж}$ к прочности на растяжение R_p	Значение показателя GSI/Q_N			
	менее 55/..	55-65	65-80	более 80
менее 9	МТЭС	МТЭС	МТЭС	МТЭС
9-15	МТЭС	МТЭС	МТЭС	МТЭС/ МХРП
15-20	МТЭС	МТЭС /МХРП	МХРП/ МТЭС	МХРП
Более 20	МТЭС	МТЭС/МХРП	МХРП	МХРП

Примечание: МХРП - модель хрупкого разрушения породы; МТЭС – модель трещиноватой эквивалентной среды.



Рисунок 4.2 – Рекомендуемая последовательность геомеханического анализа

Результаты проведенных исследований позволили разработать методику оценки устойчивости горных выработок в массивах, склонных к хрупкому разрушению, которая представляет собой последовательное выполнение действий, направленных на установление качественных и количественных характеристик потери устойчивости горной выработки. Работы производятся в следующем порядке:

1. Производится оценка структурной нарушенности пород вокруг горной выработки, причем в отличие от классического описания нарушенности единственным показателем –

количеством трещин на погонный метр контура выработки, необходимо производить полный спектр изучения массива.

2. Определяется напряженное состояние массива горных пород вокруг горных выработок (таблица 4.2).

3. Рассматриваемые условия классифицируются по виду и степени проявления геомеханических процессов и им назначаются категория и подкатегория состояния. Для этого разработана новая классификация условий проведения горных выработок, основанная на логической взаимосвязи устойчивого состояния массива вокруг выработок от его напряженного состояния и структурной нарушенности.

4. Исходя из категории и подкатегории состояния горных выработок определяется характеристика проявлений геомеханических процессов.

5. Для горных выработок, в которых согласно характеристике проявлений геомеханических процессов установлено, что массив, включающий выработку, является склонным к хрупкому разрушению, определяются качественные показатели устойчивости, а именно – размер зоны хрупкого разрушения.

Таблица 4.2 – Методика оценки проявления геомеханических процессов в окрестности горных выработок рудников КФ АО Апатит

Категория состояния горной выработки	На основании эмпирической формулы	На основании численного моделирования
Категория А Обрушение/ разрушение пород нехарактерно	-	-
Категория Б Сплошное сводовобразование.	По принятым на рудниках методиках или по индексу Бартонa Q	-
Категория В Обрушение пород по трещинам	Размер зоны возможного обрушения и его форма определяется с учетом фактической трещиноватости (количество систем трещин, их направление, условия по контакту между трещинами)	На основании математического моделирования уточняется размер зоны нарушенных пород. В качестве условия прочности принимается критерий Хока-Брауна в следующем виде $\sigma_1 = \sigma_3 + R_{сж} \left(m_b \frac{\sigma_3}{R_{сж}} + s \right)^a$ где $R_{сж}$ – прочность породы в условиях одноосного сжатия; σ_1 – прочность породы при величине бокового обжатия равного σ_3 ; m_b , s и a - параметры условия прочности Хока-Брауна.

Продолжение таблицы 4.2

Категория состояния горной выработки	На основании эмпирической формулы	На основании численного моделирования
Категория Г Хрупкое разрушение пород	Размер зоны хрупкого разрушения l_f определяется на основании эмпирической зависимости, параметры которой уточняются на основании натуральных наблюдений $l_f = R_f - a;$	На основании математического моделирования определяется размер зоны хрупкого разрушения пород. 1. В качестве условия прочности принимается критерий Хока- в следующем виде $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{sR_{сж}^2},$ где $R_{сж}$ – прочность породы в условиях одноосного сжатия; σ_1 – прочность породы при величине бокового обжатия равного σ_3 ; s – параметр условия прочности Хока-Брауна.
Категория Д Хрупкое разрушение пород	$\frac{R_f}{a} = 0.49(\pm 0.1) + 1.25 \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{с,i}};$ $\sigma_{max} = 3\sigma_1 - \sigma_3,$ где R_f – эквивалентный радиус зоны хрупкого разрушения пород; a – эквивалентный радиус горной выработки;	2. В качестве условия прочности принимается критерий Кулона-Мора, а упругопластическая модель формулируется с учётом пластического упрочнения/разупрочнения среды (см. раздел 3.2.1)

Проводимые в указанном порядке действия позволяют однозначно определять характер возможной потери устойчивости и величину ее проявлений.

4.3.2 Проведение оценки структурной нарушенности массива горных пород вокруг выработок

Оценка структурной нарушенности производится в два взаимосвязанных этапа: структурное картирование (натурные измерения) и камеральная обработка результатов.

Структурное картирование горных выработок выполняется в следующем порядке:

1. Выбирается участок картирования.
2. Определяется литологический код горной породы.
3. Производится полевое определение или неразрушающим методом прочности породы.
4. Определяется обводненность пород обнажения.
5. Производится фотофиксация обнажения.
6. Выявляются и классифицируются нарушения на выбранном участке структурного картирования.

7. Выполняется количественная и качественная оценка трещиноватости пород горного массива, которая включает:

- 7.1. Измерение элементов залегания трещины/слоистости.
- 7.2. Измерение расстояние между трещинами/слоями.
- 7.3. Измерение длины трещины.
- 7.4. Оценку микрошероховатости стенок трещины.
- 7.5. Определение литологии и мощности заполнителя трещин.
- 7.6. Измерение раскрытия трещины/мощности слоя слоистости.
- 7.7. Определение степени выветривания стенок трещины.

8. Выполняется количественная и качественная оценка слоистости пород горного массива, которая включает:

- 8.1. Измерение элементов залегания трещины/слоистости.
- 8.2. Измерение расстояние между трещинами/слоями.
- 8.3. Измерение раскрытия трещины/мощности слоя слоистости.

9. Выполняется определение размеров значительных нарушений, пересекающих горную выработку.

Последовательность обработки исходных данных выполняется в следующем порядке:

1. Выделить основные системы трещин.
2. Определить средние элементы залегания для каждой системы трещин.
3. Определить в каждой системе трещин среднее расстояние между трещинами.
4. Определить показатель качества породы (RQD).
5. Определить J_n для всего обнажения.
6. Определить J_g для всего обнажения.
7. Определить J_a для всего обнажения.
8. Определить J_w для всего обнажения.
9. Определить SRF для всего обнажения.
10. Определить QA для всего обнажения.

На сегодняшний день данная методика оценки структурной нарушенности успешно используется на рудниках КФ АО «Апатит», более подробное ее описание приводится в «Инструкции по оценке структурной нарушенности...».

4.3.3 Определение напряженного состояния массива пород вокруг выработок

Напряженно-деформированное состояние (НДС) пород зависит от коэффициента отношения сжимающих напряжений на контуре выработок (σ_d) и от значения предела прочности на сжатие (σ_c). НДС пород обуславливает разрушение приконтурного массива. Апатит-

нефелиновые месторождения испытывают на себе сложную систему напряжений, определяемую силами гравитации и тектоникой. Это приводит к тому, что в зоне ведения горных работ возникает концентрация сжимающих напряжений, которая может значительно превышать уровень фоновых напряжений в нетронутом массиве, иногда превышающих его многократно.

Проявления напряженного состояния в зависимости от соотношения σ_d/σ_c представлены в таблице 1.8.

Выработки, в зависимости от условия эксплуатации, распределяют на две группы:

- 1 - вне зоны влияния очистных работ;
- 2 - в зоне влияния очистных работ.

В пространстве, затрагиваемом проходкой и добычей полезного ископаемого, наряду с региональными концентрациями на поверхности горных выработок могут возникать области опорного давления, вызванные очистными работами и консолю вышележащих слоев. В этих областях напряжения могут увеличиваться в 3-5 раз по сравнению с показателями в нетронутом массиве, что, в свою очередь, способствует повышению вероятности возникновения динамических проявлений горного давления. Кроме этого, на горные выработки испытывают негативное влияние от нагрузок, возникающих от сейсмических взрывов.

4.3.4 Новая классификация условий проведения горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» по виду и степени проявления геомеханических процессов

Проведенные исследования показали, что в рассматриваемых условиях потеря устойчивости может происходить в нескольких формах, интенсивность процесса потери устойчивости зависит от количественных показателей напряженности массива и его структурной нарушенности.

Наибольшую сходимость расчетных положений и натуральных исследований в вопросе прогноза устойчивого состояния горных выработок дает классификация пород по устойчивости, основанная на классификации, разработанной Бартоном. Данная классификация дополнена с учетом проведенных в Главе 2 натуральных исследований и адаптирована для подземных рудников КФ АО «Апатит». Окончательный вид классификации горных выработок представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Актуализированные категории состояния горных выработок

Категория состояния горной выработки	Подкатегория	Значение индекса Q_A	Соотношение между $\sigma_1/R_{сж}$
Категория А	А	более 40.0	$\sigma_d \leq 0.3\sigma_c$
Категория Б	Б1	0.90-40.0	$\sigma_d \leq 0.3\sigma_c$
	Б2	0.20-0.90	
	Б3	0.07-0.20	
	Б4	0.02-0.07	
Категория В	В1	4.0-10.0	$0.3\sigma_c < \sigma_d \leq 0.5\sigma_c$
	В2	10.0-30.0	
	В3	30.0-80.0	
Категория Г	Г1	2.0-5.0	$0.5\sigma_c < \sigma_d \leq 0.7\sigma_c$
	Г2	5.0-15.0	
	Г3	15.0-40.0	
Категория Д и «опасно»	Д1	15.0-40.0	$\sigma_d > 0.7\sigma_c$
	Д2 и «опасно»	-	$\sigma_d > 1\sigma_c$

Таким образом, основой для назначения категория (подкатегории), наряду с напряженностью являются значения модифицированного индекса Бартона Q_A , для определения которого необходимо произвести цикл инженерно-геологических исследований и измерений, а также произвести обработку натуральных результатов.

4.3.5 Характеристика проявлений геомеханических процессов в зависимости от категории и подкатегории состояния горных выработок

Одним из основных результатов проведенных исследований является подробное описание геомеханических и геодинамических процессов в массиве в зависимости от его структурной нарушенности и напряженного состояния. Результаты исследований приведены в таблице 4.4, такой вид позволяет полностью оценить характеристики проявления геомеханических и геодинамических процессов в массиве вокруг выработок на рудниках КФ АО «Апатит».

Таблица 4.4 - Характеристика проявлений процессов в массиве горных выработок

Категория состояния горной выработки	Подкатегория	Описание ожидаемых геомеханических/геодинамических процессов
А	Категория А	Развитие негативных геомеханических/геодинамических процессов не ожидается. Возможно формирование заколов/зависания породы при некачественном проведении бурозврывных работ
Б	Категория Б1	Локальной вывал пород по трещинам в виде клиньев/блоков

Продолжение таблицы 4.4

Категория состояния горной выработки	Подкатегория	Описание ожидаемых геомеханических/геодинамических процессов
Б	Категория Б2	Локальный вывал пород по трещинам или формирование сплошного вывала пород на всю ширину выработки
	Категория Б3	Сплошное вывалообразование пород
	Категория Б4	Прогрессивное развитие сплошного вывалообразования пород во времени
В	Категория В1	Развитие негативных геомеханических/геодинамических процессов не ожидается. Возможны локальные вывалы пород по трещинам в виде клиньев/блоков. Трещины находятся в закрытом состоянии.
	Категория В2	Формирование незначительной зоны хрупкого разрушения пород. Возможно незначительное деформирование породного контура горной выработки.
	Категория В3	Формирование локальной зоны хрупкого разрушения пород. Процесс формирования зоны растянут во времени. Геодинамические процессы протекают не активно.
Г	Категория Г1	Хрупкое разрушение пород сопровождается смещениями по существующим поверхностям ослабления. Разрушение пород реализуется в квазистатическом режиме. Наблюдается незначительное выдавливание пород по трещинам в локальных зонах приуроченных к зонам хрупкого разрушения.
	Категория Г2	Наблюдается шелушение или стреляние породы средней интенсивности, которое может сопровождаться раскалывание и последующим отслоением породы от породного массива. Разрушение породы может происходить как в квазистатическом режиме (смещение породного контура).
	Категория Г3	Наблюдается шелушение или стреляние породы средней интенсивности, которое может сопровождаться раскалывание и последующим отслоением породы от породного массива. Разрушение породы может происходить как в квазистатическом режиме (смещение породного контура), так и в динамическом режиме (в виде выброса породной массы из зоны хрупкого разрушения).
Д	Категория Д1	Наблюдается интенсивное стреляние и динамическое заколообразование непосредственно через несколько минут после обнажения. Может сопровождаться низкоэнергетическим горным ударом. Хрупкое разрушение пород сопровождается интенсивным увеличением их объема пород.
	Категория Д2	Наблюдается высокоэнергетический горный удар и мгновенное динамическое деформирование породного массива сразу после обнажения. Размер зоны хрупкого разрушения максимальный.

4.3.6 Новые подходы к определению размеров зон хрупкого разрушения пород вокруг выработок

Для горных работ на КФ АО «Апатит» на основании проведенных исследований была установлена взаимосвязь между величиной зоны хрупкого разрушения и геомеханическим состоянием породного массива, описываемая зависимостями (3.7) и (3.8).

Полученная зависимость и подход имеют ряд принципиальных отличий от используемых на данный момент:

1. Разработанная формула учитывает формы потери устойчивости конкретных участков горных выработок в зависимости от напряженности массива и применяется отдельно для массивов склонных к хрупкому разрушению, в отличие от предыдущего подхода, где для всех форм потери устойчивости использовалась одна зависимость, корректируемая малообоснованными коэффициентами.

2. В новом подходе учитывается уровень напряжений на конкретном участке, так для каждой категории состояния выявлены коэффициенты, непосредственно влияющие на размер нарушенной зоны.

3. В ходе исследований доказано, что очистные работы не влияют на размер нарушенной зоны, а в большей мере могут только менять характеристики этой зоны, а также снижать несущую способность крепей. Это связано с тем, что на момент влияния очистных работ выработка уже закреплена, а, значит, уже создан необходимый для устойчивого состояния отпор. В связи с этим, в предложенном подходе влияние очистных работ учтено только при определении параметров крепей, путем повышения несущей способности крепи введением коэффициентов запаса.

4. В ходе исследований доказано значительное влияние сопряжений на размер нарушенных зон вокруг выработок, причем вне зависимости от напряженного состояния размер нарушенной зоны увеличивается практически одинаково, это увеличение в формулах учитывается специальным коэффициентом формы выработки, чего в предыдущих подходах учтено не было.

Все вышеперечисленные преимущества подтвердили свою эффективность в шахтных условиях, настоящая формула применяется в рамках опытно-промышленных исследований и внедряется в производство.

Полученные в ходе исследований новые закономерности позволяют более детально описывать массив и учитывать формы потери устойчивости, что позволяет проводить более точный расчет параметров крепей и определять способы приведения выработки в устойчивое состояние, а значит, позволит обеспечить безопасность ведения работ и уменьшит затраты на крепление выработок.

4.4 Разработка методики расчета нагрузок на крепь горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит»

4.4.1 Общие положения

Выбор способа крепления выработок производится в следующем порядке:

1. Исходя из категории состояния горной выработки, выбираются возможные способы ее поддержания и специальные мероприятия.
2. Исходя из рекомендаций по применению различных видов крепи, конкретизируется вид используемой крепи.
3. Обосновывается применение специальных мероприятий.

4.4.2 Уточнение подходов к определению параметров крепей горных выработок

На сегодняшний день расчет крепей выработок в условиях рудников КФ АО «Апатит» выполняется из условия формирования участков вывала пород из нарушенной зоны в окрестности горных выработок, вызванной непосредственно проведением горных выработок или ведением очистных работ. Динамическое проявление горного давления в явном виде при расчете крепей горных выработок не рассматривается, а учитывается в виде рекомендаций по усилению конструкций крепей на участках, где ожидаются такие формы проявления горного давления.

В целом проведенные исследования подтвердили обоснованность расчетных методик, применяемых на сегодняшний день в «Инструкции по креплению...». В этой связи можно подтвердить эффективность используемых подходов и методов к определению параметров крепей, используемых на сегодняшний день, которые требуют только некоторых уточнений, позволяющих более рационально обеспечивать устойчивое состояние выработок, а именно:

- необходимо в расчетных формулах параметров крепей учитывать возможное снижение их несущей способности при значительном влиянии очистных работ, а именно предусмотреть требуемые коэффициенты запаса;

- необходимо рассчитывать параметры крепей с учетом срока службы выработок, а именно учитывать временной фактор оказывающий негативное воздействие на прочностные характеристики массива в окрестности выработок, а именно некоторую потерю его несущей способности, которая зависит от срока службы выработки и может достигать 40%, при сроке службы выработки более 25 лет;

- необходимо пересмотреть эмпирические коэффициенты в формулах расчетов набрызгбетонной и дисперсно-армированной набрызгбетонной крепей, на сегодняшний день их можно несколько снизить, так как проведенные исследования позволили понизить некоторые коэффициенты запаса, принятые при изначальной разработке этих формул.

4.4.3 Выбор способов поддержания горной выработки и специальные мероприятия

Как уже описывалось выше, можно выделить следующие подкатегории горных выработок, в которых возможно хрупкое разрушение приконтурного массива: «В3», «Г1», «Г2», «Г3», «Д1», «Д2».

Для постоянного крепления выработок используют следующие конструкции крепей:

- анкерная крепь (АК): железобетонная (ЖБА), сталеполимерная (СПА), тросовая (ТРА), композитнополимерная (КПА), композитнобетонная (КБА), клино-распорная (КРА), трубчатая гидрораспорная (ТГРА), забивная фрикционная (ЗФА);

- набрызгбетонная крепь (НБ) и армированная металлической сеткой (МС+НБ) или дисперсно-армированная набрызгбетонная крепь (ДАНБ);

- монолитная бетонная (МБ) и монолитная железобетонная (ЖБ) крепи;

- рамная металлическая крепь (РМК);

- комбинированные крепи, представляющие собой совместное использование вышеуказанных видов крепи (например, ЖБА+НБ, СПА+ДАНБ, РМК+НБ).

При проходке капитальных выработок, транспортных выработок в сложных геодинамических условиях (категория состояния «Г», «Д») с применением профилактических мероприятий, в виде образования разгрузочных щелей (ОРЩ), при пересечении окисленных (не измененных до глинистого состояния), сильнотрещиноватых зон и в выработках со сроком службы более 10 лет, а именно: автоуклонов, конвейерных выработок, откаточных выработок, все сопряжения капитальных горных выработок в обязательном порядке выполнять крепление комбинированным способом.

В ходе проводимых исследований были рекомендованы следующие способы поддержания горных выработок (таблица 4.5).

Таблица 4.5 - Способы поддержания горных выработок и условия их применения

Категория состояния горной выработки	Подкатегория		Одиночная выработка (ширина выработки до 8 м)	Выработки большого поперечного сечения (≥ 8 м)	Сопряжения горных выработок
В	В3		1.НБ (АНБ), 2.АК+НБ(АНБ)	АНБ, АК+НБ(АНБ)	
Г	Г1	+ОВ	1.НБ ≥ 10 см, 2.АНБ ≥ 8 см, 3.АК+НБ ≥ 5 см, 4.АК+АНБ ≥ 5 см,	1.АНБ ≥ 8 см, 2.АК+НБ ≥ 5 см, 3.АК+НБ ≥ 5 см, 4.АК+АНБ ≥ 5 см,	

Продолжение таблицы 4.5

Категория состояния горной выработки	Подкатегория		Одиночная выработка (ширина выработки до 8 м)	Выработки большого поперечного сечения (≥ 8 м)	Сопряжение горных выработок
Г	Г1	+ОРЩ	1.НБ ≥ 5 см, 2.АНБ ≥ 5 см, 3.АК+НБ ≥ 5 см, 4.АК+АНБ ≥ 5 см,	1.АНБ ≥ 5 см, 2.АК+НБ ≥ 5 см, 3.АК+НБ ≥ 5 см, 4.АК+АНБ ≥ 5 см,	
	Г2		1.НБ ≥ 5 см 2.АНБ ≥ 5 см, 3.АК+НБ ≥ 5 см, 4.АК+АНБ ≥ 5 см,	1.АНБ ≥ 5 см, 2.АК+НБ ≥ 5 см, 3.АК+НБ ≥ 5 см, 4.АК+АНБ ≥ 5 см,	
	Г3	+ОВ	1.НБ ≥ 10 см 2.АНБ ≥ 8 см, 3.АК+НБ ≥ 5 см, 4.АК+АНБ ≥ 5 см, 5. ДК	1.АНБ ≥ 8 см, 2.АК+НБ ≥ 5 см, 3.АК+НБ ≥ 5 см, 4.АК+АНБ ≥ 5 см, 5. ДК	
		+ОРЩ	1.НБ ≥ 5 см, 2.АНБ ≥ 5 см, 3.АК+НБ ≥ 5 см, 4.АК+АНБ ≥ 5 см, 5. ДК	1.АНБ ≥ 5 см, 2.АК+НБ ≥ 5 см, 3.АК+НБ ≥ 5 см, 4.АК+АНБ ≥ 5 см; 5. ДК	
Д	Д1	+ОВ	1.АК+АрмК+АНБ ≥ 12 см, 2. АК+АНБ ≥ 12 см, 3.АК+УНБ, 4. ДК		
	Д1	+ОРЩ	1.НБ ≥ 10 см; 2.АНБ ≥ 8 см, 2.АК+АНБ ≥ 8 см 3. ДК	1.АНБ ≥ 8 см, 2.АК+АНБ ≥ 8 см, 3. ДК	
	Д2		1.АК+АрмК+АНБ ≥ 12 см, 2. АК+АНБ ≥ 12 см, 3.АК+УНБ, 4. ДК		

4.4.4 Применение специальных мероприятий

Специальные мероприятия призваны улучшать условия проведения выработок и снижать возможность возникновения негативных геомеханических процессов. Основные мероприятия, рекомендованные к применению в высоконапряженных хрупких массивах, сводятся к приведенным в данном разделе.

ОРЩ применяются при категориях состояния выработок «Г» и «Д», а также в категории «В» при региональном прогнозе перехода выработки при изменении горнотехнических условий в опасное состояние. Общие указания по приведению выработок в неудароопасное состояние способом ОРЩ представлены в «Указаниях...».

После проведения ОРЩ в выработках категории состояния «Г» и «Д» выбор способа крепления осуществляется в соответствии с таблицами 7.1а и 7.1б, как для категории «Г» при КВ+ОРЩ и «Д» при КВ+ОРЩ соответственно.

В качестве опережающей крепи могут быть использованы: инъекционное закрепление массива (растворами на цементной или полимерной основах); зонтичное крепление (трубное, штанговое и др.), а также другие конструкции опережающих крепей и виды предукрепления массива после проведения опытно-промышленных испытаний и получения показателей, характеризующих эффективность работы этих крепей в условиях подземных рудников КФ АО «Апатит». Все эти положения более подробно описаны в тексте методики в Приложении Д.

4.5 Выводы по Главе 4

Обеспечение безопасности работ при проведении горных выработок в породах, склонных к хрупкому разрушению, должно вестись с учетом осложняющих факторов, напрямую влияющих на состояние устойчивости массива вокруг горных выработок. Разработанные в настоящей главе положения и рекомендации позволяют осуществлять прогноз устойчивости горных выработок в описанных условиях и позволяют принимать меры по обеспечению безопасности всех процессов, связанных с проведением, креплением и эксплуатацией таких горных выработок.

На основании выполненных исследований предложена методика прогноза размеров зоны хрупкого разрушения в окрестности сопряжений горных выработок, в основу которой положены результаты изучения хрупкого разрушения пород и особенности развития геомеханических процессов в натуральных условиях. В рамках выполненных исследований изучены особенности формирования зон хрупкого разрушения пород на участках сопряжений горных выработок в зависимости от геомеханических условий. Разработанная методика оценки устойчивости горных выработок, расположенных в породах, склонных к хрупкому разрушению, позволяет достоверно прогнозировать геомеханические процессы, которые будут происходить в массиве горных пород по мере ведения горных работ.

Разработанные рекомендации по проведению выработок, расположенных в массивах, склонных к хрупкому разрушению в устойчивое состояние, позволяют эффективно определять меры и способы, способствующие надежной и безаварийной эксплуатации этих выработок.

На сегодняшний день положения разработанных методики и рекомендаций находят свое отражение в таких документах, как «Инструкция по креплению и управлению кровлей...» и «Регламент технологических процессов при креплении...». По мере накопления опыта использования разработанных положений подтверждается их эффективность, причем не только с точки зрения безопасности ведения работ, но и экономической целесообразности.

Это связано с тем, что достоверный прогноз процессов в массиве вокруг выработок при хрупком разрушении, позволяет более точно определять способы приведения выработок в устойчивое состояние, а значит рационально расходовать материальные и трудовые ресурсы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной диссертационной работе изложено решение одной из актуальных задач в области геомеханики, а именно – закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния массива высоконапряжённых пород для апатит-нефелинового месторождения руд и улучшение точности прогноза устойчивости горных выработок.

Для решения поставленной задачи выполнен анализ возможных форм потери устойчивости контура горных выработок в условиях высоконапряженных породных массивов, характерных для условий рудников КФ АО «Апатит» (глава 1). Анализ позволяет заключить, что создание единой методики возможно, но затруднительно с математической точки зрения и требует избыточное количество геомеханических показателей. Методика должна быть уточнена и упрощена на основании натурных изысканий и математического моделирования для конкретных горно-геологических условий.

Проведен комплекс натурных исследований, направленный на оценку взаимосвязи размеров зон хрупкого разрушения в окрестности горных выработок с факторами, влияющими на их устойчивость, а также исследован характер развития геомеханических и геодинамических процессов в окрестности горных выработок в условиях высоконапряженных породных массивов (глава 2). Обосновано, что процесс хрупкого разрушения для рассматриваемых условий возможно описать с использованием нелинейного критерия прочности Хока-Брауна.

Для обоснованной математической модели деформирования и хрупкого разрушения пород выполнен подбор параметров (глава 3). Установлены характер и параметры зон хрупкого разрушения в зависимости от относительного показателя напряженного состояния породного массива и других факторов, а также даны рекомендации по использованию полученных результатов.

В результате выполнения исследований представлены практические рекомендации по оценке и обеспечению устойчивости горных выработок в рассматриваемых условиях (глава 4). Приведена дополненная методика оценки устойчивости горных выработок и их сопряжений в породах, склонных к хрупкому разрушению для условий АО КФ «Апатит».

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие основные выводы и рекомендации:

- получен характер проявления геомеханических процессов в высоконапряженных породных массивах месторождений КФ АО «Апатит», и установлено различие в размерах зон хрупкого разрушения в одиночных выработках и на их сопряжениях;

- получены зависимости параметров зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжений различной геометрической конфигурации от их размеров и геомеханического состояния породного массива;

- повышение достоверности расчета зон хрупкого разрушения пород для условий месторождения КФ АО «Апатит» удовлетворительно может быть установлено на основании применения модели упрочняющейся / разупрочняющейся среды, которая может быть выражена через условие пластичности Кулона-Мора с переменными параметрами пластичности;

- размеры зоны хрупкого разрушения на сопряжении находится в прямой зависимости от пролета, при этом превышают размер зоны в одиночной выработке в 1.4-2.5 раза.

На основании проведенных исследований для определения прогнозного размера зоны хрупкого разрушения пород на участке горных выработок установлена зависимость, учитывающая напряженное состояние массива, размеры и форму горной выработки или сопряжения. Зависимость показала хорошую сходимость с данными натурных наблюдений.

Перспективным в данной области направлением является внедрение математической модели, предназначенной для прогнозирования устойчивости сопряжений выработок во время проведения очистных работ, а также исследование изменения напряженно-деформированного состояния других конструктивных элементов систем разработки с применением данной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрашитов, А.Ю. Опыт взаимодействия с горным предприятием при решении проблем геодинамической безопасности / А.Ю. Абрашитов, А.Н. Шабаров, **П.А. Корчак**, А.Д. Куранов // Горный журнал. – 2023. - №5. – с. 40-48. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.06.
2. Абрашитов, А.Ю. Основные направления развития способов обеспечения устойчивости горных выработок на подземных рудниках АО «Апатит» / А.Ю. Абрашитов, П.А. Корчак, В.Ю. Синегубов // VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ», СПГУ, Санкт-Петербург, 2017 г. с 423-428
3. Акустический измерительно-вычислительный комплекс для геомеханического мониторинга массива пород при ведении горных работ [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геоакустика : сб. тр. XVI сессии Российского акустического общества. – М. : ГЕОС, 2005. – Т. 1. – С. 351-354.
4. Алгоритм выделения потенциально удароопасных зон в разрабатываемом массиве горных пород по результатам сейсмоакустического мониторинга [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 12, вып. 5 : Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока. – С. 31-39.
5. Анализ сейсмоактивности породного массива рудников норильского месторождения в период 1994–2005 гг. [Текст] / В. Н. Опарин [и др.] // Геодинамика и напряжённое состояние недр Земли : труды конференции, г. Новосибирск, 10–13 окт. 2005 г. – Новосибирск, 2005. – С. 7-15.
6. Аникин, П. А. Комплексный показатель удароопасности по данным геоакустического мониторинга массива горных пород [Текст] / П. А. Аникин // Проблемы геологии и освоения недр : труды XVII Междунар. симпозиума им. акад. М. А. Усова студентов и молодых ученых. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. – Т 2. – С. 293-295.
7. Аникин, П. А. Совершенствование методики оценки геомеханического состояния геосреды по данным геоакустического мониторинга [Текст] / П. А. Аникин, И. Ю. Рассказов, Г. Ш. Цициашвили // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы Девятой Международной сейсмологической школы (Агверан (Республика Армения), 08-12 сент. 2014 г.). - Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 211- 212.
8. Анциферов, М.С. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений [Текст] / М. С. Анциферов, Н. Г. Анциферова, Я. Я. Каган. – М. : Наука, 1971. – 136 с.

9. Багаутдинов, И.И. Прогноз устойчивости подготовительных выработок при разработке апатито-нефелиновых месторождений с учетом блочности массива (на примере Расвумчоррского рудника) / автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб. – 2016.
10. Баранов, С.В. Продуктивность техногенной сейсмичности / С.В. Баранов, С.А. Жукова, **П.А. Корчак**, П.Н. Шебалин // Физика Земли. – 2020 – Т. 56(3), С. 326–336.
11. Батугина, И. М. Геодинамическое районирование месторождений при проектировании и эксплуатации рудников [Текст] / И. М. Батугина, И. М. Петухов. – М. : Недра, 1988. – 166 с.
12. Болобов, В.И. К влиянию крепости породы на ее абразивные свойства / В.И. Болобов, В.С. Бочков, С.А. Чупин, С.Ю. Степанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016.
13. Болотин, Ю. И. Системы локации источников акустической эмиссии в массиве горных пород на рудниках Таштагольского и Талнахского месторождений [Текст] / Ю. И. Болотин, А. Ю. Искра, В. В. Нечаев // III Всесоюзная научно-практическая конференция по акустической эмиссии : доклады. – Обнинск, 1992. – Ч. I. – С. 157-159.
14. Булычев, Н.С. Устойчивость пород, окружающих горные выработки, и выбор типа крепи // Записки Горного института. 1975. Т. № 1 67. С. 166.
15. Вильнер, М.А. Численное моделирование напряженно- деформированного состояния трещиноватых породных массивов на участках сопряжений горных выработок // Сборник материалов по результатам исследовательских стажировок в рамках программ «Михаил Ломоносов» и «Иммануил Кант», 2020-2021 г. - С. 58-63
16. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 3. – С. 3-14.
17. Горные удары [Текст] / С. Г. Авершин. – М. : Углетехиздат, 1955. – 210 с.
18. Джегер, Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения / Ч. Джегер. – М.: Мир, 1975
19. Дорошенко, В. И. К проблеме горных ударов на Южном месторождении [Текст] / В. И. Дорошенко, А. В. Антипов, Ю. Ю. Пиленков // Горный журнал. – 1994. – № 3. – С. 56- 61.
20. Еременко, А. А. Разработка железорудных месторождений в зонах повышенной сейсмической активности [Текст] / А. А. Еременко, М. В. Курленя // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1990. – № 2. – С. 3-11.

21. Еременко, В. А. Природные и техногенные факторы возникновения горных ударов при разработке железорудных месторождений [Текст] / В. А. Еременко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 10. – С. 50-59.
22. Жиров, Д.В. Новая интерпретация тектоники фойдолитового комплекса Хибин и ресурсный потенциал фосфатов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 17. 2020. – С. 184- 189. DOI: 10.31241/FNS.2020.17.034.
23. Закономерности проявлений техногенной сейсмичности в иерархично-блочных массивах горных пород [Текст] / А. А. Козырев [и др.] // Геодинамика и современные технологии отработки удароопасных месторождений : сб. науч. тр. науч.-практ. конф. – Норильск : ГМК «Норильский никель», 2012. – С. 45-51.
24. Искра, А. Ю. Микросейсмическая аппаратура для регистрации и локации АЭисточников в массивах горных пород [Текст] / А. Ю. Искра // Системы контроля горного давления. – М.: ИПКОН АН СССР, 1989. – С. 54-66.
25. Исследование устойчивости контуров подготовительных выработок в зависимости от горно-геологических факторов методом конечных элементов [Текст] / Портнов В.С. [и др.] // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные 150 технологии освоения недр : VII междунар. конф. (г. Москва-Ереван, 15-19 сентября 2008 г.). – М. : Изд-во РУДН, 2008. – С. 80-82.
26. Карасев, М. А. Эффективное применение численных методов анализа для решения задач геомеханики. Записки Горного института, 185, 161. - 2010.
27. Козырев, А. А. Проблемы безопасности при ведении горных работ в высоконапряженных породных массивах / Козырев А. А., Панин В. И., Федотов Ю. В. // Записки горного института. -2012. - т. 198. - С. 150-156
28. Козырев, А.А. Концепция единой системы комплексного геомеханического мониторинга при ведении горных работ в скальных массивах горных пород / А.А. Козырев, Э.В. Каспарьян, Ю.В. Федотова // ГИАБ. – 2016. – №4. – С. 83–91.
29. Козырев, А. А. Комплексный прогноз изменений сейсмического режима на Хибинских апатитовых рудниках [Текст] / А. А. Козырев, Ю. В. Федотова, О. Г. Журавлева // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : матер. VI Междунар. сейсмологической школы, Апатиты, 15-19 авг. 2011 г. – Обнинск : ГС РАН, 2011. – С. 170-174.
30. Козырев, А. А. Мониторинг состояния подземных горных выработок по данным лазерного сканирования [Текст] / А. А. Козырев, В. В. Тимофеев, К. Н. Константинов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 2. – С. 134-140.

31. Колмаков, В. Д. К вопросу прогноза удароопасности массива горных пород [Текст] / В. Д. Колмаков, Р. А. Ахметгареев // Технический прогресс в атомной промышленности. Серия ГМП. – 1983. – № 4. – С. 26-30.
32. Корсакова, О. Р. Блоковое строение Кольского полуострова: морфологическое районирование, геоэкологическая устойчивость в условиях природных систем (на примере горных массивов Хибин и Ловозеро) / Корсакова О.Р., Колька В.В., Савченко С.Н. // Вестник МГТУ, 12(3), 478-491. – 2009
33. Корчак, А. В. Вывалы породы при проведении горных выработок угольных шахт / Корчак А. В., Пшеничный В. А. // ГИАБ. 1995. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vyvaly-porody-priprovedenii-gornyh-vyработок-ugolnyh-shaht> (дата обращения: 02.03.2022).
34. **Корчак, П. А.** Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 85–98. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_85.
35. **Корчак, П.А.** Геомеханическое обоснование формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок рудников АО «Апатит» / **П.А. Корчак**, М.А. Карасев // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15, № 1. С. 67–80. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80.
36. Кузнецов, Г.Н. Моделирование проявлений горного давления / Г.Н. Кузнецов, М.Н. Будько, Ю.И. Васильев, М.Ф. Шклярский, Г.Г. Юревич, Л., Недра, 1968. – 280 с.
37. Концентрационный порог разрушения и прогноз горных ударов [Текст] / А. Ю. Гор [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1989. – № 3. – С. 54-60.
38. Корчагин, Ф. Г. Геодинамика Амурского геоблока [Текст] / Ф. Г. Корчагин // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений: 1 Российско-Японский семинар, Хабаровск, 26-29 сент. 2000 г. – Хабаровск : ИТиГ ДВО РАН, 2001. – С. 18-39.
39. Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород [Текст] / Ю. О. Кузьмин, В. С. Журов. – М. : Изд-во МГТУ, 2004. – 262 с.
40. Куксенко, В. С. Возможности акустической эмиссии в прогнозировании разрушения горных пород [Текст] / В. С. Куксенко // Системы контроля горного давления. – М. : ИПКОН, 1989. – С. 5-22.
41. Курленя, М. В. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород [Текст] / М. В. Курленя, В. Н. Опарин. – Новосибирск : Наука, 1999.

42. Ловчиков, А. В. Современное состояние проблемы регистрации, прогноза и предупреждения горно-тектонических ударов в рудниках [Текст] / А. В. Ловчиков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 1. – С. 173-183.
43. Ловчиков, А. В. Техногенное сейсмическое событие как критерий геодинамической опасности месторождения [Текст] / А. В. Ловчиков // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли : тр. Всерос. конф. с участием иностранных ученых. – Новосибирск : ИГД СО РАН, 2010. – С. 410-414.
44. Лукьянов, В.Г. Исследование влияния геомеханических факторов и разработка способов повышения устойчивости породного обнажения в проводимых горизонтальных горных выработках / В.Г. Лукьянов, И.В. Третенков // «Науки о Земле» 2012 г
45. Мендецки, А. Ж. Мониторинг сейсмичности в рудниках и шахтах [Текст] / А. Ж. Мендецки, Д. А. Маловичко // Интернациональный симпозиум по горным ударам и сейсмологии в рудниках и шахтах. – Rotterdam : Balkema, 1993. – С. 205-225.
46. Мазуров, Б.Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики // Сибпринт, Новосибирск, 2019 г., 360 с
47. Маринин, А. Структурные парагенезы и тектонические напряжения южной части Хибинского массива / А. Маринин, Л. Сим, Д. Жиров, И. Бондарь // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2018. - 15. - 239-241. 10.31241/FNS.2018.15.059
48. Методические рекомендации по расчету крепи горных выработок в упрочненном массиве Донецк – 1989.
49. Методы и средства контроля состояния и свойств горных пород в массиве [Текст] / Е. С. Ватолин [и др.]. – М. : Недра, 1989. – 173 с.
50. Мирзаев, Г.Г. Крепь горных выработок глубоких рудников / Г.Г. Мирзаев, А.Г. – М.: Протосеня, Ю.Н. Огородников, В.И. Вхарев. - М.: Недра, 1984. – 252 с.
51. Мочалов, А.М. Учет влияния трещиноватости скальных и полускальных пород на прочность массива при оценке устойчивости бортов карьеров по данным разведки / Мочалов А.М., Кагермазова С.В., Гребенщикова Г.А // Записки Горного института. 2011.
52. Мониторинг геодинамической и геоэкологической безопасности освоения недр и земной поверхности [Текст] / Д. В. Яковлев [и др.] // Проблемы геодинамической безопасности : мат-лы II-го междунар. рабочего совещ. – СПб. : ВНИМИ, 1997. – С. 5-18.
53. Некрасов, С. В. Анализ напряженно-деформированного состояния пород в окрестности забоя плоской и вогнутой форм [Текст] / С. В. Некрасов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 7. – С. 350-352.

54. Обоснование классификационных критериев динамических явлений при подземной разработке полезных ископаемых [Текст] / Ю. П. Шуплецов [и др.] // Горный журнал. – 2005. – № 6. – С. 18-22
55. Оловянный, А.Г. Некоторые задачи механики массивов горных пород. СПб., 2003. 234 с.
56. Оловянный, А.Г. Механика горных пород. Моделирование разрушений. – СПб.: ООО «Издательство-полиграфическая компания «КОСТА», 2012. 280 с.
57. Оценка геомеханического состояния удароопасного массива горных пород по результатам геоакустического мониторинга на месторождении Антей [Текст] / П. А. Аникин // Проблемы недропользования: мат-лы VI Всероссийской молодежной научнопрактич. конф, 8-10 февраля 2012 г. / ИГД УрО РАН. - Екатеринбург: УрО РАН, 2012. – С. 421-431.
58. Особенности структуры Хибинского массива и апатито-нефелиновых месторождений. Онохин Ф.М. «Наука», Л., 1975, 106 с.
59. Оценка влияния трещиноватости на устойчивость массивов горных пород / В.И. БорщКомпаниец и др. // Горный журнал. – 1980. – № 10
60. Петров, Д.Н. Шахтные наблюдения за состоянием крепи сопряжений горизонтальных выработок, пройденных в слабых рудах // Записки Горного института, 2007. – Т. 172. – с. 66-68
61. Петухов, И. М. Геодинамика недр [Текст] / И. М. Петухов, И. М. Батугина. – М. : Недра, 1999. – 288 с.
62. Петухов, И. М. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках [Текст] / И. М. Петухов, А. М. Ильин, К. Н. Трубецкой. – М. : Изд-во АГН, 1997. – 376 с.
63. Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам, утвержденному приказом Федеральной службы по 154 экологическому, технологическому и атомному надзору №576 от 2 декабря 2013 г. [Электронный ресурс]. – <http://docs.cntd.ru/document/499086982>
64. Потемкин, Д. А. Моделирование процессов сдвижения массива горных пород при нисходящем порядке отработки рудного тела Яковлевского месторождения [Текст] / Д. А. Потемкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 5. – С. 137-141.
65. Природные и техногенные изменения напряженно-деформированного состояния пород на урановом месторождении в гранитах [Текст] / В. А. Петров [и др.] // Физика Земли. – 2009. – № 11. – С. 86-95
66. Прогноз и профилактика горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений с позиций нелинейной геодинамики [Текст] / Н. Н. Мельников [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2001. – № 4. – С. 17-31.

67. Протосеня, А.Г. Прогноз напряженно-деформированного состояния дисперсноармированной набрызгбетонной крепи в трещиноватых массивах / А.Г. Протосеня, М.А. Вильнер // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2021. - № 5 (147). - С. 5-14. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-5-14.
68. Протосеня, А.Г. Прогноз устойчивости породных обнажений, располагаемых в структурно-нарушенных массивах рудников КФ АО «Апатит» / А.Г. Протосеня, М.А. Вильнер, Р.О. Сотников // Сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции 05-06 марта 2020 г. - С. 1569-1575.
69. Протосеня, А.Г. Определение масштабного эффекта прочностных свойств трещиноватого горного массива / А. Г. Протосеня, П.Э. Вербилло // Известия тульского государственного университета, Тула, 2016 г., № 1, с. 167-177.
70. Протосеня, А.Г. Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива / А. Г. Протосеня, П.Э. Вербилло // Записки горного института, СПб, 2017 г., № 223, с. 51-58.
71. Рассказов, И. Ю. Влияние условий разработки на характер формирования техногенных полей напряжений в удароопасном массиве горных пород [Текст] / И. Ю. Рассказов, О. И. Чернышов, В. М. Марач // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 8. – С. 50-55.
72. Рассказов, И. Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона [Текст] / И. Ю. Рассказов. – М. : Горная книга, 2008. – 329 с.
73. Рассказов, И. Ю. Прогноз динамических проявлений горного давления на месторождении Антей по данным геоакустического мониторинга [Текст] / И. Ю. Рассказов, П. А. Аникин, Г. Ш. Цициашвили // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 10. – С. 162-169.
74. Рац, М.В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород / Рац, М.В., Чернышев С.Н // М.: Недра – 1970 г. - 160 с
75. Руппенейт, К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. К.В. Руппенейт. – М.: «Недра», 1975. – 223 с.
76. Савич, А. И. Рекомендации по изучению напряженного состояния горных пород геофизическими методами [Текст] / А. И. Савич, Б. Д. Куянджич. – Москва-Белград, 1986.
77. Савченко, С.Н. Напряженное состояние пород блочного строения / Савченко С. Н., Козырев А. А., Мальцев В. А. // ФТПРПИ. - №5. - 1994. - С. 38-47.
78. Санникова, А.П. Методика оперативного определения трещиноватости пород и ее применение для оценки прочности при расчете устойчивости бортов карьеров. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Санкт-Петербург– 2012

79. Саксин, Б. Г. Исследование процессов геомеханической самоорганизации природно-технических систем на удароопасных месторождениях Востока России [Текст] / Б. Г. Саксин, И. Ю. Рассказов, Б. А. Просекин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 9. – С. 118-124.
80. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619358. Российская Федерация. Программа для расчета критерия JRC для единичного нарушения на основе анализа растрового изображения: № 2024619358: заявл. 03.04.2024: опубл. 23.04.2024 / заявитель СПГУ – 1 с.
81. Сильнейшее техногенное землетрясение на руднике «Умбозеро» : Горнотехнические аспекты [Текст] / А. А. Козырев [и др.] // Горный журнал. – 2002. – № 1. – С. 43-49.
82. Синегубов, В.Ю. Оценка влияния очистных работ на формирование нарушенных зон в массиве на контуре выработки большого сечения в условиях апатит-нефелиновых месторождений / В.Ю. Синегубов, М.Г. Попов, М.А. Вильнер, Р.О. Сотников // Горный журнал. - 2021. - № 2021 (8). - С. 26-30. DOI: 10.17580/gzh.2021.08.04.
83. Соннов, М.А. Применение численного и блочного геомеханического моделирования для определения параметров крепления камерных выработок большого сечения / Соннов М.А., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Шпилев С.В. // Горная промышленность. 2021. №2.
84. Сотников, Р.О. Прогноз воздействия динамических проявлений горного давления на устойчивость породных обнажений / Р.О. Сотников, М.А. Вильнер // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2020. - № 6 специальный выпуск 21. - С. 3- 13. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-21-3-13.
85. Совершенствование методов и средств контроля динамических проявлений горного давления на рудниках ОАО «ППГХО» [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный журнал. – 2013. – № 8 (2). – С.10-20.
86. Совершенствование технических и программно-методических средств геоакустического мониторинга удароопасного массива горных пород [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 6. – С. 119-125. 118. С
87. Татаринов, В. Н. Методика проведения контроля устойчивости выработок сейсмоакустическим комплексом “Гроза-16” [Текст] / В. Н. Татаринов. – М. : ВНИИПромтехнология, 1992. – 41 с.
88. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок [Текст] / И. А. Турчанинов [и др.]. – Л. : Наука, 1978. – 256 с

89. Тимофеев, О.В. Способы обеспечения устойчивости горных выработок // Записки Горного института. 1975. Т. № 1 67. С. 161.
90. Турчанинов, И.А. Тектонические напряжения и устойчивость горных выработок / И.А. Турчанинов, Г.А. Марков, В.И. Иванов, А.А. Козырев – Л.: Наука. – 1978. – 256 с.
91. Третенков, И.В. Влияние горнотехнических факторов на устойчивость породных обнажений выработок и безопасность горно-проходческих работ // Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово, 2002. С. 96–97.
92. Указания по безопасному ведению горных работ на Хинганском месторождении, опасном по горным ударам [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.]. – Хабаровск : ИГД ДВО РАН, 2004. – 53 с.
93. Физические и методические основы прогнозирования горных ударов [Текст] / В. С. Куксенко [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1987. – № 1. – С. 9-22.
94. Asano, T. An observational excavation control method for adjacent mountain tunnels / Asano T., Ishihara M., Kiyota Y., Kurosawa H., Ebisu S. // Tunnelling and Underground Space Technology. 2003, 18(2-3): 291-301
95. Bandis, S. C. Fundamentals of rock joint deformation / Bandis, S. C., Lumsden, A. C., Barton, N. R. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1983. 20(6), 249-268.
96. Bandis, S.C. Experimental studies of scale effects on the shear behavior of rock joints / Bandis S.C.; Lumsden A.C., Barton N.R. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics abstracts. – 1981. 18, 1-21.
97. Barla, G. Continuum and discontinuum modelling in tunnel engineering / Barla, G., Barla, M. // Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik. – 2000. 52(12), 45-57
98. Barton, N.R. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support / Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J. // Rock Mech. 6(4), 189-239, 1974
99. Barton, N. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions / N. Barton // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. Volume 5(4). P. 249-261.
100. Barton, N. The shear strength of rock joints in theory and practice / N. Barton, V. Choubey // Rock Mechanics. 1977. Volume 10. P. 1-54.
101. Barton, N.R. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice / Barton N.R., Bandis S. // Rock joints: Proc. Int. Symp. on Rock Joints. – 1990. – pp. 603-610.

102. Barton, N. Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. Proceedings - Symposium on Rock Mechanics. – 1982. 739-760.
103. Bazant, Z.P. Microplane constitutive model for porous isotropic rocks / Z. Goangseup // Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 2003. Vol. 27. P. 25–47.
104. Bieniawski, Z.T. Determining rock mass deformability: Experience from case histories / Z.T. Bieniawski // Int J Rock Mech Min SciGeomechAbstr. 1978. Volume 15. P. 237-247.
105. Bieniawski, Z.T. Engineering classification of jointed rock masses / Z.T. Bieniawski // Trans. S. African Instn. Civ. Engrs. 1973. Volume 15(12). P. 335 - 344.
106. Bieniawski, Z. T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. Wiley-Interscience. pp. 40–47, 1989.
107. Bieniawski, Z.T. Engineering rock mass classifications / Z.T. Bieniawski // John Wileyand sons, 1989. –252 p.
108. Bucky, P.B. Effect of approximately vertical cracks on the behaviour of horizontally lying roof strata. Trans. A.I.M.E.. 109. 212-229.
109. Cai, M. Visualization of the Rock Mass Classification Systems / M. Cai, P.K. Kaiser // Geotechnical and Geological Engineering. – 2006. DOI: 10.1007/s10706-005-7464-x
110. Cantarella, V. JCR estimation with 3D laser scanner image / V. Cantarella, J.P. Monticelli, P.P Cacciari, M.M. Futai // VII Brazilian Symposium of Rock Mechanics. – 2016.
111. Cottiss, G.I.A Rock classification system applied in civil engineering (part 1) / G.I. Cottiss, R.W. Dowel, J.A. Franklin // Civil Engn. and Public Works Review, 1971.P. 611-614.
112. Deere, D.U. The rock quality designation (RQD) Index in practice / D.U. Deere, D.W. Deere // Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988. P. 91a-101.
113. Diederichs, M.S. Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations / M.S. Diederichs, P.K. Kaiser // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1999. 36, 69-96. DOI:10.1016/S0148-9062(98)00179-X.
114. Grimstad, E. Updating the Q system for NMT / E. Grimstad, N. Barton // Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mech. – 1993. 189-239.
115. Gerçek, H. Stability considerations for underground excavation intersections. Mining Science and Technology. -1986. 4, 49-57. DOI:10.1016/S0167-9031(86)90194-5.
116. Homand, F. Geometric analysis of damaged microcracking in granites / F. Homand, D. Hoxha, T. Belem, M.N. Pons, N. Hotetiti // Mechanics of Materials. 2000. Vol. 32. P. 361–376.
117. Hoxha, D. Microstructural approach in damage modelling / D. Hoxha, F. Homand // Mechanics of Materials. 2000. Vol. 32. P. 377-387.

118. Heuze, F. E. Scale effects in the determination of rock mass strength and deformability / F. E. Heuze // *Rock mechanics*. 1980. Volume 12. P. 167-192.
119. Hoek, E. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition / E. Hoek, C.T. Caranza-Torres, B. Corcum // *Proc. of the North American Rock Mechanics Society (NARMSTAC'2002)*. – Toronto: Mining Innovation and Technology, 2002. – v. 1. – pp. 267-273
120. Hussian, S. Review of the Geological Strength Index (GSI) as an Empirical Classification and Rock Mass Property Estimation Tool: Origination, Modifications, Applications, and Limitations / S. Hussian, N. Mohammad, Z. Ur Rehman, N. Muhammad Khan, K. Shahzada, Sa. Ali, M. Tahir, S. Raza, S. Sherin // *Advances in Civil Engineering*. – 2020. Article ID 6471837, 18 p. <https://doi.org/10.1155/2020/6471837>
121. Labuz, J. Mohr–Coulomb Failure Criterion / J. Labuz, A. Zang // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012. 45, 975-979. DOI:10.1007/s00603-012-0281-7
122. Laubscher, D.H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design // *J.S. Afr. Inst. Min. Metall.* – 1990. 90. 10. 257-273.
123. Martin, C. D. Observations of brittle failure around a circular test tunnel / C.D. Martin, R.S. Read, J.B. Martino // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 1997, vol. 34, no. 7, pp. 1065-1073.
124. Marinos, P. The Geological Strength Index (GSI): A characterization tool for assessing engineering properties of rock masses / P. Marinos, V. Marinos, E. Hoek// *Underground works under special conditions*. - 2007. 87-94. DOI:10.1201/NOE0415450287.ch2
125. Nguyen, V.M. Static and dynamic behaviour of joints in schistose rock: lab testing and numerical simulation, *Publ. Geotechnical Institute 2013-3*, ed. H. Konietzky, TU Bergakademie Freiberg, Germany.
126. Palmstrøm, A. Characterizing rock masses by the R_{Mi} for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass index (R_{Mi}), *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 11, Issue 2, 1996, P. 175-188, [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(96\)00015-6](https://doi.org/10.1016/0886-7798(96)00015-6)
127. Protosenia, A. G. Research of the mechanical characteristics' anisotropy of apatite-nepheline ores block rock mass / A. G. Protosenia, M. A. Karasev, P. E. Verbilo // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, no. 11, pp. 1962-1972.
128. Ramamurthy, T. Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states / T. Ramamurthy, V.K. Arora, // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1994. 13:1: 9-22
129. Shabarov, A. Geodynamic risks of mining in highly stressed rock mass / F. Shabarov, A. Kuranov, A. Popov, S. Tsirel // *E3S Web of Conferences*. – 2019. 129:01011. DOI: 10.1051/e3sconf/201912901011

130. Shah, S. A Study of the Behaviour of Jointed Rock Masses // PhD Thesis. – 1992.
131. Singh, M. Laboratory and Numerical Modelling of a Jointed Rock Mass / M. Singh, B. Singh // The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG). – 2008. 2. 1373-1380.
132. Vilner, M. The assessment of the roof beam stability in mine workings / M. Vilner, T.T. Nguen, P. Korchak // Scientific reports on resource issues. - 2019. - №1. - C. 53-57. DOI: 10.1201/9781003017226-7.
133. Vilner, M. Assessment of the stability of mines during development of mineral deposits in overpressed rock masses // Ksiazka abstraktow 59 KSKNPG AGH. - 2018. - C. 6
134. Wawersik, W. R. A study of brittle rock fracture in a laboratory compression experiments / Wawersik W. R., Fairhurst C. // Int. J. Rock Mech. Mm. Set. – 1979. 7. 561-575
135. Weile, D. Features of information DJ Characterizing the lime distribution structure of regional seismic activities before and after ten moderate strong earthquakes in Greater North China region [Text] / D. Weile [et al.] // Journal of Earthquake Prediction Research. –1993. – Vol. 2, № 4. – pp. 515-527.
136. Wang, X. Determination of mechanical parameters for jointed rock masses / X. Wang, Y. Zhao, X. Lin // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2011. Volume 3. P. 398-406.
137. Yang, T. Anisotropic characteristics of jointed rock mass: A case study at Shirengou iron ore mine in China / T. Yang, P. Wang, T. Xu, Q. Yu, P. Zhang, W. Shi, G. Hu // Tunneling and Underground Space Technology. 2015. Vol. 48. P. 129-139.
138. Yang, X. Numerical simulation of a jointed rock block mechanical behavior adjacent to an underground excavation and comparison with physical model test results / X. Yang, P.H.S.W. Kulatilake, H. Jing, S. Yang // Tunneling and Underground Space Technology. 2015. Vol. 50. P. 129-142.
139. Zienkiewicz, O. C. Time-dependent multilaminate model of rock - A numerical study of deformation and failure of rock masses / O.C. Zienkiewicz, G.N. Pande // International journal for numerical and analytical methods on geomechanics. 1997. Vol. 1. P. 219-247.
140. Zhao, Y. Crack pattern evolution and a fractal damage constitutive model for rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1998. Vol. 35(3). P. 349–366.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Акт внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Директор департамента
(Кировского филиала по горному
производству)

 В.Б. Мельник
« 15 » 2023 г.

АКТ

об использовании результатов
кандидатской диссертации
Корчака Павла Анатольевича

По научной специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Рабочая комиссия в составе:

Председатель:

Начальник управления развития горных работ Шептура Валентин
Иванович;

Члены комиссии:

Начальник геолого-маркшейдерской службы Белоусов Вячеслав
Викторович;

Начальник службы прогноза и предотвращения горных ударов Стрешнев
Анатолий Александрович;

Главный горняк по подземным горным работам Вылегжанин Александр
Борисович.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему
«Прогноз геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных
выработок в породах, склонных к хрупкому разрушению», представленной
на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в
производственной деятельности Кировского Филиала АО «Апатит» при
разработке нормативных документов, содержащих разделы, касающиеся
методик расчета параметров крепей выработок в части предлагаемого
методологического подхода к учету размера зон хрупкого разрушения при

расчете как одиночных большепролетных выработок, так и сопряжений выработок.

Дата начала внедрения – с момента утверждения «Изменение 1 к И КФ 19-2019 Инструкция по креплению и управлению кровлей горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит». (АП-КФ.542.01/АП-КФ.300-03/2/1/0001-2023 от 23.01.2023).

Использование указанных результатов позволит повысить точность оценки напряженно-деформированного состояния приконтурного массива, что позволит повысить безопасность ведения проходческих работ, снизить затраты на ремонт и перекрепление участков горных выработок.

Результаты исследований используются при разработке положений «Инструкции по креплению и управлению кровлей на рудниках Кировского Филиала АО «Апатит», «Указаний по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам».

По результатам разработок Корчака Павла Анатольевича разработан 1 патент.

Председатель комиссии

Начальник управления развития горных работ

В.И. Шептура

Члены комиссии:

Начальник службы прогноза и предотвращения горных ударов

А.А. Стрешнев

Начальник геолого-маркшейдерской службы

В.В. Белоусов

Главный горняк по подземным горным работам

А.Б. Вылегжанин

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024619358

Программа для расчета критерия JRC для единичного нарушения на основе анализа растрового изображения

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Корчак Павел Анатольевич (RU), Карасев Максим Анатольевич (RU)*

Заявка № **2024616839**

Дата поступления **03 апреля 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **23 апреля 2024 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ю.С. Зубов'.

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**RU2024619358****ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства): 2024619358 Дата регистрации: 23.04.2024 Номер и дата поступления заявки: 2024616839 03.04.2024 Дата публикации и номер бюллетеня: 23.04.2024 Бюл. № 5 Контактные реквизиты: нет	Автор(ы): Корчак Павел Анатольевич (RU), Карасев Максим Анатольевич (RU) Правообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (RU)
--	---

Название программы для ЭВМ:

Программа для расчета критерия JRC для единичного нарушения на основе анализа растрового изображения

Реферат:

Программа может быть использована для решения задач геомеханики и механики подземных сооружений в части автоматизации получения данных о неровности стенок трещин горной породы. Программа включает в себя алгоритмы обработки растровых изображений для получения цветových матриц и сравнения их с эталонными, полученными на основании обработки эталонных кривых неровностей стенок трещин. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: анализ растровых изображений профиля неровностей стенок трещин и получение цветовой матрицы; сравнение эталонной и расчетной цветových матриц и выбор наиболее соответствующей эталонной матрицы; определение показателя JRC, характеризующего неровность стенок трещин и прочность контакта стенок трещин. Программа может применяться в рамках учебной дисциплины «Геомеханика» для специальности 21.05.04 «Строительство горных предприятий и подземных сооружений».

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 279,3 МБ

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Журналы натуральных наблюдений

Рудник: Кировский

Горизонт: + 10 м

Выработка: кварцшлаг №2

Участок выработки: одиночная

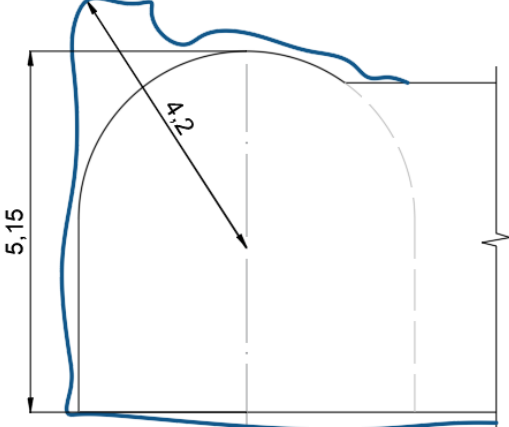
№ п/п	Характеристики	Описание	Фактическое сечение
1	Тип вмещающих пород согласно геологическому плану	уртиты	
2	Прочность пород $R_{СЖ}$, МПа	200	
3	Площадь поперечного сечения проектная / фактическая, м ²	20,92 / 26,17	
4	Расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения R_f , м	3,27	
5	Эквивалентный радиус выработки a , м	2,56	
6	Максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения, МПа	125	
7	Фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки, МПа	53	
8	Мероприятия	Проведены мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРЦ)	

Рудник: Кировский

Горизонт: + 10 м

Выработка: Западный откаточный штрек и вентиляционная сбойка ВВ +10/+33

Участок выработки: Т-образное сопряжение

№ п/п	Характеристики	Описание	Фактическое сечение
1	Тип вмещающих пород согласно геологическому плану	уртиты	
2	Прочность пород $R_{сж}$, МПа	206	
3	Площадь поперечного сечения проектная / фактическая, м ²	21,5 / 28,6	
4	Расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения R_f , м	4,2	
5	Эквивалентный радиус выработки a , м	3,3	
6	Максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения, МПа	137,8	
7	Фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки, МПа	57,8	
8	Мероприятия	Проведены мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРЦ)	

Рудник: Кировский

Горизонт: + 10 м

Выработка: Западный откаточный штрек и вентиляционная сбойка ВВ +10/+33

Участок выработки: подходной участок

№ п/п	Характеристики	Описание	Фактическое сечение
1	Тип вмещающих пород согласно геологическому плану	уртиты	
2	Прочность пород $R_{сж}$, МПа	206	
3	Площадь поперечного сечения проектная / фактическая, м ²	21,5 / 26,9	
4	Расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения R_f , м	4,31	
5	Эквивалентный радиус выработки a , м	3,31	
6	Максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения, МПа	140,43	
7	Фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки, МПа	59,8	
8	Мероприятия	Проведены мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРЩ)	

Рудник: Кировский

Горизонт: + 10 м

Выработка: Грузовая ветвь (2) С-3 - сбойка с грузовой ветвью (1)

Участок выработки: Т-образное сопряжение

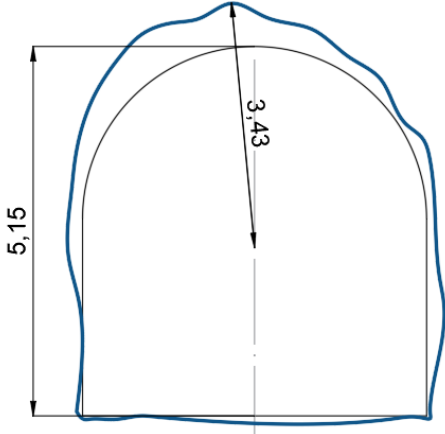
№ п/п	Характеристики	Описание	Фактическое сечение
1	Тип вмещающих пород согласно геологическому плану	уртиты	
2	Прочность пород $R_{сж}$, МПа	201	
3	Площадь поперечного сечения проектная / фактическая, м ²	21,7 / 23,8	
4	Расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения R_f , м	3,34	
5	Эквивалентный радиус выработки a , м	2,43	
6	Максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения, МПа	152,36	
7	Фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки, МПа	64,8	
8	Мероприятия	Проведены мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРЩ)	

Рудник: Кировский

Горизонт: + 10 м

Выработка: Грузовая ветвь (2) С-3 - сбойка с грузовой ветвью (1)

Участок выработки: подходной участок к сопряжению

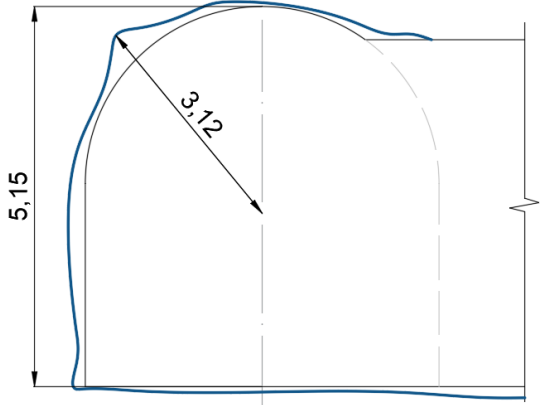
№ п/п	Характеристики	Описание	Фактическое сечение
1	Тип вмещающих пород согласно геологическому плану	уртиты	
2	Прочность пород $R_{сж}$, МПа	200	
	Площадь поперечного сечения проектная / фактическая, м ²	21,7 / 25,9	
3	Расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения R_f , м	3,43	
4	Эквивалентный радиус выработки a , м	2,45	
5	Максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения, МПа	156,56	
6	Фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки, МПа	66,6	
7	Мероприятия	Проведены мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРЩ)	

Рудник: Кировский

Горизонт: + 10 м

Выработка: Порожняковая ветвь (2) С-3 - Автоуклон 108/10 м

Участок выработки: Т-образное сопряжение

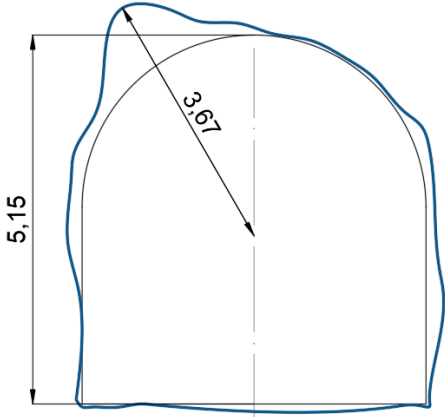
№ п/п	Характеристики	Описание	Фактическое сечение
1	Тип вмещающих пород согласно геологическому плану	Уртиты	
2	Прочность пород $R_{сж}$, МПа	190	
3	Площадь поперечного сечения проектная / фактическая, м ²	21,7 / 24,0	
4	Расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения R_f , м	3,12	
5	Эквивалентный радиус выработки a , м	2,57	
6	Максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения, МПа	125,91	
7	Фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки, МПа	55,6	
8	Мероприятия	Проведены мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРЦ)	

Рудник: Кировский

Горизонт: + 10 м

Выработка: Порожняковая ветвь (2) С-3 - Автоуклон 108/10 м

Участок выработки: подходной участок к сопряжению

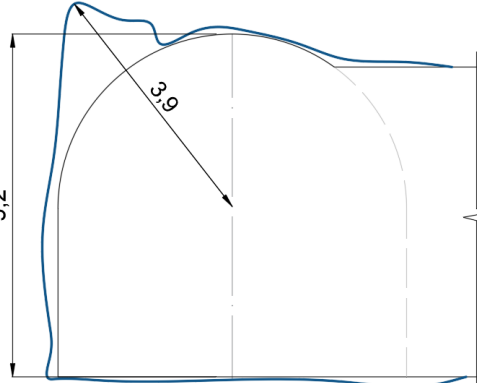
№ п/п	Характеристики	Описание	Фактическое сечение
1	Тип вмещающих пород согласно геологическому планшету	Уртиты	
2	Прочность пород $R_{ск}$, МПа	204	
3	Площадь поперечного сечения проектная / фактическая, м ²	21.7 / 25,16	
4	Расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения R_f , м	3.67	
5	Эквивалентный радиус выработки a , м	2.57	
6	Максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения, МПа	161.18	
7	Фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки, МПа	72,8	
8	Мероприятия	Проведены мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРЦ)	

Рудник: Кировский

Горизонт: + 10 м

Выработка: Автоуклон 108/10 м – Насосная

Участок выработки: Т-образное сопряжение

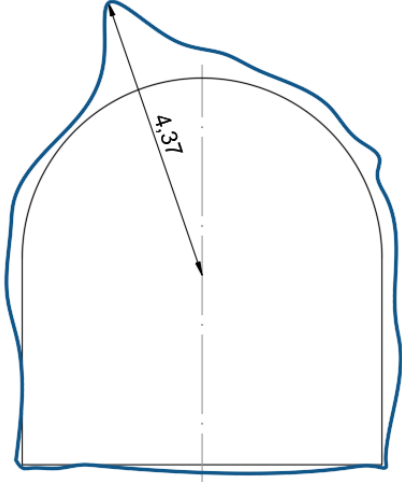
№ п/п	Характеристики	Описание	Фактическое сечение
1	Тип вмещающих пород согласно геологическому плану	Уртиты	
2	Прочность пород $R_{ск}$, МПа	200	
3	Площадь поперечного сечения проектная / фактическая, м ²	24.7 / 26,25	
4	Расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения R_f , м	3.9	
5	Эквивалентный радиус выработки a , м	3.02	
6	Максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения, МПа	138.66	
7	Фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки, МПа	59	
8	Мероприятия	Проведены мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРЩ)	

Рудник: Кировский

Горизонт: + 10 м

Выработка: Автоуклон 108/10 м – Насосная

Участок выработки: подходной участок к сопряжению

№ п/п	Характеристики	Описание	Фактическое сечение
1	Тип вмещающих пород согласно геологическому планшету	Уртиты	
2	Прочность пород $R_{ск}$, МПа	200	
3	Площадь поперечного сечения проектная / фактическая, м ²	28.88 / 33,3	
4	Расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения R_f , м	4.56	
5	Эквивалентный радиус выработки a , м	3.68	
6	Максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения, МПа	130.05	
7	Фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки, МПа	55,3	
8	Мероприятия	Проведены мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРЦ)	

Рудник: Кировский

Горизонт: + 10 м

Выработка: камера ЦПП - сбойка с Квершлагом 1ЮВС-2

Участок выработки: Т-образное сопряжение

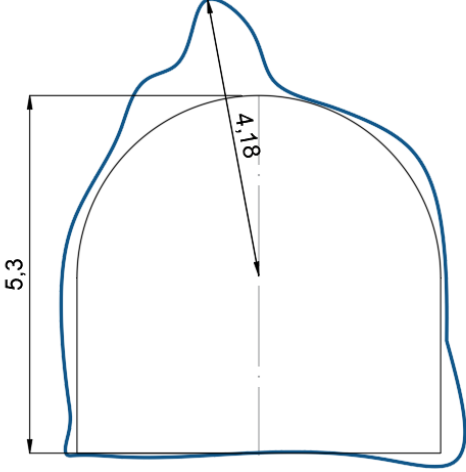
№ п/п	Характеристики	Описание	Фактическое сечение
1	Тип вмещающих пород согласно геологическому плану	Ийолиты	
2	Прочность пород $R_{сж}$, МПа	170	
3	Площадь поперечного сечения проектная / фактическая, м ²	25.3 / 27,4	
4	Расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения R_f , м	3.58	
5	Эквивалентный радиус выработки a , м	3.13	
6	Максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения, МПа	120.44	
7	Фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки, МПа	51,25	
8	Мероприятия	Проведены мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРИЦ)	

Рудник: Кировский

Горизонт: + 10 м

Выработка: камера ЦПП - сбойка с Квершлагом 1ЮВС-3

Участок выработки: подходной участок к сопряжению

№ п/п	Характеристики	Описание	Фактическое сечение
1	Тип вмещающих пород согласно геологическому плану	Ийолиты	
2	Прочность пород $R_{ск}$, МПа	175	
3	Площадь поперечного сечения проектная / фактическая, м ²	25.3 / 30,2	
4	Расстояние от центра выработки до крайней границы зоны хрупкого разрушения R_f , м	4.18	
5	Эквивалентный радиус выработки a , м	3.13	
6	Максимальное напряжение, действующее в плоскости сечения, МПа	153.72	
7	Фоновое напряжение во вмещающем массиве на момент проходки горной выработки в плоскости сечения выработки, МПа	69,84	
8	Мероприятия	Проведены мероприятия по приведению выработки в неудароопасное состояние методом бурения разгрузочных скважин (ОРЩ)	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Результаты анализа полученных данных

Таблица Г.1 - Результаты анализа полученных данных

№ п/п	Наименование участка исследования			Общие данные об участке горной выработки				Размер зоны хрупкого разрушения, м		Сопоставление результатов		Примечание
	Отм.	Наименование горной выработки	Местоположение (пикеты, и другое описание)	Категория состояния согласно Паспорта КиУК	Прочность пород, МПа	Максимальные напряжения, МПа	Ширина горной выработки, м	Прогнозный, (h_{xp}), м Уточненный/упрощенный методы	Фактическая (h_{xp}^f), м Диапазон/максимальная	Количественное (в %), по формуле $\frac{h_{xp}^f}{h_{xp}} \cdot 100\%$ По уточненному способу/ по упрощенному способу)	Качественное описание	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	+108	БДШ 111	ПК 15-18,5 м	«В»	120	45,5	4,6	1,7/0,3	<u>0,4-0,69</u> 0,69	251%/43%	Можно констатировать, что прогнозные данные не показали сколько бы схожий с фактическими данными результат.	Данное несоответствие можно увязать в уточненном способе с некорректными данными по σ_1 и σ_2 , а в упрощенном, неверная прогнозная характеристика массива – категория состояния В, так как решением обратной задачи можно получить, что фактически на участке с наблюдалась категория Г (на момент эксплуатации). Стоит отметить, что изменение расчетных прочностных свойств массива в диапазонах для указанной в паспорте категории пород по прочности не приводит к какому-либо большему совпадению прогнозных данных с фактическими.
2	+108	БДШ 110	ПК 10-16 м	«В»	120	49	4,6	2,0/0,3	<u>0,6-0,9</u> 0,9	33%/220%		
3	+133	БДШ 29	ПК 10-15 м	«В»	120	46	4,6	1,8/0,3	<u>0,6-0,8</u> 0,8	221%/37%/		
4	+158	БДШ 311	ПК 45-53 м	«Г»	120	48	4,6	1,9/1,2	<u>1,2-1,45</u> 1,45	132%/81%/	Уточненный способ показал завышение результатов, упрощенный незначительное занижение результатов	Уточненный способ завышает результат, в связи с завышенными напряжениями, получаемыми по численной модели. Упрощенный способ показывает приемлемый результат погрешность, а если принимать интервал фактических значений, то прогнозные значения находятся в нем.
5	+158	БДШ 316	ПК 16,5-20 м	«Г»	120	55	4,6	1,8/1,2	<u>0,9-1,2</u> 1,12	199%/98%/	Уточненный способ показал завышение результатов, упрощенный незначительное завышение результатов	

Продолжение таблицы Г.1

№ п/п	Наименование участка исследования			Общие данные об участке горной выработки				Размер зоны хрупкого разрушения, м		Сопоставление результатов		Примечание
	Отм.	Наименование горной выработки	Местоположение (пикеты, и другое описание)	Категория состояния согласно Паспорта КИУК	Прочность пород, МПа	Максимальные напряжения, МПа	Ширина горной выработки, м	Прогнозный, ($h_{хр}$), м Уточненный/упрощенный методы	Фактическая ($h_{хр}^ф$), м Диапазон/максимальная	Количественное (в %), по формуле $\frac{h_{хр}}{h_{хр}^ф} \cdot 100\%$ По уточненному способу/ по упрощенному способу)	Качественное описание	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
6	+183	ОШ 16	ПК 40-43 м	«Г»	120	34	4,6	0,9/1,2	<u>0,6-0,85</u> 0,85	110%/162%/	Результаты завышены по обоим способам.	С практической точки зрения такое завышение может быть оправдано безопасностью.
7	+183	ОШ 15	ПК 48-54 м	«Г»	120	35	4,6	1,0/1,2	<u>0,4-0,7</u> 0,7	144%/168%/		
8	+183	ОШ 14	ПК 36-40 м	«Г»	120		4,6		<u>0*</u>	-	Сопоставление не проводилось, ввиду заведено завышенных результатов	* характерной зоны хрупкого разрушения не выявлено.
9	+183	БДШ 18	ПК 14-20 м	«Г»	120	42	4,6	1,5/1,2	<u>0,6-1</u> 1	149%/118%	Результаты завышены по обоим способам. Упрощенный точнее.	Упрощенный способ дает приемлемый результат. Неточность уточненного способа, опять же связана с тем, что по численной модели формируется сильная концентрация напряжений в районе выработки.
10	+183	БДШ 19	ПК 16-22 м	«Г»	120	45	4,6	1,7/1,2	<u>0,9-1,25</u> 1,25	136%/94%	Упрощенный способ показал несколько меньшее значение. Уточненный завышает значения.	
11	+400 м	БДШ 59	От оси МБО 5/13 (8-12 м на запад)	«Г»	120	89	4,6	1,2/1,2	<u>0,8-1,4</u> 1,4	86%/86%	Прогнозные данные показали несколько заниженный результат по сравнению с максимально фактической зоной, но если брать по среднему значению, то прогноз советует факту.	Некоторое занижение прогнозных результатов может быть связано со сложным полем напряжений при непосредственной близости очистных работ. Численное моделирование не может воссоздать полную картину НДС вокруг очистного пространства, поэтому хоть уточненный метод и ближе к фактическому значению, все равно значения занижены.
12	+400 м	БДШ 58	От оси МБО 5/13 (13-17 м)	«Г»	120	94	4,6	1,4/1,2	<u>1,4-1,9</u> 1,9	71%/62%	Прогнозные данные показали сильно заниженный результат по сравнению с максимально полученной зоной, и несколько заниженный если брать по	Также дополнительное влияние, повреждающее контур выработки могут оказывать сейсмические воздействия от БВР при добыче руды.

Продолжение таблицы Г.1

№ п/п	Наименование участка исследования			Общие данные об участке горной выработки				Размер зоны хрупкого разрушения, м		Сопоставление результатов		Примечание
	Отм.	Наименование горной выработки	Местоположение (пикеты, и другое описание)	Категория состояния согласно Паспорта КИУК	Прочность пород, МПа	Максимальные напряжения, МПа	Ширина горной выработки, м	Прогнозный, ($h_{кр}$), м Уточненный/упрощенный методы	Фактическая ($h_{кр}^ф$), м Диапазон/максимальная	Количественное (в %), по формуле $\frac{h_{кр}^ф}{h_{кр}} \cdot 100\%$ По уточненному способу/ по упрощенному способу)	Качественное описание	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
			на запад)								среднему значению фактических зон	
13	+400 м	БДШ 515	От оси ВТО 5/5 11-15 м на запад	«Г»	70	69	4,6	2,1/1,2	<u>0,6-1,1</u> 1,1	188%/107%	На всех трех участках упрощенный способ дал приемлемый результат, а уточненный показал (порядка двух раз) сильно завышенный результат прогнозных размеров в сравнении с фактическими	Уточненный способ завышает результат, в связи с завышенными напряжениями, получаемыми по численной модели. В первую очередь это связано с едиными деформационными свойствами руд, заложенными в модель, а расчет ведется, исходя из фактической прочности руд и для категорий по прочности пород IV и ниже, можно ожидать завышение показателей на регулярной основе. Упрощенный способ показывает приемлемый результат это связано с тем, что категория состояния определяется визуально по фактическому соотношению напряжений и прочности пород.
15	+400 м	БДШ 516	От оси ВТО 5/6 (29-33 м на запад)	«Г»	70	74	4,6	2,3/1,2	<u>0,5-1,2</u> 1,2	193%/98%/		
16	+400 м	БДШ 517	От оси ВТО 5/6 (24-28 м на запад)	«Г»	70	74	4,6	2,3/1,2	<u>0,6-1</u> 1	232%/118%		
17	+108 м	БДШ 110	ПК 15-18,5 м	«В»	120	49	4,6	2,0/0,3	<u>0,6-0,9</u> 0,9	33%/220%	Можно констатировать, что прогнозные данные не показали сколько бы схожий с фактическими данными результат.	Данное несоответствие можно увязать в уточненном способе с некорректными данными по σ_1 и σ_2 , а в упрощенном, неверная прогнозная характеристика массива – категория состояния В. Точнее характеристика дана только ан момент проходки, а на момент эксплуатации при попадании в зону влияния очистных работ информация не предоставлена. Решением обратной задачи можно получить, что фактически на участке с наблюдалась категория Г (на
18	+108 м	БДШ 111	ПК 15-18,5 м	«В»	120	45,5	4,6	1,7/0,3	<u>0,4-0,69</u> 0,69	251%/43%		

Продолжение таблицы Г.1

№ п/п	Наименование участка исследования			Общие данные об участке горной выработки				Размер зоны хрупкого разрушения, м		Сопоставление результатов		Примечание
	Отм.	Наименование горной выработки	Местоположение (пикеты, и другое описание)	Категория состояния согласно Паспорта КИУК	Прочность пород, МПа	Максимальные напряжения, МПа	Ширина горной выработки, м	Прогнозный, ($h_{кр}$), м Уточненный/упрощенный методы	Фактическая ($h_{кр}^ф$), м Диапазон/максимальная	Количественное (в %), по формуле $\frac{h_{кр}}{h_{кр}^ф} \cdot 100\%$ По уточненному способу/ по упрощенному способу)	Качественное описание	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
19	+158 м	БДШ 116	ПК 45-53 м	«Г»	120	48	4,6	1,9/1,2	<u>1,2-1,45</u> 1,45	132%/81%/	Уточненный способ показал завышение результатов, упрощенный незначительное завышение результатов	Уточненный способ завышает результат, в связи с завышенными напряжениями, получаемыми по численной модели. Упрощенный способ показывает приемлемый результат погрешность, а если принимать интервал фактических значений, то прогнозные значения находятся в нем.
20		БДШ 59 +400 м	От оси МБО 5/13 (8-12 м на запад)	«Г»	120	89	4,6	1,2/1,2	<u>0,8-1,4</u> 1,4	86%/86%	Прогнозные данные показали несколько заниженный результат по сравнению с максимально фактической зоной, но если брать по среднему значению, то прогноз советует факту.	Некоторое занижение прогнозных результатов может быть связано со сложным полем напряжений при непосредственной близости очистных работ. Численное моделирование не может воссоздать полную картину НДС вокруг очистного пространства, поэтому хоть уточненный метод и ближе к фактическому значению, все равно значения занижены.
21		БДШ 58 +400 м	От оси МБО 5/13 (13-17 м на запад)	«Г»	120	94	4,6	1,4/1,2	<u>1,4-1,9</u> 1,9	71%/62%	Прогнозные данные показали несколько заниженный результат по сравнению с максимально полученной зоной, и практически точный результат если брать по среднему значению фактических зон	Также дополнительное влияние, повреждающее контур выработки, могут оказывать сейсмические воздействия от БВР при добыче руды.

Продолжение таблицы Г.1

№ п/п	Наименование участка исследования			Общие данные об участке горной выработки				Размер зоны хрупкого разрушения, м		Сопоставление результатов		Примечание
	Отм.	Наименование горной выработки	Местоположение (пикеты, и другое описание)	Категория состояния согласно Паспорта КИУК	Прочность пород, МПа	Максимальные напряжения, МПа	Ширина горной выработки, м	Прогнозный, ($h_{кр}$), м Уточненный/упрощенный методы	Фактическая ($h_{кр}^ф$), м Диапазон/максимальная	Количественное (в %), по формуле $\frac{h_{кр}}{h_{кр}^ф} \cdot 100\%$ По уточненному способу/ по упрощенному способу)	Качественное описание	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
22		БДШ 516 +400 м	От оси ВТО 5/6 (29-33 м на запад)	«Г»	70	74	4,6	2,3/1,2	<u>0,5-1,2</u> 1,2	193%/98%	На всех участках упрощенный способ дал приемлемый результат, а уточненный показал (порядка двух раз) сильно завышенный результат прогнозных размеров в сравнении с фактическими	Уточненный способ завышает результат, в связи с завышенными напряжениями, получаемыми по численной модели. В первую очередь это связано с едиными деформационными свойствами руд, заложенными в модель, а расчет ведется, исходя из фактической прочности руд и для категорий по прочности пород IV и ниже, можно ожидать завышение показателей на регулярной основе. Упрощенный способ показывает приемлемый результат это связано с тем, что категория состояния определяется визуально по фактическому соотношению напряжений и прочности пород.
23		БДШ 517 +400 м	От оси ВТО 5/6 (24-28 м на запад)	«Г»	70	74	4,6	2,3/1,2	<u>0,6-1</u> 1	232%/118%		

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Временная методика определения размеров зон хрупкого разрушения

1. Введение

Настоящая «Методика прогноза развития зон хрупкого разрушения в высоконапряженных породных массивах для условий месторождений, обрабатываемых КФ АО «Апатит»» (далее Методика) разработана применительно к условиям подземных рудников КФ АО «Апатит». При разработке учтены требования нормативных и регламентирующих документов, современный опыт ведения горных работ при разработке апатит-нефелиновых месторождений, а также результаты научно-исследовательских работ, проведенных с 2020 по 2023 г.г. на рудниках КФ АО «Апатит».

Разработка месторождения полезных ископаемых апатит-нефелиновых руд на рудниках КФ АО «Апатит» сопровождается развитием сложных геомеханических процессов. При проходке выработок и ведении очистных работ породный массив испытывает деформации, вызванные как непосредственно выемкой породной/рудной массы, так и сейсмическими воздействиями от взрывных работ. Одним из основных факторов, определяющих устойчивость выработок на рудниках КФ АО «Апатит», является удароопасность горных пород, обусловленная сложными геомеханическими и геодинамическими особенностями месторождений.

На апатит-нефелиновых месторождениях Хибинского массива наблюдаются динамические проявления горного давления во всех формах - от внешних признаков, таких как шелушение, динамическое заколообразование, стреляние, до локальных и региональных горных ударов. Отмечается образование зон хрупкого разрушения в кровле горных выработок величиной от 0,5-0,7 м на верхних горизонтах отработки, до 1,5-2 м на нижних отметках. С глубиной протяженность участков с внешними признаками динамического проявления горного давления увеличивается.

Существующие на сегодняшний день подходы к определению нарушенных зон при хрупком разрушении пород приведены регламентирующей документацией рудников КФ АО «Апатит» в общем виде и слабо коррелируются с получаемыми натурными данными при хрупком разрушении горных пород.

В этой связи актуальность настоящей Методики состоит в представлении натурно и аналитически обоснованных подходов к определению зон хрупкого разрушения вокруг горных выработок в различных горнотехнических условиях месторождений КФ АО «Апатит» и прогнозу появления этих зон.

Использование настоящей Методики позволит более точно прогнозировать процессы, происходящие в высоконапряженных массивах, оценивать возможные размеры зон хрупкого

разрушения, а, значит, находить эффективные способы обеспечения устойчивости и безопасности горных выработок и других элементов систем разработки в таких условиях.

Стоит отметить, что в настоящей Методике под прогнозом развития зон хрупкого разрушения в первую очередь понимается определение параметров этой зоны, в первую очередь ее высоты. В общем же случае под прогнозом развития зон хрупкого разрушения также понимается суждение о возможном формировании этой зоны на контуре горной выработки в конкретных горнотехнических условиях, что на сегодняшний день на рудниках КФ АО «Апатит» хорошо апробировано и методика такого прогноза на основе классификации категорий состояния горных выработок приведена в «Указаниях...».

2. Область использования документа

Данная Методика в рекомендательном порядке может быть использована специалистами КФ АО «Апатит» и подрядных организаций, связанными с обеспечением безопасности проходки и эксплуатации горных выработок в высоконапряженных массивах Хибинских месторождений, а также специализированными организациями, занимающимися проблемами горных ударов на этих месторождениях. Наиболее эффективная область применения при повышенных расчетных (прогнозных) напряжениях (более 50 МПа для рудного массива и более 70 МПа для породного массива) в плоскости сечения рассматриваемых горных выработок.

Определение размеров зон хрупкого разрушения вне зависимости от вида динамических форм проявления горного давления позволяет на этапе проектирования горной выработки оценивать возможные разрушения контура горных выработок и принимать меры по обеспечению безопасности на данных участках, а именно:

- проектировать разгрузочные мероприятия и уточнять параметры разгрузочных щелей с учетом выполненного прогноза.
- проектировать крепление и выбирать типы крепей, в наибольшей степени подходящие рассматриваемым условиям, в том числе и с использованием динамических видов крепей;
- оценивать устойчивость элементов системы разработки, оконтуриваемые горными выработками (например, целиков между нарезными выработками), с учетом уменьшения их сечения при формировании зон хрупкого разрушения.

Отдельной областью применения представленных в Методике зависимостей является возможность, путем решения обратной задачи, восстанавливать существовавшее напряженное состояние на контуре горной выработки в момент разрушения, то есть в ретроспективе оценивать условия разрушения горных выработок. На основе этой оценки возможно выполнять верификацию имеющихся численных моделей месторождения и выделять однотипные условия

ведения работ для повышения эффективности экспертной оценки прогнозного состояния горных выработок.

3. Краткое практическое обоснование разработанной методики

Проведение горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» сопровождается развитием геомеханических и геодинамических процессов, которые могут привести к частичной или полной потере устойчивости горных выработок, что осложняет их проведение и эксплуатацию. Достоверный прогноз развития этих процессов позволяет повысить безопасность ведения проходческих работ, снизить затраты на ремонт и укрепление участков горных выработок. В методике рассматривается состояние высоконапряженных участков породного массива, где потеря устойчивости горных выработок определяется хрупким характером их разрушения, реализуемым как в виде квазистатического развития геомеханических процессов, так и в виде динамических проявлений.

Под хрупким разрушением понимается формирование трещин растяжения под воздействием сжимающих нагрузок. Хрупкое разрушение может формироваться как непосредственно в процессе ведения проходческих работ, так и развиваться во времени. В негидростатическом поле напряженного состояния хрупкое разрушение проявляется в виде Δ -образного локального участка разрушения пород. В окрестности данного участка породы обычно находятся в устойчивом состоянии. Таким образом, процесс хрупкого разрушения породы – это процесс, который включает формирование трещин отрыва, совпадающих с направлением развития максимальных тангенциальных напряжений. Трещины разбивают массив на отдельные породные плиты, которые в процессе деформирования породной массы накапливают внутри себя энергию деформирования. Процесс разрушение/потери устойчивости таких плит приводит к отслоению этих пород от массива и формирования локальных зон обрушения. Если процесс разрушения породных плит происходит постепенно, и разнесен по времени, то наблюдаются только квазистатические геомеханические процессы. Если же в процесс разрушения вовлекается значительный объем породных плит и этот процесс происходит за короткий период времени, то тогда наблюдается динамическое проявление геомеханических процессов и происходит горный удар. Дополнительную опасность представляют участки высоконапряженных пород в окрестности горной выработки, где процесс формирования трещин реализовался, но обрушение породной массы не произошло. Если на данном участке выполняются дополнительные проходческие работы (сооружение сопряжения) или он находится в зоне влияния очистных работ, уменьшение тангенциальных напряжений может привести к обрушению разрушенной породной массы уже на стадии эксплуатации горной выработки.

К породному массиву, склонным к хрупкому разрушению, согласно классификации, принятой на горных предприятиях КФ АО «Апатит», относятся массивы, сложенные породами прочностью в условиях одноосного сжатия более 100 МПа, монолитные или слаботрещиноватые. Показатель структурной нарушенности таких пород можно условно определить через геологический индекс прочности GSI, величина которого для рассматриваемых условий должна быть 70 или более.

По классификации КФ АО «Апатит» такие условия относятся к категориям состояния горных выработок «Г» и «Д», краткое описание развития геомеханических процессов, в которых сведено в таблице Д.1.

Таблица Д.1 - Принятая классификация категорий состояния горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит»

Категория состояния горной выработки	Описание возможных вариантов ожидаемых геомеханических/геодинамических процессов
Г	Интенсивное шелушение, динамическое заколообразование пород в течение 6–12 ч после отпала, эллипсоидная форма «стаканов» от взрывных скважин.
Д	Интенсивное динамическое заколообразование, не затухающее несколько суток стреляние, эллипсоидная форма «стаканов» от взрывных скважин, образование «дорожек» на стенках шпуров и скважин. Длительность процесса до 2-х и более суток.

Примеры хрупкого разрушения пород в окрестности горных выработок на рудниках КФ АО «Апатит» представлены на рисунке (рисунок Д.1). Как видно (см. рисунок Д.1, а, б), разрушение пород в окрестности одиночных выработок преимущественно происходит в своде выработки и формирует Λ-образный участок обрушения, при этом бока выработки полностью устойчивы. То есть наблюдается классическая картина разрушения пород в массивах, где преимущественно действуют горизонтальные напряжения. При рассмотрении картины разрушения пород на участках сопряжения горных выработок (см. рисунок Д.1, в, г), помимо формирования зоны хрупкого разрушения в своде выработки, наблюдается разрушение и в боках выработки. Разрушение пород проявляется в виде отслаивания пластин пород от основного породного массива с дальнейшим их обрушением (в своде выработки) или выдавливанием (преимущественно в боках выработки). Необходимо также отметить, что зоны хрупкого разрушения формируются не только непосредственно над сводом выработки (см. рисунок Д.1, а), но и смещены относительно него (см. рисунок Д.1, б), что позволяет говорить, что направление главных напряжений не всегда совпадает с направлением вертикальных и горизонтальных напряжений.



Рисунок Д.1 - Примеры зон хрупкого разрушения породного массива в окрестности горных выработок: *а, б* – одиночные выработки; *в, г* – сопряжение горных выработок

Таким образом, разрушение хрупкого породного массива в окрестности горной выработки проявляется в виде шелушения или отслаивания породы, в результате чего формируется Δ -образная зона, а само разрушение может происходить как в виде монотонного, практически квазистатического, разрушения, так и в виде динамического разрушения, локального горного удара. Размеры этих зон изменяются от нескольких сантиметров до метра, а иногда и более. На параметры зоны разрушения оказывают влияние начальное напряженное состояние, соотношение между главными максимальными и минимальными нормальными напряжениями и форма поперечного сечения горной выработки.

4. Порядок прогноза по Методике

Методика прогноза развития зон хрупкого разрушения в высоконапряженных породных массивах имеет следующий порядок:

1. Определение геометрических параметров горной выработки (сопряжения горных выработок).

2. Определение категории состояния горной выработки, с учетом возможного влияния очистных работ или численное определение соотношения величины максимального напряжения, действующего в плоскости сечения горной выработки, к прочности пород, слагающих массив.

3. Прогноз зоны хрупкого разрушения.

Положения 1 и 2 рассматриваются как исходные данные и являются основой для получения качественного прогноза развития зон хрупкого разрушения.

5. Указания по сбору исходных данных для проведения расчетов

В качестве исходных данных для прогноза зон хрупкого разрушения необходимы следующие данные:

- геометрические параметры горной выработки;
- категория состояния горной выработки, с учетом возможного влияния очистных работ, а для уточненного расчета значение соотношения напряжений на контуре выработки и прочности пород или руд, слагающих массив.

Определение геометрических параметров горной выработки необходимо выполнять согласно проектной документации, и при необходимости вносить изменения после установления фактических параметров горной выработки. Основные положения проектной документации, которые необходимы для выполнения прогноза зон хрупкого разрушения следующие: ширина горной выработки, а для сопряжений ширина наибольшей из сопрягающихся горных выработок и форма свода сопряжения (плоский свод или купольный).

Прогноз категории технического состояния выполняется согласно Указаниям и его удобно выполнять в следующей последовательности:

1. Определяется категория пород и руд по прочности согласно Указаниям.
2. Определяется категория пород и руд по интенсивности трещиноватости согласно Указаниям.
3. Определяется категория устойчивости пород и руд согласно Указаниям
4. Определяется напряженное состояние массива пород вокруг выработок.

При прогнозировании напряженное состояние массива вокруг выработок определяется либо путем численного моделирования, либо путем экспертной оценки на основе имеющихся исходных данных.

Особенности проведения численных расчетов и экспертной оценки приведены в Указаниях.

5. Определяется категория состояния горных выработок и соотношения напряжений в массиве к прочности пород и руд.

Понимание прочности горной породы и знание о напряженном состоянии на контуре выработки позволяют определить отношение σ_d/σ_c , из которого и назначают категоричность состояния выработки. Более того, это отношение можно применять при уточнении расчета размера зон массива, подверженных хрупкому разрушению. Категоричность состояния выработок апатит-нефелиновых руд и пород представлены в таблице Д.2.

Таблица Д.2 – Классификация категорий состояния горных выработок

Категории состояния выработок	Категория по устойчивости			Формы проявления горного давления
	в устойчивых породах (1)	в среднеустойчивых породах (2)	в слабоустойчивых породах (3)	
А	$\sigma_d \leq 0.3\sigma_c$	-	-	Выработка сохраняет устойчивость (разрушения и отслоения не наблюдаются)
Б	-	$\sigma_d \leq 0.3\sigma_c$ в породах 4, 5 категорий по трещиноватости		Вывалы по трещинам
В	$0.3\sigma_c < \sigma_d \leq 0.5\sigma_c$ в породах 1–4 категорий по трещиноватости		-	Постепенное хрупкое разрушение пород на контуре в виде шелушения, незначительного динамического заколообразования и плитчатого расслоения пород, отслоения по трещинам
Г	$0.5\sigma_c < \sigma_d \leq 0.7\sigma_c$ в породах 1-4 категорий трещиноватости		-	Интенсивное шелушение, динамическое заколообразование.
Д	$\sigma_d > 0.7\sigma_c$ в породах 1-3 категорий трещиноватости		-	Стреляние и интенсивное динамическое заколообразование, возможны микроудары и горные удары.

Примечание: категория состояния - «Д» определяется СППГУ по результатам экспертной оценки, а категория удароопасности «Опасно» по результатам локального прогноза методами инструментальных измерений.

5. Прогноз развития зон хрупкого разрушения

Возможность формирования зон хрупкого разрушения оценивается согласно полученной категории состояния горной выработки (таблица Д.2), где в столбце «Формы проявления горного давления» указаны категории, в которых может проявляться горное давление в динамических формах (категории В, Г и Д).

Для расчета размера зоны хрупкого разрушения пород на участке горных выработок, в том числе находящихся в зоне влияния очистных работ, необходимо использовать формулу в следующем виде (Д.1):

$$h_{xp} = k_3 k_d b s, \quad (Д.1)$$

где b – ширина одиночной горной выработки (для сопряжений принимать размер наибольшей из сопрягающихся выработок);

k_d – относительный показатель напряженного состояния, определяемый двумя способами:

1. Упрощенный способ – по категории состояния горной выработки, соответственно $k_d = 0,05$ для категорий В, $k_d = 0,2$ для категорий Г, $k_d = 0,35$ для категории состояния выработки Д; $k_d > 0,35$ для категории состояния горной выработки «опасно».

2. Уточненный способ – по соотношению величины напряжений на контуре выработки к прочности вмещающего выработку массива, а именно по формуле (Д.2):

$$k_d = 0,6 \frac{\sigma_d}{\sigma_c} - 0,24, \quad (Д.2)$$

где s – коэффициент формы горной выработки, для одиночной выработки $s = 1$, для сопряжений горных выработок с плоским сводом $s = 1,8$, для сопряжений горных выработок с купольным (арочным) сводом $s = 1,2$;

k_3 – коэффициент запаса 1,15;

σ_d – величина максимального напряжения, действующего в плоскости сечения горной выработки, МПа;

σ_c – предел прочности при одноосном сжатии образца ненарушенной горной породы, МПа.

При определении напряжений σ_d (выражение (Д.4)), действующих в плоскости сечения горной выработки, необходимо пользоваться одним из перечисленных вариантов:

1.1. При известных главных максимальных σ_1 и средних σ_2 напряжениях на рассматриваемой отметке, необходимо пользоваться формулой преобразования главных напряжений (Д.3):

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\theta \text{ (МПа)}, \quad (Д.3)$$

где σ_{max} – максимальное естественное напряжение в плоскости сечения горной выработки; σ_1 – максимальное напряжение, действующее на рассматриваемом горизонте;

σ_2 – минимальное напряжение, действующее на рассматриваемом горизонте; θ – угол между азимутами простирания σ_1 и плоскостью сечения горной выработки.

$$\sigma_d = 2,35 \sigma_{max} \text{ (МПа)}, \quad (Д.4)$$

где 2,35 – коэффициент концентрации напряжений на контуре для применяемой на рудниках КФ АО «Апатит» формы горных выработок.

1.2. При имитации проходки горных выработок в программном комплексе Sigma GT, необходимо использовать для определения σ_d данные, получаемые на численных моделях.

Рекомендации по выбору уточненного и упрощенного способов расчета следующие:

1. Уточненный способ определения коэффициента k_d показывает наименьшую эффективность в рудном массиве и в зоне влияния очистных работ, это связано с завышенными значениями напряжений, получаемыми по численной модели. В этой связи для этих условий эффективнее использовать упрощенный метод.

2. Вне зоны влияния очистных работ наибольшую эффективность показывает уточненный способ, так как упрощенный способ определения коэффициента k_d может приводить к значительному завышению прогнозных размеров зон хрупкого разрушения на участках выработок с категорией состояния Г, но напряжениями, незначительно превышающими 0,5 от прочности пород.

6. Общие рекомендации по совершенствованию точности прогноза

1. Прогнозный размер зон хрупкого разрушения на контуре горной выработки зависит от точности определения исходных данных, поэтому необходимо постоянное уточнение численной модели, в том числе путем изучения данных визуальных наблюдений и решения обратной задачи по натурно-определенным значениям размеров зон хрупкого разрушения в горных выработках.

2. Результаты численного моделирования показали достаточную точность в вопросах определения участков формирования зон хрупкого разрушения в поперечном сечении горной выработки, что необходимо учитывать при планировании и проектировании мероприятий по разгрузке массива вокруг выработок.