

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

На правах рукописи

Вильнер Мария Александровна



ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ НАГРУЗОК НА КРЕПЬ
СОПРЯЖЕНИЙ ВЫРАБОТОК В СТРУКТУРНО-НАРУШЕННЫХ
МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД

Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Протосеня А.Г.

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Характеристика объекта исследований.....	11
1.2 Особенности развития геомеханических процессов в структурно-нарушенных средах.....	14
1.2.1 Количественное и качественное описание нарушений	14
1.2.2. Классификации трещиноватых горных массивов	23
1.2.3. Развитие геомеханических процессов в окрестности породных обнажений	25
1.3 Анализ методов прогноза геомеханических процессов в структурно нарушенных массивах горных пород.....	28
1.3.1. Методы математической идеализации структурно нарушенных массивов	28
1.3.2. Модели деформирования и прочности нарушенного массива горных пород.....	33
1.3.3 Численные методы прогноза геомеханических процессов в массивах горных пород.....	38
1.4 Формирование напряженно-деформированного состояния массива на участках сопряжений	42
1.5 Анализ методов оценки устойчивости породных обнажений на участках сопряжений	45
1.6 Анализ методов расчета нагрузки на крепь сопряжений горных выработок.....	48
1.7 Выводы по Главе 1	51
ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА НА УЧАСТКАХ СОПРЯЖЕНИЙ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК	54
2.1 Общие положения	54
2.2 Натурные исследования механизма формирования горного давления на участках сопряжений горных выработок.....	55
2.2.1 Методика исследований.....	55
2.2.2 Результаты определения физико-механических свойств массива.....	56
2.2.3 Результаты определения параметров структурной нарушенности массива.....	59
2.2.4 Результаты исследований форм потери устойчивости в выработках	64
2.3 Механизм потери устойчивости приконтурного массива на участках сопряжений	69
2.4 Формирование нагрузок на крепь сопряжений горных выработок	71

2.5	Разработка методики построения численных моделей прогноза напряженно-деформированного состояния системы «крепь – массив» на участках сопряжений горных выработок	72
2.6	Выводы по Главе 2	76
ГЛАВА 3 ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ СОПРЯЖЕНИЙ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В СТРУКТУРНО-НАРУШЕННЫХ МАССИВАХ.....		
3.1	Общие положения	77
3.2	Обоснование параметров численных моделей для прогноза развития геомеханических процессов в структурно-нарушенных массивах	78
3.2.1	Физико-механические свойства и структурная нарушенность массива	78
3.2.2	Постановка задачи	81
3.2.3	Верификация модели.....	85
3.3	Прогноз напряженно-деформированного состояния массива в рамках теории сплошной и дискретной сред	87
3.4	Исследование факторов, оказывающих влияние на формирование напряженно-деформированного состояния приконтурного массива в окрестности горной выработки	90
3.4.1	Описание факторов	90
3.4.2	Напряженное состояние.....	92
3.4.3	Геометрические параметры выработок и пространственная конфигурация сопряжений	96
3.4.4	Характер трещиноватости	100
3.4.5	Контактные свойства трещин.....	103
3.6	Выводы по Главе 3	106
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА НАГРУЗОК НА КРЕПЬ НА УЧАСТКАХ СОПРЯЖЕНИЙ.....		
4.1	Общие положения	109
4.2	Прогноз развития напряженно-деформированного состояния приконтурного массива на участках сопряжений горных выработок для условий апатит-нефелиновых месторождений	109
4.3	Методика определения параметров зоны возможного обрушения на сопряжениях горных выработок.....	112
4.4	Рекомендации по обеспечению устойчивости участков сопряжений в структурно нарушенных массивах.....	117
4.5	Выводы по Главе 4	121

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	124

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

При разработке рудных месторождений проектируется обширная сеть горных выработок, объем сопряжений которых достигает 10 %. Строительство горных выработок влечет за собой изменение напряженно-деформированного состояния вмещающего массива. На сопряжениях горных выработок прогноз напряженно-деформированного состояния приконтурного массива осложняется их пространственной геометрией, взаимным влиянием пересекающихся выработок, а также последовательностью раскрытия сопряжения. Значительное влияние на закономерности перераспределения напряжений в приконтурном массиве оказывают механические характеристики горных пород, параметры структурной нарушенности и характер распределения начального поля напряжений. Согласно исследованиям, до 40 % от общего числа обрушений в горных выработках происходит при рассечке сопряжений или их перекреплении.

Определение нагрузок на крепь сопряжений в соответствии с существующей нормативной базой выполняется по методике, принятой для одиночных выработок, где геометрические параметры сопряжения учитываются через эквивалентную величину пролета.

Тенденция к интенсификации производственных процессов, увеличение глубин разработки и связанные с этим изменение напряженного состояния массива и ухудшение горно-геологических условий приводят к необходимости пересмотра и дополнения существующих подходов к оценке развития геомеханических процессов в приконтурном массиве на участках сопряжений горных выработок. Это предопределяет актуальность диссертационной работы, основной задачей которой является повышение достоверности прогноза напряженно-деформированного состояния приконтурного массива сопряжений горных выработок.

Для более точного прогноза напряженно-деформированного состояния приконтурного массива сопряжений необходимо учитывать геометрические параметры, параметры структурной нарушенности приконтурного массива и начальное поле напряженного состояния.

Степень разработанности темы исследования

Исследованием процесса деформирования и разрушения пород вокруг горных выработок, в том числе в структурно-нарушенных горных массивах, занимались многие ученые, среди которых следует упомянуть К.А. Ардашева, И.В. Баклашова,

Н.С. Булычева, И.Е. Долгого, Б.А. Картозию, А.А. Козырева, Г.Н. Кузнецова, А.Г. Протосеню, К.В. Руппенейта, О.В. Тимофеева, В.Л. Трушко, Н.Н. Фотиеву, Г.Л. Фисенко, N.R. Barton, M. Cai, C. Edelbro, J. Engel, X.T. Feng, A. Khani, R. Shan и других.

Эмпирические закономерности, предложенные некоторыми из вышеназванных исследователей, позволяют произвести точную оценку для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий, но не решить задачу в общем виде. Аналитические подходы позволяют применить решение для любых горно-геологических условий, однако они сложны при наличии и необходимости учета большого количества структурных нарушений в массиве. Учесть параметры блочных массивов и физико-механические свойства пород в окрестности выработок позволяют методы численного моделирования. Подходы к оценке напряженно-деформированного состояния приконтурного массива в рамках численного моделирования рассмотрены в работах Б.З. Амузина, А.П. Господарикова, О.К. Зенкевича, М.А. Карасева, А.Б. Фадеева, Е.Т. Brown, Y.H. Hatzor, E. Hoek, R. McLeay, M. Jones и других.

В большинстве случаев решения получены в плоской постановке, что не очень хорошо соотносится с пространственным характером формирования напряженно-деформированного состояния приконтурного массива сопряжений горных выработок.

Основные принципы обеспечения устойчивости сопряжений горных выработок, учитывающие их пространственную геометрию, разработаны в трудах М.С. Данилкина, Д.Н. Петрова, Ю.Н. Огородникова, П.С. Сыркина, А.П. Широкова, H. Gercek, F.Y. Hsiao, C.W. Yu и других.

Тем не менее, к настоящему времени не разработаны комплексные подходы, позволяющие одновременно учесть как геометрические, так и механические параметры, определяющие устойчивость приконтурного массива, а разработка таких подходов является перспективной задачей.

Работа соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации по п. 6 «Рациональное природопользование» (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899). Ее направленность отвечает стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (Распоряжение Правительства от 22 декабря 2018 г. № 2914-р) в части технологий поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 25.00.20 «Геомеханика, разрушение пород взрывом, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика» по п.п. 1, 4, 5, 13.

Цель работы заключается в повышении достоверности прогноза нагрузок на крепь сопряжений горных выработок при их проектировании, строительстве и эксплуатации в структурно-нарушенных горных массивах при разработке апатит-нефелиновых месторождений.

Идея работы – повышение достоверности прогноза развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок и расчет нагрузок на крепь обеспечивается за счет решения задачи в пространственной постановке, а также задания контактных условий взаимодействия между структурными элементами массива; при этом определение параметров зоны возможного обрушения выполняется численными методами в рамках механики сплошной и дискретной сред для различных типов сопряжений горных выработок.

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

1. Анализ типов структурной нарушенности горных пород и выделение основных видов нарушений на апатит-нефелиновых месторождениях на основании обработки данных геологического картирования.

2. Разработка методики численного моделирования и алгоритма построения численных моделей для прогноза развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок с различными геометрическими параметрами.

3. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности сопряжений горных выработок методами механики сплошной и дискретной сред.

4. Исследование влияния горно-геологических, геомеханических и горнотехнических факторов на устойчивость сопряжений горных выработок и формирование нагрузок на крепь.

5. Разработка методики оценки устойчивости горных выработок и прогноза нагрузок на крепь сопряжений в структурно-нарушенных массивах горных пород.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является выявление закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния структурно-нарушенного массива горных пород для условий месторождений апатит-нефелиновых руд и повышение достоверности прогноза нагрузок на крепь сопряжений горных выработок, расположенных в таких условиях.

Научная новизна работы:

1. Предложен новый подход к оценке устойчивости сопряжений горных выработок, основанный на представлении породного массива в виде дискретной среды,

где процесс деформирования и обрушения пород прогнозируется в рамках единой расчетной модели.

2. Выявлены закономерности распределения напряжений в окрестности сопряжений горных выработок и формирования нагрузок на крепь с учетом фактической геометрии сопряжения.

3. Получены новые закономерности, определяющие связь между напряженным состоянием массива горных пород, структурной нарушенностью и интенсивностью развития геомеханических процессов при строительстве сопряжений горных выработок.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан алгоритм обоснования параметров численных моделей для прогноза геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок для условий апатит-нефелиновых месторождений.

2. Разработана методика прогноза нагрузок на крепь сопряжений в структурно-нарушенных массивах горных пород.

3. Разработаны рекомендации по обеспечению устойчивости приконтурного массива сопряжений горных выработок.

4. Результаты диссертационной работы рекомендованы для дополнения принятых на рудниках АО «Апатит» нормативных методик расчета параметров крепей.

5. Результаты диссертационной работы в соответствии с актом от 15.10.2021 г. внедрены в учебный процесс Горного университета при обучении студентов специальности 21.05.04 «Горное дело», специализации «Шахтное и подземное строительство» в рамках дисциплин «Механика сплошной среды», «Моделирование физических процессов в горном деле», «Строительство подземных сооружений».

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось с применением комплекса методов, включающего натурные исследования формирования нагрузок на крепь сопряжений, визуальное обследование состояния горных выработок, математическое описание механического поведения породного массива, численное моделирование геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Прогноз напряженно-деформированного состояния приконтурного массива горных выработок при блочном строении массива необходимо выполнять на основании представления массива дискретной средой и задания нелинейной прочности по контакту блоков.

2. Форма и размер зон возможного обрушения пород на участках сопряжений горных выработок, расположенных в структурно-нарушенных массивах горных пород, определяется пространственной геометрией сопряжения, отношением размера породного блока к фактическому пролету сопряжения и характером начального поля напряженного состояния.

3. Расчет параметров крепей сопряжений горных выработок должен основываться на результатах прогноза развития геомеханических процессов в массиве горных пород и учитывать его структурную нарушенность, напряженное состояние, тип и размер сопряжения, выраженные через интегральные показатели.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается сопоставлением полученных зависимостей с данными натурных наблюдений на участках сопряжений горных выработок и с результатами работ других исследователей, а также использованием современных методов численного моделирования в рамках механики дискретной среды.

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

- XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов, Санкт-Петербургский горный университет, СПб, 2019 г.;
- Конференция молодых ученых «14 Freiberg-St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler», г. Фрайберг, Германия, 2019 г.;
- III Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса», Санкт-Петербургский горный университет, СПб, 2020 г.;
- XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов, Санкт-Петербургский горный университет, СПб, 2020 г.;
- X Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Эффективное освоение месторождений полезных ископаемых», Санкт-Петербургский горный университет, СПб, 2020 г.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования и нормативных методик; обосновании теоретических основ прогноза устойчивости массива на сопряжениях горных выработок; подборе параметров для численных моделей и проведении численных экспериментов, выполнении обработки и анализа результатов моделирования; получении новых закономерностей распределения

напряжений в приконтурном блочном массиве сопряжений горных выработок; дополнении существующей методики определения размера зоны возможного обрушения на сопряжениях горных выработок.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 3 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. Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 147 наименований. Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков и 21 таблицу.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Характеристика объекта исследований

Диссертационная работа посвящена исследованию изменения напряженно-деформированного состояния массива в окрестности сопряжений горизонтальных или субгоризонтальных горных выработок, расположенных в условиях, характерных для рудников Хибинского массива нефелиновых сиенитов и ийолит-уртитов. На территории Российской Федерации находится большое количество горнодобывающих предприятий, занимающихся добычей рудных полезных ископаемых. Как сами руды, так и вмещающие породы отличаются по своим физико-механическим свойствам и нарушенности. Наименьшая степень структурной нарушенности массива наблюдается на месторождениях кварцитов, медистых руд, наибольшая – на месторождениях апатит-нефелиновых руд [25].

На рудниках Хибинского массива чаще всего применяются системы разработки с поэтажным обрушением, предусматривающие строительство большого количества подготовительных выработок [3]. План типового буродоставочного и откаточного горизонтов представлен на рисунке 1.1

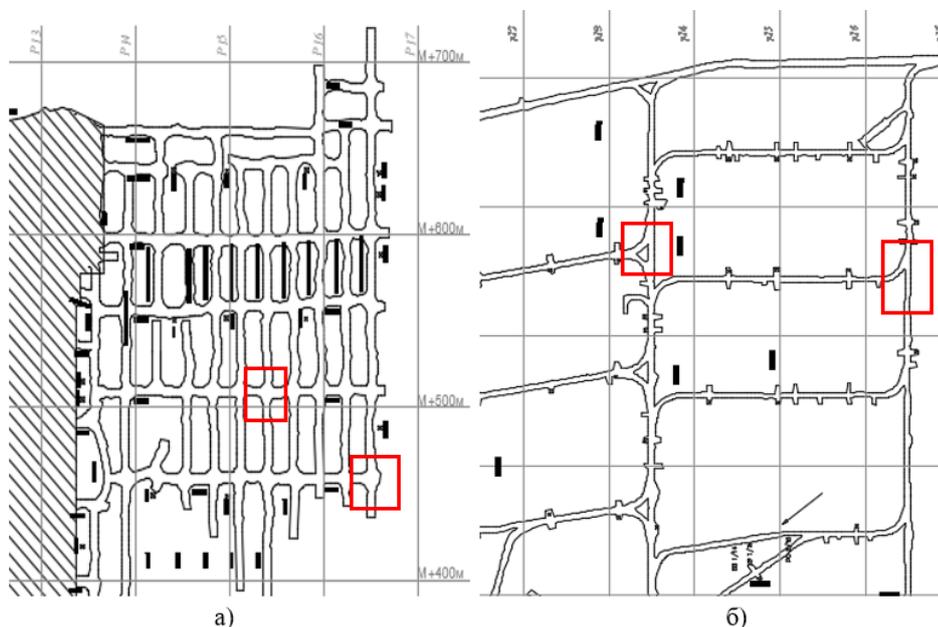


Рисунок 1.1 – Типы сопряжений на горизонтах: а – буродоставочный горизонт;
б – откаточный горизонт

Анализ комплексов выработок, проводимых в пределах пласта полезного ископаемого – подготовительных, а также за пределами пласта для его оконтуривания – капитальных, выявил, что наиболее распространенными типами сопряжений горных

выработок являются пересечения под прямым углом и односторонние ответвления (рисунок 1.2).

Основными геометрическими параметрами, характеризующими тип сопряжения, являются площадь сопряжения S_c , угол между сопрягающимися выработками α и количество сопрягающихся выработок N [16].

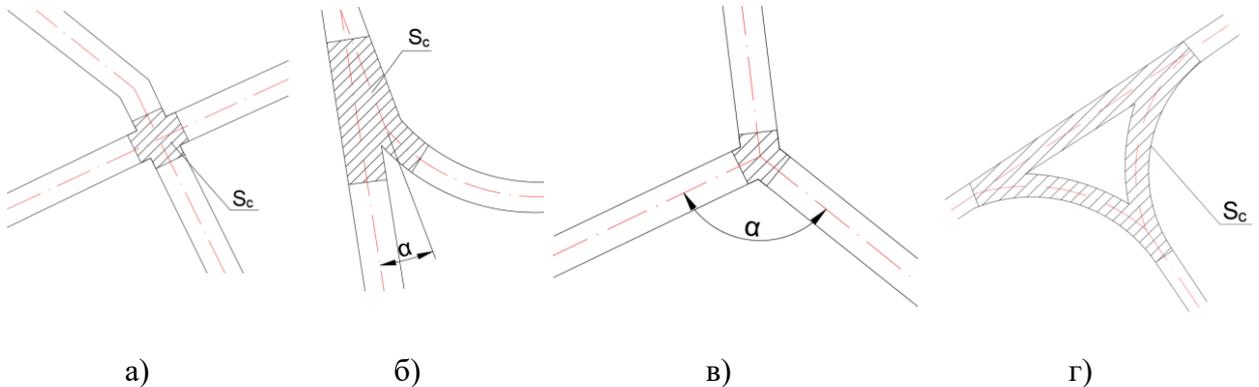


Рисунок 1.2 – Основные типы сопряжений горизонтальных и наклонных выработок при подэтажной системе разработки с обрушением: а – пересечение двух выработок под прямым углом; б – соединение двух выработок в одну под углом; в – разветвление по кривым; г – треугольный узел: S_c – площадь сопряжения, α – угол между сопрягающимися выработками.

Площадью сопряжения считается пространство непосредственно на пересечении выработок, а также участки выработок некоторой длины, прилегающие к пересечению. Площадь сопряжения увеличивается за счет уменьшения угла пересечения выработок, что обуславливает возникновение зон отжима угловых целиков [44]. Чем больше радиус закругления или чем меньше угол примыкания выработок, тем больше площадь сопряжения. Таким образом, целесообразно при сопряжении выработок увеличивать угол примыкания [16], если это допустимо технологически.

В зависимости от формы поперечного сечения сопрягающихся выработок различна и конфигурация самого сопряжения, в частности, форма кровли. Существующие методики расчета параметров и выбора формы сопряжения [36] рекомендуют выбирать форму кровли сопряжения с учетом интенсивности проявлений горного давления, материала и типа крепи. Так, в слоистых породах с углом залегания пород до 30° и при анкерном креплении допускается плоская кровля сопряжения, совпадающая с направлением напластования пород [36]. На сопряжениях выработок с большим пролетом рекомендуется выбирать сводчатую форму, а в зоне влияния очистных работ с интенсивным проявлением горного давления – комбинированную форму и крепи [36].

Технологические параметры и система разработки принимаются в качестве неизменных исходных данных, которые описывают размеры выработок и наличие дополнительного влияния очистных работ.

Выбор формы кровли сопряжения горных выработок регламентируется только общими рекомендациями, которые не охватывают возможных горно-геологических условий. В частности, помимо однородного и слоистого строения вмещающего массива, может наблюдаться интенсивная кососекущая трещиноватость, которая, по сути, превращает массив в блочный.

Отнесение массива горной породы к той или иной категории трещиноватости осуществляется на основании классификации, приведенной в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Категории трещиноватости массива [62]

Категория трещиноватости	Степень трещиноватости (блочности) массивов	Среднее расстояние между естественными трещинами всех систем, м	Модуль трещиноватости, м ⁻¹	Максимальный размер отдельности (блока) в массиве, м
I	Монолитные (исключительно крупноблочные)	>1,5	<0,65	>3,5
II	Слаботрещиноватые (весьма крупноблочные)	1,0 - 1,5	1 - 0,65	1,9 - 3,5
III	Среднетрещиноватые (крупноблочные)	0,5 - 1,0	1 - 2	1,2 - 1,9
IV	Сильнотрещиноватые (среднеблочные)	0,1 - 0,5	2 - 10	0,6 - 1,2
V	Раздробленные и перемятые (мелкоблочные)	<0,1	>10	0,6

На устойчивость приконтурного массива сопряжений горных выработок в наибольшей степени оказывают влияние I-III категории, когда средний размер блока соизмерим с размером пролета выработки. Такие массивы характеризуются средней и слабой устойчивостью. Взаимосвязь трещиноватости и устойчивости массива при обнажении приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристика состояний устойчивости

Категория устойчивости	Оценка состояния устойчивости	Категория по трещиноватости	Категории, согласно классификации Апатит [62]
1	Устойчивое	I-III	Д
		I-IV	А, В, Г
2	Среднеустойчивое	I-III	Д
		I-V	Б, В, Г
3	Слабоустойчивое	IV-V	Б

Категории согласно Указаниям [62], действующим на рудниках апатит-нефелиновых месторождений, определяют удароопасность и, следовательно, возможность хрупкого разрушения горных пород на контуре выработок. Вывалы по естественным трещинам как форма потери устойчивости характерны для категорий Б и В, что соответствует среднетрещиноватым, сильнотрещиноватым и раздробленным породам.

1.2 Особенности развития геомеханических процессов в структурно-нарушенных средах

1.2.1 Количественное и качественное описание нарушений

Трещиноватый горный массив определяется как участок с естественными геологическими границами, представляющий собой дискретную, неоднородную, анизотропную среду, обладающую определённой структурой [48].

Любую структурную или геологическую особенность, влияющую на однородность массива, можно рассматривать как нарушение. При этом исследователи [8,49] выделяют пять основных классов нарушений: дефекты кристаллической решетки, микротрещины, макротрещины, разрывы и крупные тектонические разрывы. Разрывы и тектонические разрывы, имеющие протяженность несколько десятков метров и более, оказывают большее влияние на напряженное состояние массива, чем на его физико-механические свойства. Геологическим институтом КНЦ РАН установлены закономерности формирования напряженного состояния участков массива при наличии разрывных нарушений [34,18,52]. При этом их наличие не влияет на характер формирования напряженно-деформированного состояния при проходке отдельной выработки.

Непосредственно влияет на устойчивость приконтурной зоны выработки наличие макронарушений, которые характеризуют прочность, деформируемость и проницаемость горных пород. На рисунке 1.3 показан участок массива размером 100 м с зонами различной степени нарушения.

В пределах месторождений апатит-нефелиновых руд выделяются зоны шпреуштейнизации, повышенной нарушения, дайки. Данные участки относятся к категории раздробленных пород, и пересечение их выработкой может привести как к обрушению пород (вывалу), так и к динамическому проявлению горного давления. Соответственно, сопряжения горных выработок не должны располагаться на участках пересечения с дайкой или зоной шпреуштейнизации.

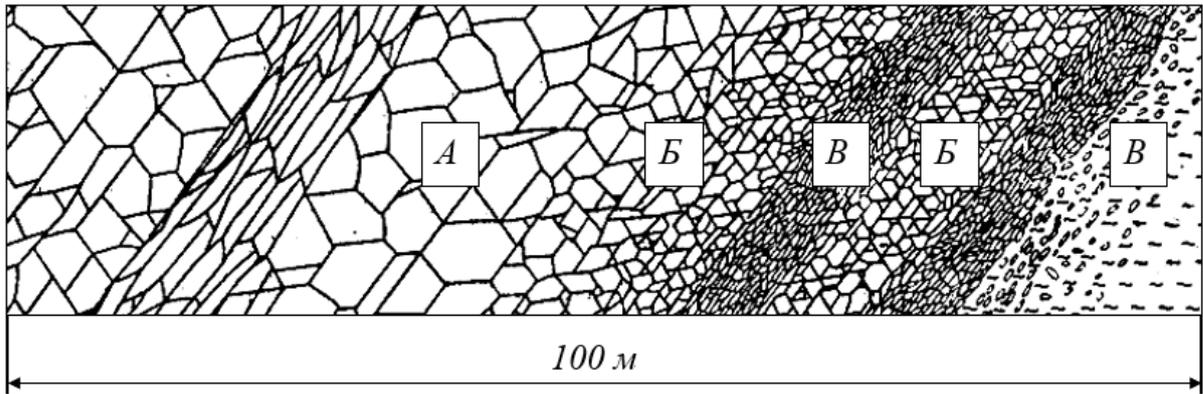


Рисунок 1.3 – Зарисовка участка массива с различной степенью трещиноватости: А – зона весьма крупноблочных и крупноблочных пород; Б – среднеблочные и мелкоблочные породы; В – раздробленные и перемятые породы

Интерес для исследования представляют сопряжения, располагаемые в массивах пород III и IV категорий трещиноватости (средне- и сильнотрещиноватые).

Описание структурно нарушенного массива должно включать в себя качественную характеристику нарушений, характер их распределения, а также оценку контактных свойств нарушений. Всего в эмпирических классификациях используются до 20 геологических параметров: с одной стороны, это характеристики ненарушенной горной породы (прочность, деформационные свойства), с другой – характеристики массива (трещиноватость, обводненность).

Геометрические параметры определяют пространственную ориентацию трещин. Считается [128,142], что угол падения системы трещин влияет на максимальную прочность массива, как показано на рисунке 1.4. Зависимость связана с углом внутреннего трения на контакте трещины φ ; угол падения не влияет на максимальную прочность при величине, меньшей величины угла внутреннего трения на контакте трещины. Общая прочность трещиноватого массива может снизиться до 2 раз.

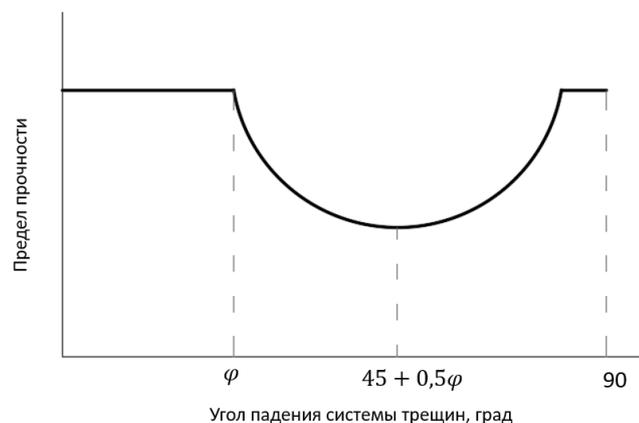


Рисунок 1.4 – Зависимость предельной прочности от ориентации трещины

[128,142]

Длина трещин характеризует тип нарушенности. Данный параметр важен для определения устойчивости приконтурного массива, так как вывалообразование скорее произойдет в блочном массиве, блоки в котором образуются за счет взаимного пересечения протяженных поверхностей ослабления. По общему характеру исследователи выделяют три типа сетей макротрещин [49]:

1. Системные сети, образованные n системами различно ориентированных трещин (рисунок 1.5, а).

2. Полигональные сети, все трещины параллельны одной линии и в перпендикулярной к этой линии плоскости образуют характерные замкнутые многоугольники или блоки (рисунок 1.5, б).

3. Хаотические сети, образованные большим количеством систем трещин ($n > 10$) или бессистемными трещинами (рисунок 1.5, в).

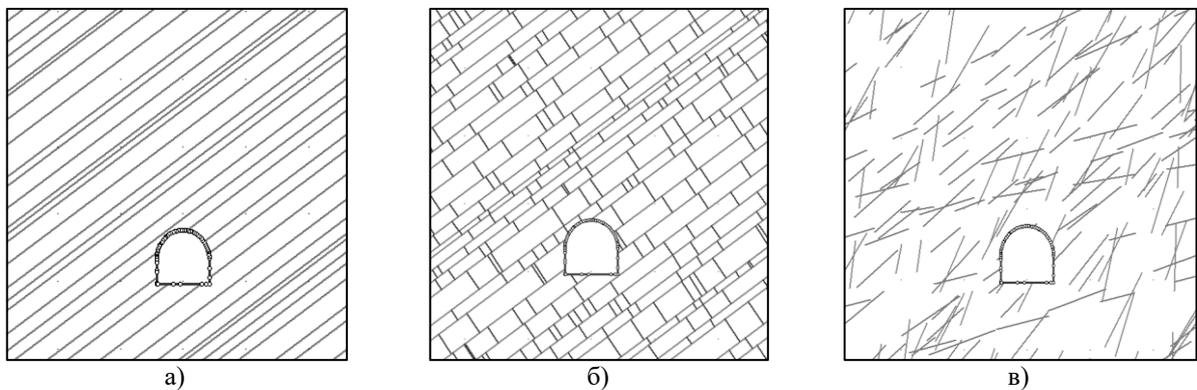


Рисунок 1.5 – Типы макротрещиноватости: системная (а), полигональная (б) и хаотическая (в)

Тип макротрещиноватости предопределяет параметры пересечения нескольких систем трещин при их наличии. Симметричное или ассиметричное пересечение двух трещин влияет на геометрию блока и его механическую реакцию на нагрузку. Характер распределения напряжений при типах трещиноватости (а) и (в) значительно отличается от распределения напряжений в ненарушенном горном массиве, однако характер деформирования породного контура выработки отличается незначительно. Это показано на рисунке 1.6 – типы трещиноватости (а) и (в) можно с определенной степенью допущений представить в виде сплошной среды, тогда контур незакрепленной выработки будет деформироваться без разрывов сплошности. При наличии блочной структуры массива блоки, ограниченные с нескольких сторон нарушениями сплошности или трещинами, могут обрушиться в выработку. При этом общий характер деформирования в обоих случаях (рисунок 1.6 а, б) схож.

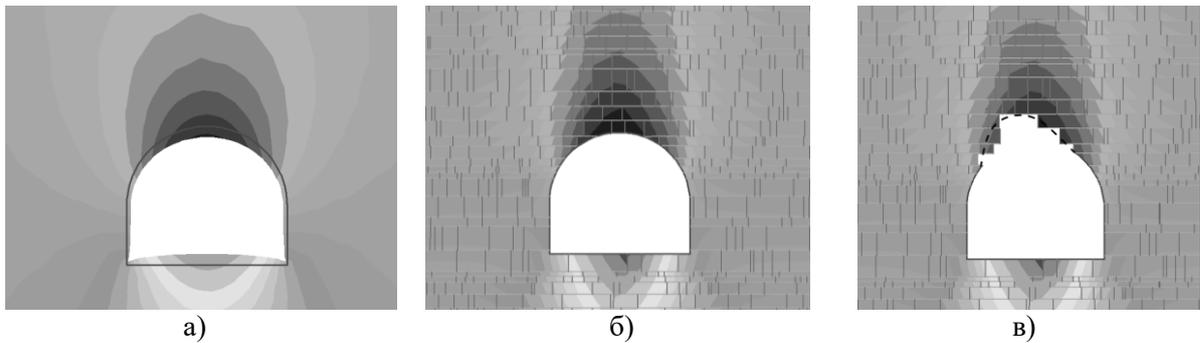


Рисунок 1.6 – Эпюры смещений для выработки, расположенной в сплошном (а) и нарушенном (б, в) массивах

В блочном массиве характер деформирования необходимо изучать тщательно с учетом всех влияющих факторов. В результате пересечения трещин участок массива размером H оказывается расчлененным на множество структурных блоков со средним размером h , что определяет интенсивность трещиноватости (H/h) [8]. Средний размер блока и его отношение к пролету выработки напрямую влияет на размер сформировавшейся нарушенной зоны.

Влияние характеристик трещиноватости и анизотропии горных пород на степень проявления горного давления и вероятность потери устойчивости контура горной выработки описано в работах И.В. Баклашова, Б.А. Картозии [12], А.Н. Ставрогина и А.Г. Протосени [57, 48], а также многими зарубежными авторами [141,112,118,123,136,139,].

Изучение геометрических параметров трещин позволяет уточнить критерии безопасности разработки или строительства отдельных выработок [19]. Для комплексного учета геометрических и механических параметров в конкретной области, например, в приконтурной зоне горной выработки, может использоваться показатель структурной нарушенности породного массива – коэффициент структурного ослабления [137]. Коэффициент структурного ослабления описывает отличие прочностных характеристик массива от характеристик образца горной породы и общем виде представляет собой выражение (1.1):

$$k_c = \frac{R_m}{R_c}, \quad (1.1)$$

где R_m – предел прочности на одноосное сжатие в массиве;

R_c – средний предел прочности образцов горной породы.

В большинстве методик именно коэффициент структурной нарушенности используется для прогноза снижения прочностных характеристик массива и определения возможной области предельного состояния пород в окрестности выработки [22,23,68].

Поэтому необходимо обосновывать величину коэффициента структурного ослабления с учетом конкретных горно-геологических условий.

Фундаментальным направлением в определении коэффициента структурной нарушенности является статистический анализ результатов испытаний горных пород, а также их физических моделей [17,42]. В таком случае обоснование коэффициентов затруднительно для условий, отличающихся от статистически обработанных.

Перспективным подходом является установление связи между прочностью породы в образце и в массиве через скорость распространения упругих волн, что позволяет оценить природную неоднородность массива на основании одного показателя. Однако, исследования ограничиваются сложностью математического описания поведения упругой волны в неоднородном теле и интерпретации результатов.

Существуют и другие теории, однако, в настоящее время наиболее часто используются значения коэффициентов структурного ослабления пород, основанные на обработке экспериментальных данных [36,41], которые варьируются в широких пределах и требуют тщательного подбора в зависимости от условий в массиве – известных параметров систем трещин и их контактных свойствах.

Полученные значения отражены в нормативных документах, где приведены значения коэффициентов структурного ослабления, рекомендуемые для определения предела прочности горных пород в массиве на одноосное сжатие (таблица 1.3) [56,12].

Таблица 1.3 – Таблица соответствия степени нарушенности массива его прочности

Степень трещиноватости массива	Средний размер отдельностей, м	Характеристика прочности массива	Коэффициент структурного ослабления k_c
Практически монолитный	1,5	Весьма прочный	0,9
Малотрещиноватый	1,0-1,5	Прочный	0,8
Среднетрещиноватый	0,5-1,0	Средней прочности	0,6
Сильнотрещиноватый	0,1-0,5	Слабый	0,4
Чрезвычайно трещиноватый	0,1	Весьма слабый	0,2

На основании обработки экспериментальных данных определены также усредненные значения коэффициентов структурного ослабления по данным месторождений (ВНИМИ), представленные в таблице 1.4. Коэффициенты структурного ослабления для отдельных месторождений представлены в работах ученых Сибирского отделения РАН и КНЦ РАН [39,51].

Таблица 1.4 – Ориентировочные значения коэффициента структурного ослабления k_c в зависимости от степени нарушенности массива (от размеров структурных блоков)

Степень трещиноватости пород	Слабо-трещиноватые	Средне-трещиноватые	Сильно-трещиноватые	Раздробленные
Средний размер структурного блока $l_{бл}, м$	> 1	0.3 - 1	0.05 - 0.3	0.01 - 0.05
Коэффициент структурного ослабления k_c	> 0.45	0.3 - 0.45	0.15 - 0.3	< 0.15

На сопряжениях горных выработок, пролеты которых могут превышать 10 м, даже в слаботрещиноватых породах со средним размером структурного блока 1 м может произойти обрушение, и данные показатели не отражают возможность его возникновения.

Предложенная О.В. Тимофеевым [59] методика оценки структурной нарушенности породного массива через коэффициент структурного ослабления k_c помимо трещиноватости учитывает также относительные размеры подземного сооружения. При этом коэффициент k_c определяется по данным количественного анализа трещиноватости отдельно для кровли и боков выработки. Критерий учитывает также упрочнение пород в окрестности выработки, что происходит вследствие закрытия пор и трещин (1.2):

$$P_{д.в} = \frac{\sigma_n K_1 K_2}{R K_c \xi_c K_y} \cdot \frac{K_3}{\xi_d}, \quad (1.2)$$

где σ_n – напряжения в нетронутом массиве по заданному направлению, МПа;

K_1 – коэффициент концентрации напряжений вследствие проведения выработки;

K_2 – коэффициент изменения напряжений в результате влияния других выработок ($K_2 \geq 1$);

R – сопротивление пород в образце одноосному сжатию, МПа;

K_c – коэффициент структурного ослабления массива за счет трещиноватости и слоистости ($K_c \leq 1$);

K_3 – коэффициент дополнительной концентрации напряжений;

K_y – коэффициент упрочнения;

ξ_d – коэффициент усталостной прочности пород.

Для условий Североуральского бокситового бассейна была разработана методика расчета коэффициента структурного ослабления без эмпирических коэффициентов, что позволяет использовать ее в более широком диапазоне горно-геологических условий (1.3):

$$k_{co} = \frac{\sigma_1(R_3 tg\varphi_3 + \tau_{cm})}{\tau_\alpha \left[R_0 + \sigma_2 tg^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right]} \quad (1.3)$$

где τ_α – максимальное касательное напряжение по направлению i -й системы трещин, МПа;

α – угол между направлением σ_1 и нормалью к плоскости трещины;

σ_1 и σ_2 – квазиглавные напряжения в плоскости расчетного сечения;

R_0 – предел прочности при одноосном сжатии в образце, МПа;

τ_{cm} – сцепление по трещине, МПа; φ – угол внутреннего трения пород;

R_3 – предел прочности при одноосном сжатии заполнителя трещин, МПа;

φ_3 – угол внутреннего трения заполнителя трещин.

Учет соотношения размеров объекта и средних размеров структурных блоков позволяет и формула Г.Л. Фисенко [64], разработанная и применяемая в основном при расчете откосов, однако универсальная в адаптации (1.4):

$$C_m = \frac{C_0 - C'}{1 + a' \ln \left(\frac{H}{l_T} \right)} \quad (1.4)$$

где C_0 – сцепление пород в образце;

C' – сцепление пород в массиве;

H – высота обнажения, м;

l_T – средний размер элементарного структурного блока массива, ограниченного трещинами, м;

a – коэффициент, зависящий от прочности породы в монолитном образце и степени и характера трещиноватости.

Методика (1.2) более подробно учитывает исходные горно-геологические условия заложения выработки, однако, как и другие аналогичные методики (1.3), (1.4), не позволяет учесть различие в прочностных и деформационных параметрах массивов, обусловленных геометрией трещин, ориентировкой их относительно направления главных напряжений в массиве, контактными свойствами – сцеплением и прочностью заполнителя, влажностью и другими свойствами.

Вероятность и форма обрушения не может быть достоверно спрогнозирована без учета контактных свойств поверхностей ослабления. В диссертационной работе

контактные параметры поверхностей ослабления являются одним из важных факторов, так как рассматриваются условия не только гравитационного поля напряжений, при которых блоки могут обрушаться под собственным весом, но также и тектонических полей напряжений, когда сцепление и трение поверхностей блоков оказывает решающее значение на их устойчивость.

Деформационные и прочностные характеристики контактов трещин определяют сдвиговую прочность между блоками и их способность к скольжению. Достоверность принятых контактных свойств напрямую влияет на точность оценки прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород [...], а, следовательно, и прогнозную устойчивость породных обнажений.

Геомеханические расчеты подразумевают некоторую степень упрощения, однако, она должна соответствовать конкретным условиям и отвечать задачам расчета. В некоторых случаях допустима степень идеализации, при которой контакты заменяются на идеальные плоские или зубчатые поверхности с усредненным перепадом высот. В иных случаях рекомендуется проводить съемку поверхности. Обычно такая необходимость есть в случае единичных трещин, например, в кровле выработки [88,123,124]. Вертикальные трещины в середине пролета оказывают наибольшее влияние на деформирование и устойчивость свода. При этом их шероховатость напрямую влияет на устойчивость блоков [140]. На рисунке 1.7 показан пример масштабирования профилей шероховатости при $JRC = 18 \div 20$ [78].

Численное моделирование показывает [11,140], что представление поверхности трещины в виде шероховатой поверхности имеет смысл только при значениях $JRC > 15$, так как с учетом масштабного эффекта глубина неровностей в данном случае может составлять более 10 см. В иных случаях достаточно задания величин контактных параметров по поверхности гладкой трещины.

Для определения взаимосвязи между напряжением сдвига и начальным нормальным напряжением на контакте трещины целесообразны различные критерии разрушения, в зависимости от степени идеализации поверхности контакта и его характеристик. Для описания поведения плоских трещин наиболее распространенным является критерий Кулона-Мора [113]. Поведение контактов, близких к зубчатым, достоверно описывается критерием Patton, а имеющих сложный профиль шероховатости – критерием Barton [81]. Более подробно данные критерии рассмотрены в разделе 1.3.2.

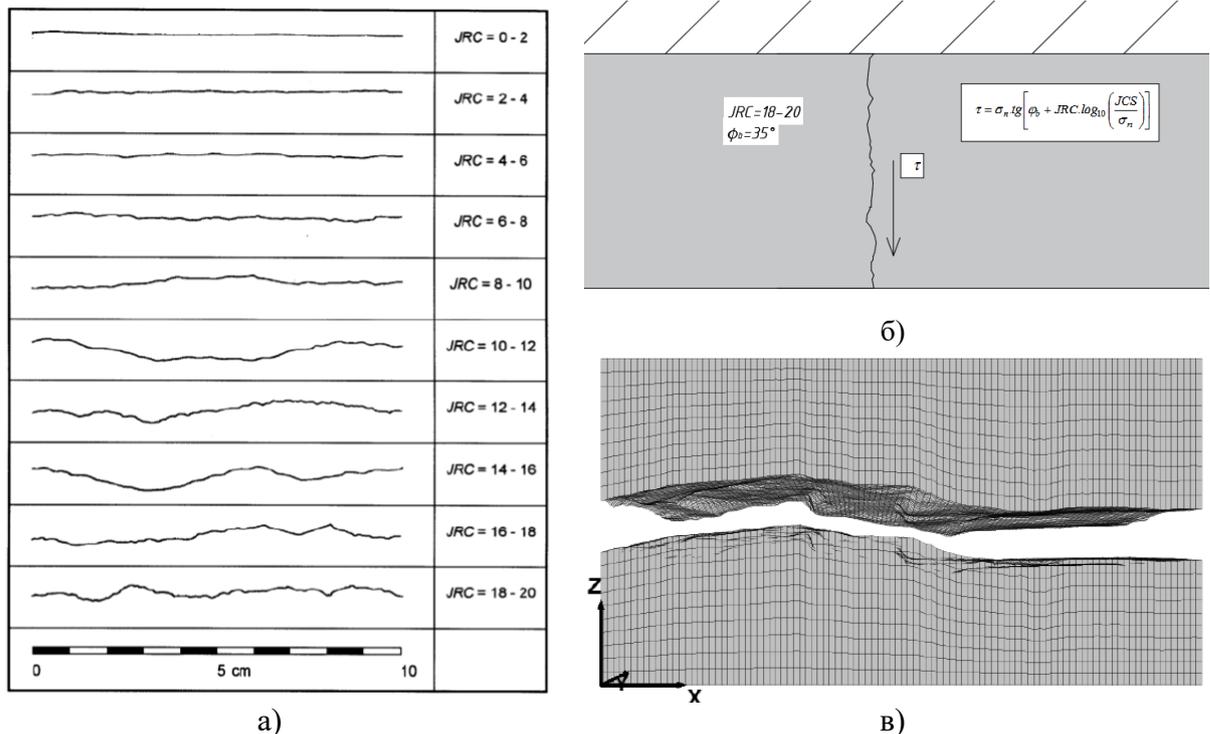


Рисунок 1.7 – Определение степени шероховатости поверхности трещины: а – профили JRC по Бартону; б – профиль шероховатости по Бартону в задаче voussoir beam [140]; в – поверхность трещины, полученная методом лазерного сканирования [123]

Таким образом, при изучении прочностных свойств трещиноватого горного массива необходимо уделять внимание следующим вопросам:

- интенсивность трещиноватости пород, определение степени раздробленности и блочности массива;
- пространственная ориентация трещин и преимущественные направления развития сетей трещин;
- определение геометрических параметров трещин;
- определение физико-механических свойств заполнителя;
- оценка влияния выделенных отдельных трещин или систем трещин на прочностные, деформационные и фильтрационные свойства горных пород, а также на устойчивость подземных сооружений.

Требуемая степень подробности изучения каждого из параметров определяется целью расчета. В зависимости от поставленной цели выбирается степень идеализации массива и усреднения свойств.

Разработка аналитического критерия, с точностью описывающего реальную трещиноватость в массиве, невозможна. Большой точности в описании породного массива позволит достичь использование рейтинговых классификаций и дальнейший перенос их на численные модели.

1.2.2. Классификации трещиноватых горных массивов

Условием достоверной оценки прочностных свойств массива является выделение представительного объема, отражающего условия в массиве, а также позволяющего учесть масштабный эффект, обуславливающий различие прочностных и деформационных свойств в зависимости от размера образца горной породы или массива [47]. Влияние масштабного эффекта на свойства горных пород продемонстрировано во многих работах [9,30,35,47], общей закономерностью является снижение интенсивности трещиноватости и, соответственно, приближение прочностных свойств к свойствам в образце, с уменьшением рассматриваемого объема массива. Как правило, в массиве возможно выделение объёма, дальнейшее увеличение размеров которого не приведёт к изменениям его механических характеристик. Такой объём называется репрезентативным элементарным объемом (РЭО) [8]. Учесть свойства массива именно в репрезентативном объеме важно при рассмотрении значительного по размерам и имеющего пространственную конфигурацию объекта.

Масштабный эффект наблюдается и применительно к контактным свойствам трещин (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Иллюстрация учета масштабного эффекта [123...]

На сегодняшний день в качестве стандартного параметра, описывающего качество породного массива в пределах репрезентативного объема, является показатель RQD (Dicre, 1967), определяемый по соотношению (1.5):

$$RQD = \frac{\sum \text{длина отдельных более 10 см}}{\text{общая длина образца керна}} \cdot 100 \quad (1.5)$$

Показатель RQD используется в большинстве систем классификаций породного массива как исходный. Рейтинговые классификационные системы позволяют учитывать трещиноватость через усредненные механические характеристики массива. Основными

классификационными системами на настоящий момент являются приведенные в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Сводная таблица рейтинговых классификаций

Рейтинговая система	Описание	Область применения
Q [76,77]	$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$ <p>где RQD – показатель качества горной породы; J_n – показатель количества систем трещин; J_r – показатель шероховатости трещины; J_a – показатель трансформации контактных условий по трещине; J_w – показатель, учитывающий влияние обводненности трещины на условие контакта по трещине; SRF – показатель, учитывающий соотношение между напряжениями, действующими в породном массиве и прочностью породы.</p>	Определение параметров крепи выработок, оценка устойчивости породных обнажений
RMR [84,85]	$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B$ <p>где $J_{A1} - J_{A5}$, J_B – поправки на прочность пород: переход от одноосного сжатия, трещиноватость массива и ее параметры, обводненность. Форма, размер и направление выработки влияют на поведение массива горных пород в плане устойчивости породных блоков. В данном</p>	Расчет устойчивых пролетов, определение продолжительности временной устойчивости взорванной породы
MRMR	показателе эмпирически учтены такие факторы, влияющие на устойчивость, как угол падения трещин, условия взаимного пересечения структурных нарушений и зон повышенного давления, качество ведения буровзрывных работ, а также масштабный эффект.	Адаптация RMR с учетом изменения напряжений и последствий взрывов и воздействия выветривания
GSI [104]	$GSI = \frac{26,5 + 8,79 \cdot \ln J_c + 0,9 \cdot \ln V_b}{1 + 0,0151 \cdot \ln J_c - 0,0253 \cdot \ln V_b}$ <p>где V_b – объем блока средний; J_c – параметр, учитывающий свойства по контакту.</p> $V_b = \frac{S_1 S_2 S_3}{\sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3 \sqrt[3]{P_1 P_2 P_3}}$ $J_c = \frac{J_w J_s}{J_A}$ <p>где S_i – среднее расстояние между трещинами; γ_i – угол взаимного пересечения систем трещин; P_i – показатель, характеризующий протяженность трещины; J_w – показатель шероховатости крупномасштабный; J_s – показатель шероховатости мелкомасштабный; J_A – показатель трансформации контактных условий по трещине</p>	Построения паспортов прочности горных пород

Продолжение таблицы 1.5

Рейтинговая система	Описание	Область применения
RMi [126]	$RMi = \sigma_c \cdot JP$ <p>где σ_c – прочность на одноосное сжатие образца; JP – коэффициент, учитывающий размер блоков, состояние контактов, размер трещин.</p> $JP = 0,2\sqrt{jC} \cdot V_b^D,$ <p>где V_b – объем блока, м³; $D = 0,37jC^{-0,2}$ – показатели, определяющиеся по эмпирическим зависимостям.</p>	Вычисление прочности трещиноватого горного массива при проектировании

Геомеханическая классификация породного массива Q [78] является комплексным показателем, учитывающим строение массива, конфигурацию блоков, сдвиговые характеристики трещин, напряженного состояния массива. Она подходит для применения в различных горно-геологических условиях, в частности, на участках нарушений, обводненного массива, тектонических разломов.

Классификация RMR также является адаптивной и позволяет комплексно оценить состояние массива. Недостатком классификации является то, что необходимо тщательно разделять массив на зоны, обладающие схожими рейтинговыми показателями. Более того, определение величины процентных поправок на различные факторы является отчасти субъективным.

Система GSI концентрируется на описании двух факторов: структуры породы и состояния поверхности блока. Показатель GSI является исходным при уточнении физико-механических свойств и построении паспорта прочности горных пород по критерию прочности Хока-Брауна [104]. Исходная диаграмма дополнялась большое количество раз и может использоваться для большого разнообразия горно-геологических условий.

Все рейтинговые классификации массивов имеют общий недостаток. Они основаны на статистической обработке большого объема данных о геологическом строении месторождений, то есть являются эмпирическими, что влечет за собой усреднение показателей по некоторому объему массива. Это может привести к неверной оценке приконтурного массива в условиях, значительно отличающихся от усредненных.

1.2.3. Развитие геомеханических процессов в окрестности породных обнажений

Проведение горной выработки приводит к возникновению процессов перераспределения напряжений, деформирования, разрушения пород, зависящих от ряда

факторов [31,58], которые проявляются в виде инструментально или визуально наблюдаемых смещений, обрушений, горных ударов и других форм проявления горного давления.

Формирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород происходит под влиянием действующих в ненарушенном массиве полей напряжений – гравитационного или тектонического. Первоочередной задачей перед проведением выработки является всестороннее исследование параметров полей напряжений в массиве пород и оценка их изменений под влиянием различных факторов и условий [28].

При проведении горной выработки равновесное напряженное состояние нарушается с образованием зон концентрации напряжений в боковых стенках или кровле выработки в зависимости от начального напряженного состояния массива [16,27,45]. Коэффициент концентрации напряжений при этом может достигать 2-3. Величину концентрации напряжений можно регулировать выбором оптимальной формы выработки или типа крепи, однако это не может полностью нивелировать изменения, связанные со строительством выработки.

Форма и размеры горной выработки также могут определять характер проявления геомеханических процессов. Анализ причин, приводящих к обрушению пород на рудниках Хибинского массива, позволил установить, что наибольшее число обрушений (вывалов) происходит при перекреплении и расщелке сопряжений горных выработок (рисунок 1.9).

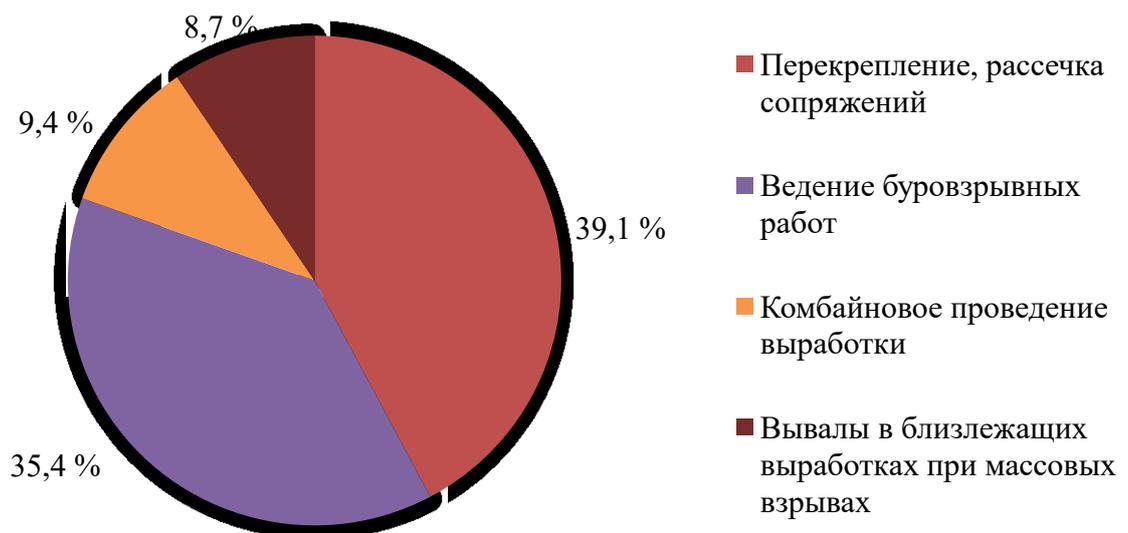


Рисунок 1.9 – Диаграмма причин, приводящих к обрушению горных пород [24]

Развитие нарушений приконтурного массива, приводящее к обрушениям на сопряжениях, не случайно и объясняется большим пролетом по сравнению с

одиночными выработками и таким образом, большей зоной предельного состояния вокруг них. На сопряжениях горных выработок нарушения приконтурного массива преимущественно развиваются в кровле непосредственно на сопряжении, а также на прилегающих частях сопрягающихся выработок (рисунок 1.10). Необходимо правильно определить размеры указанной зоны и проводить подробные исследования структурной нарушенности в ней.

Изучение геомеханических процессов в структурно-нарушенных массивах горных пород неразрывно связано с установлением напряженного состояния нарушенного массива. Так, для перенапряженных слаботрециноватых массивах характерна потеря устойчивости в виде хрупкого разрушения приконтурного массива [27,24,116].

На примере зон хрупкого разрушения показана разница между развитием зон в окрестности одиночной выработки (рисунок 1.10, а) и в окрестности сопряжения (рисунок 1.10, б). Практически при любом сочетании размеров выработки и напряженного состояния массива зона хрупкого разрушения в окрестности сопряжения не локальна, как в одиночной выработке. Данное обстоятельство требует проведения подробного прогноза изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива.

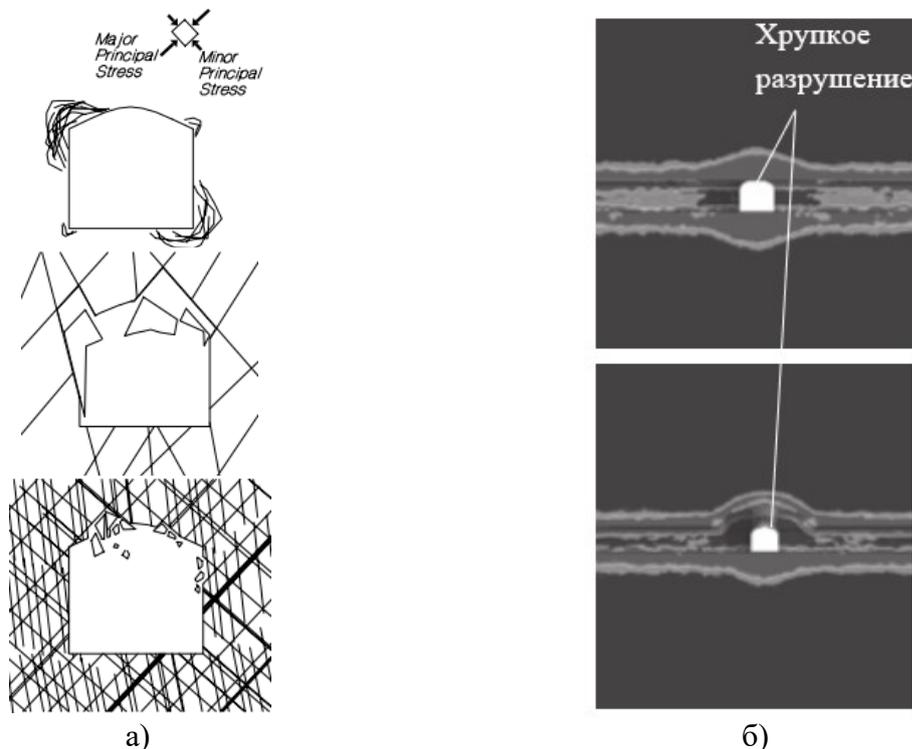


Рисунок 1.10 – Зоны предельного состояния и потенциального обрушения в окрестности одиночных выработок различной формы [106] и в окрестности четырехстороннего сопряжения [27]

В работах [44,106,111] показано, что зона влияния сопряжения распространяется также на примыкающие участки сопрягающихся горных выработок. Размеры зоны влияния могут составлять до 5 пролетов сопряжения.

1.3 Анализ методов прогноза геомеханических процессов в структурно нарушенных массивах горных пород

1.3.1. Методы математической идеализации структурно нарушенных массивов

Горный массив является сложной средой, содержащей в себе нарушения нескольких классов – от нарушений кристаллической решетки до разрывных тектонических нарушений (таблица 1.6). При решении геомеханических задач невозможно подобрать аналитическое или иное решение, учитывающее все параметры массива. Как геометрические параметры массива, так и его механическое поведение может быть описано с определенной степенью упрощения или идеализации. Идеализация поведения материала подразумевает использование моделей среды, включающих набор параметров, зависящий от степени сложности поведения материала.

Таблица 1.6 – Основные типы нарушений в массиве [126]

Тип нарушений	Линейный размер нарушения, м						
	<0.01	0.1	1	10	100	1000	10000
Отдельные трещины							
Прожилки							
Разрывы сплошности							
Поверхности напластования							
Трещины							
Крупные плоскости напластования							
Разрывные нарушения							

В общем выделяется два основных подхода к идеализации массива горных пород, подразумевающих представление массива в виде сплошной или дискретной среды (рисунок 1.11). При этом в случае представления массива сплошной средой нарушения могут учитываться через снижения величин параметров прочности и деформируемости массива, или задаваться через критерий пластичности по преимущественным направлениям поверхностей ослабления. Такая идеализация массива допустима в определенных пределах [70], в частности, при возможности пренебречь влиянием трещин, пор и других структурных нарушений на поведение среды.

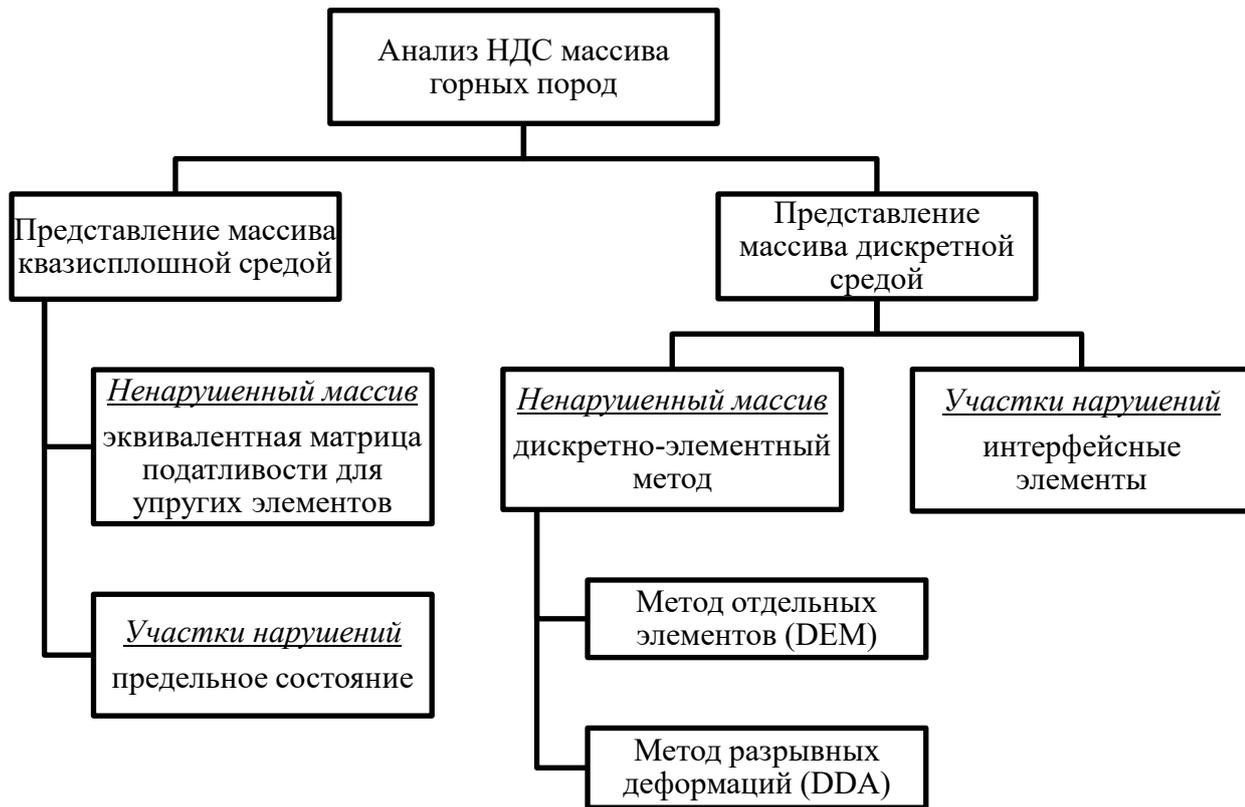


Рисунок 1.11 – Классификация численных методов [70]

Это целесообразно не только при наличии микротрещиноватости или небольшого количества нарушений, не приводящим к анизотропии свойств, но также и при достаточно значительной степени нарушенности, когда неоднородность прочностных характеристик в различных направлениях снижается [28,35,73,9].

При рассмотрении горного массива **в рамках механики сплошной среды**, при наличии установленных по результатам испытаний модуля упругости E и коэффициента Пуассона ненарушенной породы, модуль деформации трещиноватого массива определяется по закономерностям (1.6)-(1.10) [12]:

- в вертикальном направлении:

$$E_{\perp} = \frac{E}{1 + \sum_1^n \eta_i (1 - \sin^4 \theta_i)}, \quad (1.6)$$

$$G_{\perp} = \frac{E}{2(1 + \mu + \sum_1^n \eta_i \cos^2 \theta_i)}, \quad (1.7)$$

- в горизонтальном направлении:

$$E_{\parallel} = \frac{E}{1 + \sum_1^n \eta_i (1 - \cos^4 \theta_i)}, \quad (1.8)$$

$$G_{\parallel} = \frac{E}{2(1 + \mu + \sum_1^n \eta_i \sin^2 \theta_i)}, \quad (1.9)$$

$$\mu_{\perp,\parallel} = \mu + \sum_1^n \eta_i \sin^2 \theta_i \cos^2 \theta_i. \quad (1.10)$$

где θ – угол, образуемый плоскостями i -ой системы трещин с горизонтальной плоскостью;

η_i – геометрическая характеристика i -ой системы трещин, определяемая согласно (1.11):

$$\eta_i = \frac{\delta_i}{h_i \xi_i}, \quad (1.11)$$

где δ_i – средняя ширина раскрытия трещин i -ой системы;

ξ_i – относительная площадь скальных контактов;

h_i – средняя протяженность ненарушенной горной породы, приходящаяся на одну трещину i -ой системы.

В зависимости от наличия анизотропии массива и количества преимущественных поверхностей ослабления среда описывается как изотропная, трансверсально-изотропная, анизотропная или квазиизотропная.

Изотропная среда. Уравнения неразрывности деформаций являются общими уравнениями механики деформируемого твердого тела независимо от его физико-механических свойств [4]. Матрица податливости определяется тремя упругими константами: модулем упругости E , коэффициентом Пуассона и модулем сдвига G [99] и может быть записана следующим образом (1.12):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Трансверсально-изотропная среда. Трансверсально-изотропная модель описывает горные породы с одним доминирующим направлением анизотропии (например, слоистость) [107]. Поведение среды описывается пятью константами: модуль упругости в плоскости изотропии E , модуль упругости в направлении, перпендикулярном плоскости изотропии E' , коэффициент Пуассона в плоскости изотропии ν , коэффициент Пуассона вне плоскости изотропии ν' , модуль сдвига вне плоскости изотропии G' . Матрица податливости может быть записана следующим образом (1.13):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu'}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu'}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu'}{E'} & -\frac{\nu'}{E'} & \frac{1}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Трансверсально-изотропная модель подходит для описания пород с природной слоистостью.

Анизотропная среда. Анизотропная модель описывает породы с несколькими поверхностями ослабления. Поведение среды описывается девятью константами: модули упругости в трех направлениях анизотропии E_1, E_2, E_3 ; модули сдвига параллельно координатным плоскостям G_1, G_2, G_3 ; коэффициенты Пуассона ν_1, ν_2, ν_3 .

Матрица податливости записывается следующим образом (1.14):

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \\ \Delta\varepsilon_3 \\ \Delta\varepsilon_4 \\ \Delta\varepsilon_5 \\ \Delta\varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_2 \\ \Delta\sigma_3 \\ \Delta\sigma_4 \\ \Delta\sigma_5 \\ \Delta\sigma_6 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Метод задания поверхностей ослабления в неявном виде заключается в том, что по направлению преимущественной ориентировки плоскостей систем трещин прочность на сдвиг и разрыв понижена и меняется вместе с развитием деформаций [5, ...]. Степень ослабления задается коэффициентом ослабления и число $p_i < 1$ ($i = 1, 2, 3 \dots 8$). Перемещение и разрушение может происходить по ориентированным площадкам, на которые действуют максимальные напряжения. Разрушение или скольжение интерпретируется через пластические деформации.

Представление массива в виде сплошной среды является универсальным и наиболее простым способом получить приближенную оценку напряжений и деформаций, возникающих в окрестности выработок, в частности, предсказать размеры зон влияния.

Применение моделей сплошной среды упрощает расчет, однако не упрощает сбор и интерпретацию исходных данных для трещиноватой среды. Интерпретация анизотропии свойств, вызванной наличием структурных нарушений, идеализирует среду и в некоторых случаях не позволяет корректно оценить ее поведение при нагружении.

В большинстве случаев подход, описывающий модель массива как сплошную среду, дает удовлетворительную сходимость с результатами дискретно-элементного моделирования только качественно. При расчете сплошной среды можно предварительно определить зоны, в которых ожидаются повышенные деформации или разрушение горных пород, однако невозможно определить характер разрушения. В окрестности ответственных объектов или объектов сложной конфигурации и при наличии нескольких систем трещин в массиве рекомендуется тщательно изучать параметры трещиноватости и моделировать трещины в явном виде.

Рассмотрение горного массива в рамках механики дискретной среды. При наличии нескольких пересекающихся систем трещин и блочности массива возникает необходимость правильно оценить возможность перемещения блоков относительно друг друга при проходке выработок. При этом математические зависимости должны задаваться отдельно как для самих блоков, представленных как деформируемые сплошные тела, так и для контактных поверхностей [2,11,132]. При обосновании модели блочной среды возникают три важнейшие проблемы:

- 1) пространственное геометрическое описание структуры массива пород;
- 2) математическое описание физико-механических закономерностей деформирования и разрушения блочного массива;
- 3) постановка граничных условий и выбор методов решения, обеспечивающих адекватность режима нагружения с учетом начального напряженного состояния.

Решение первой задачи сопряжено с обоснованием степени точности описания структурных элементов массива и возможностью получить достоверные геологические данные. В виде отдельных объектов могут быть выделены как литологические разности, так и непосредственно отдельные, ограниченные поверхностями трещин. Достоверности прогноза можно добиться, только учитывая несколько структурных уровней: от макронарушений до разломов большой протяженности, определяющих напряженное состояние массива.

Описание трещиноватого горного массива в рамках механики дискретной среды позволяет достичь достаточной точности прогноза, однако требует также значительной вычислительной мощностью компьютера.

1.3.2. Модели деформирования и прочности нарушенного массива горных пород

Условия прочности структурно-нарушенных горных массивов. В качестве основных требований к критериям прочности и моделям, описывающим трещиноватый породный массив, Ноек [103,104] выделял следующие:

- простота математической формулировки критерия;
- возможность его адаптации к конкретным условиям;
- высокая сходимость с натурными данными.

В предположении об идеальном строении твердого тела, которое либо обладает структурой, либо является сплошным, однородным, разработано большое количество теорий прочности (Мора, Треска-Сен-Венана, Губера-Мизеса, Ставрогина А.Н., Янга Ю.И., Баландина П.П., Миролюбова И.Н., Лифшица-Розенцвейга, Волкова С.Д. и Седракияна Л.Г.).

Классическим и распространенным для решения геомеханических задач критерием прочности является критерий Кулона-Мора [135], состоящий из двух компонент – постоянного сцепления и компоненты трения, зависящей от нормального напряжения (1.15):

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (1.15)$$

где τ – касательное напряжение;

σ – нормальное напряжение;

c – сцепление горной породы;

φ – угол внутреннего трения горной породы.

В координатах главных напряжений (1.16) критерий можно записать как:

$$\sigma_1 = k\sigma_3 + \sigma_c, \quad (1.16)$$

где σ_c – прочность на одноосное сжатие образца;

k – параметр, определяемый согласно зависимости (1.17):

$$k = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}. \quad (1.17)$$

Критерий Мора-Кулона предполагает, что разрушение не зависит от значения промежуточного главного напряжения σ_2 , определение которого возможно при учете нелинейности зависимости сдвиговых напряжений от нормальных [103,143]. Однако установлено, что степень влияния напряжения σ_2 не превышает 10-15 % и несколько увеличивается для хрупких анизотропных пород [84,85,86]. Несмотря на это и на свою простоту, критерий имеет диапазон применения, при котором дает достаточно достоверные результаты, в частности, для крепких ненарушенных пород [49,101,120].

Критерий Друкера-Прагера [69] аналогичен критерию Кулона-Мора и характеризуется параметрами q и K , которые определяются через сцепление и угол внутреннего трения материала. В целом критерий также узко применим, потому что в большинстве случаев показывает завышенные значения прочности и рекомендуется к применению для пород с углом внутреннего трения $\varphi < 30^\circ$.

Теория Гриффита (Griffith, 1921) была разработана для описания трещинообразования в хрупких материалах, однако, она применима и для описания развития эллиптической трещины. Сходимость удовлетворительна только в плоской постановке и для узкой области применения, однако теория Гриффита заложила основу для развития более совершенных методов, основанных на энергетической теории развития трещин.

Пространственным развитием теории Гриффита послужили критерии прочности Мюррела и Хоббса [121], которые являлись попытками создания нелинейного критерия прочности, согласующегося с натурными данными, однако имеют еще более узкие границы применимости.

В результате обработки лабораторных данных Хок [103] получил эмпирическое соотношение – нелинейный критерий прочности на сдвиг для скальных грунтов (1.18):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (1.18)$$

где σ_1 – предел прочности горной породы, соответствующий величине главного минимального напряжения σ_3 ;

σ_3 – главное минимальное напряжение;

σ_{ci} – прочность на одноосное сжатие горной породы (в образце);

m_i – показатель формы огибающей прочности горной породы (1.19);

s, a – безразмерные константы (1.20)-(1.21), при отсутствии иных данных принимаются $s = 1, a = 0,5$.

$$m = m_i \cdot \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (1.19)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (1.20)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (1.21)$$

Параметры m, GSI, D определяются эмпирически в соответствии с натурными и лабораторными методиками, призванными установить взаимосвязь поведения материала с физико-механическими свойствами, степенью трещиноватости, поврежденностью динамическими воздействиями и реологическими особенностями пород [72].

Нарушенность массива учитывается параметром s через степень снижения его прочности на сжатие по сравнению с образцом, что по сути является коэффициентом ослабления. Параметр m характеризует соотношение предела прочности на одноосное сжатие к пределу прочности на растяжение породы в образце. Иллюстрация соотношения прочности породы в образце и в массиве по Хоку приведена на рисунке 1.12.

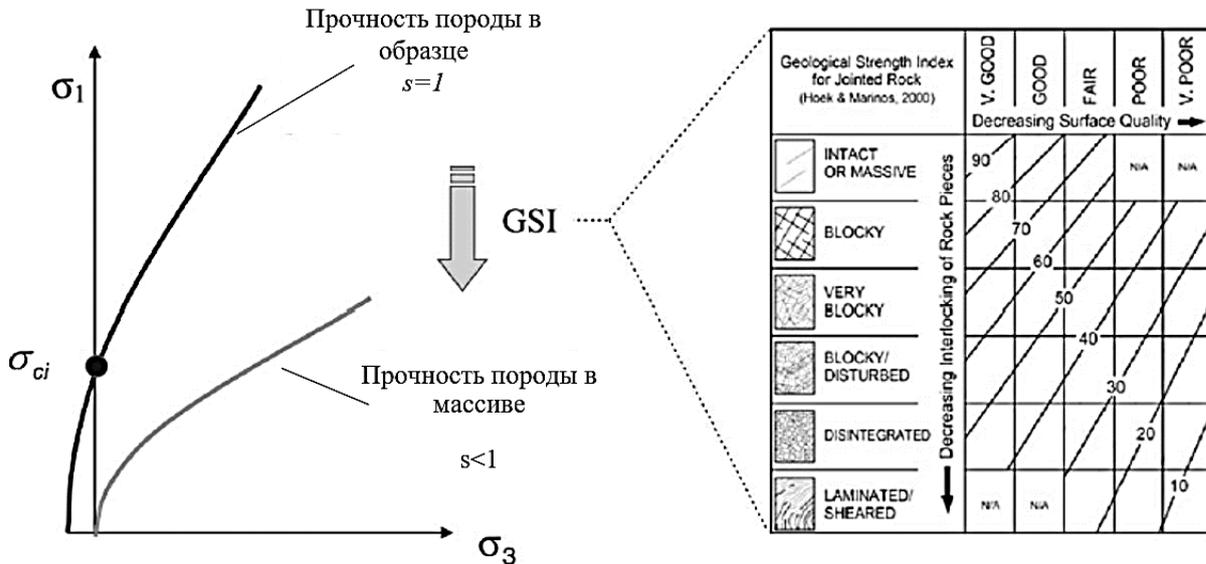


Рисунок 1.12 – Критерий прочности Хока-Брауна [104]

Из-за учета лишь соотношений прочности на сжатие и растяжение в данном критерии неверно трактуется прочность трещиноватых массивов: из критерия следует, что, чем больше трещин в материале, тем выше его прочность на сжатие [30,65]. Кроме того, определение эмпирических параметров является достаточно субъективной процедурой и может повлечь за собой неточности в оценке прочностных свойств массива. Отклонения от экспериментальных данных рассмотренных теорий прочности возрастает в случае наличия крупных структурных нарушений. При взаимодействии поверхностей нарушений в них также возникают нормальные и касательные усилия, которые взаимосвязаны через параметры трения поверхностей.

Модели контактного взаимодействия стенок трещин. Трещина представляет собой поверхность ослабления в горной породе, характеризующуюся резким преобладанием протяженности стенок над шириной раскрытия. Трещиноватость в скальных и рудных массивах горных пород наблюдается на всех уровнях, начиная с микродефектов и заканчивая макротрещинами различных порядков [91,112,74]. В рамках диссертационной работы рассмотрено влияние на устойчивость макротрещин размерами от нескольких миллиметров до нескольких метров.

В настоящее время все имеющиеся в теории трещин результаты относятся к плоской постановке задачи. Поведение трещины при сдвиге описывается в зависимости от состояния контакта (рисунок 1.13).

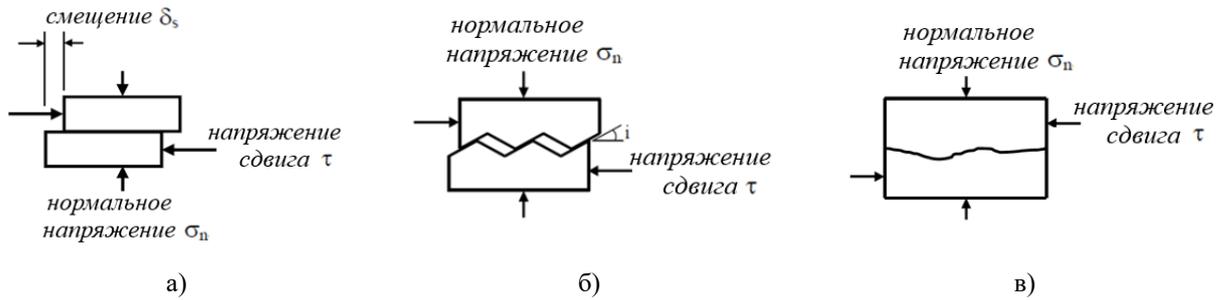


Рисунок 1.13 – Типы контактов трещин: а – плоский контакт; б – зубчатый контакт; в – шероховатый контакт

Касательное напряжение на контакте трещины с плоскими стенками при приложении сдвиговой нагрузки увеличивается до определенного предельного значения, а затем опускается до остаточной величины и остается таковым даже при значительных деформациях (рисунок 1.14, а). Зависимость между касательным напряжением и нормальным напряжением на трещине описывается линейным критерием Кулона-Мора (1.22):

$$\tau_p = \sigma_n \cdot tg\varphi_b + c, \quad (1.22)$$

где τ_p – предельное касательное напряжение по поверхности трещины;

φ_b – угол внутреннего трения поверхности скольжения;

c – сцепление по контакту.

Сдвиг при зубчатом типе контакта происходит как результат взаимного перемещения зубьев по наклонным граням, вызывая дилатансию (рисунок 1.14, б). Прочность на сдвиг образцов с зубчатым контактом (Patton, 1966) может быть определена согласно (1.23):

$$\tau_p = \sigma_n \cdot tg(\varphi_b + i), \quad (1.23)$$

где i – угол зубьев;

φ_b – угол внутреннего трения поверхности скольжения.

Для моделирования сдвиговой прочности породы по трещинам широко используется критерий прочности Бартона-Бандиса [65]. Критерий нелинейный и определяется согласно (1.24) [79,73]:

$$\tau = \sigma_n tg \left[\varphi_r + JRC \cdot lg \frac{JCS}{\sigma_n} \right] \quad (1.24)$$

где JRC – коэффициент шероховатости трещины;

σ_n – нормальное напряжение к поверхности трещины;

JCS – предел прочности на сжатие;

φ_b – угол внутреннего трения поверхности скольжения.

Значения параметров варьируются в следующих пределах:

- значение JRC : от 0 до 20 (гладкая поверхность – очень шероховатая поверхность);
- значение JCS : от 10 до 200 МПа (сильно выветрелые породы – прочные породы);
- значение φ_b : от 25 до 35 град (сильно выветрелые породы – прочные породы).

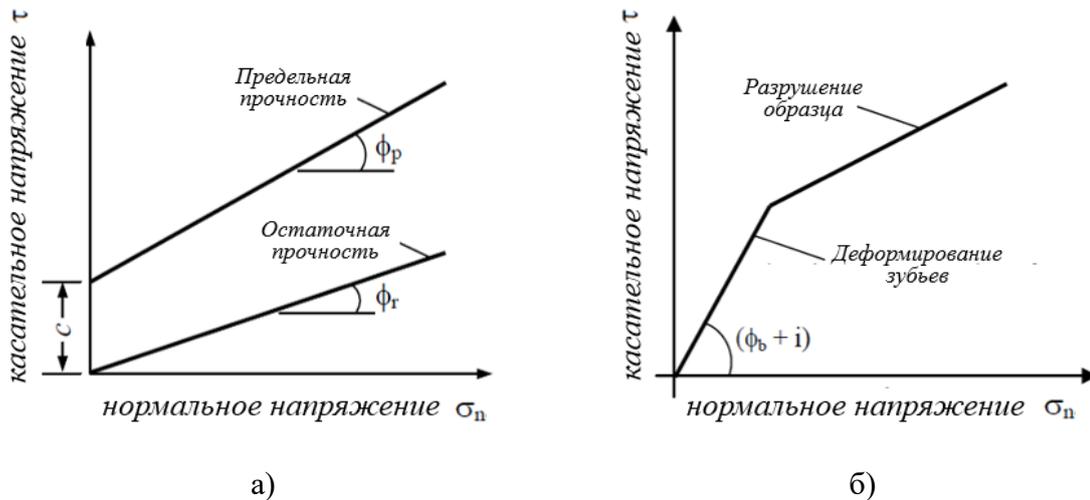


Рисунок 1.14 – Сдвиговое поведение типов контактов: а – плоский контакт; б – зубчатый и шероховатый контакты

Вне зависимости от типа контакта паспорт прочности трещины может быть построен так же, как и для породы, с учетом предела прочности при различных действующих нормальных напряжениях. На основании паспорта прочности определяются сцепление и угол внутреннего трения шероховатой поверхности трещины.

Распределение напряжений по поверхности трещины неравномерно [123], что требует пространственного подхода в изучении характеристик трещины. В случае пространственного моделирования трещины представляются в виде двумерных плоскостей. Появившиеся таким образом граничные условия в направлении второй оси меняют распределение напряжений в плоскости трещины.

При наличии данных о контактных характеристиках трещин в массиве рекомендуется учитывать трещиноватость в явном виде в виде поверхностей ослабления и использовать отдельный критерий прочности для описания механического поведения трещин.

В диссертационной работе трещиноватый породный массив представляется в виде дискретной среды, поэтому описание его поведения осуществляется комплексом зависимостей. Так, поведение принятых условно сплошными блоками породы,

разделенных поверхностями ослабления, описывается с помощью критерия прочности Кулона-Мора. Для описания поведения контактов между блоками принята модель Бартона.

1.3.3 Численные методы прогноза геомеханических процессов в массивах горных пород

Для комплексного учета большего количества факторов, оказывающих влияние на развитие геомеханических процессов в окрестности обнажений, необходимо развитие методических подходов и их усложнение. В численном моделировании объектом исследования является геомеханическая модель, отображающая реальное механическое поведение массива и изменение свойств с требуемой степенью достоверности [61].

При возможности упрощения геомеханической модели для снижения сложности расчетов участки горного массива можно рассматривать как сплошную среду. Так, например, при расчете одиночной выработки с простой геометрией становится возможным учесть макротрещиноватость во всем массиве пород, вмещающих выработку. Однако, для добычных выработок расчетные схемы, учитывающие структурную нарушенность, значительно усложняются и не получили такого распространения [1,60].

В таком случае при наличии выделенной зоны нарушений или объекта повышенной ответственности необходимо тщательно изучить массив в некоторых пределах, которые определяются влиянием их на устойчивость контура объекта. На данных участках целесообразно применять анализ в рамках механики дискретной среды. При этом за пределами зоны влияния подземных работ допускается применение традиционных методов анализа с использованием механики сплошной среды.

Разница в моделировании структурно нарушенного массива в рамках механики сплошной и дискретной сред в том, что модель сплошной среды отображает деформации в системе в целом, а в модели дискретной среды отображаются деформации каждого компонента системы, что значительно повышает достоверность расчетов.

Во второй половине XX века советскими учеными-механиками выполнены обширные исследования, которые заложили основу методологии применения метода конечных элементов (МКЭ) к решению задач геомеханики в упругой и упругопластической постановках. В первую очередь необходимо отметить работы О.К. Зенкевича, Б.З. Амусина, Ж.С. Ержанова, В.Ю. Изаксона, Ю.М. Либермана, А.Ф. Фадеева, Е.Г. Морозова и др.) [63,20,66].

В настоящее время ведется активная работа над доработкой и созданием новых моделей описания поведения материалов. В рамках механики сплошной среды разрабатываются нелинейные модели, позволяющие достоверно описывать поведение слоистых неоднородных сред [14,15,23,22,94], в рамках механики дискретной среды [94] – совершенствование моделей описания контактного взаимодействия.

Одним из преимуществ численного моделирования является возможность расчета объектов сложной пространственной конфигурации [102,89,54], что позволяет учесть изменение напряженного состояния, например, на сопряжении по всей его площади, а не только по эквивалентному пролету.

Модели сплошной среды. Методы моделирования сплошной среды, включая метод конечных элементов и метод конечных разностей, могут описать поведение среды с ограничениями, что обусловлено сплошностью перемещений и деформирования элементов.

Такой подход не может обеспечить учет всех параметров трещин, однако, модели сплошной среды могут быть применены в отдельных случаях и для трещиноватого массива, например, при достаточно сильной интенсивности структурной нарушенности.

Существует несколько программных комплексов, позволяющих выполнять пространственное моделирование методом конечных элементов в *implicit*. Задание трещин может осуществляться как интерфейс, при этом деформации по трещинам интерпретируются через возникающие пластические деформации.

На рисунках 1.15, 1.16 видно, что моделирование в рамках механики сплошной среды позволяет спрогнозировать области и величины смещений, а также усилия в структурных элементах (и элементах массива). Однако, это качественное распределение смещений не позволяет спрогнозировать механизм потери устойчивости при наличии структурных блоков или отдельностей в массиве.

Модели дискретной среды. Дискретно-элементное моделирование, или DEM, впервые предложенное Cundall and Hart [92], основано на относительном смещении и повороте сплошных блоков относительно друг друга. В рамках модели может быть смоделирован полный отрыв [93]. Массив задается в виде сплошных жестких или деформируемых блоков, разделенных плоскостями структурных нарушений с заданными свойствами [138,91,128]. В таком случае конечно-элементная сетка каждого блока не связана с соседними. Вхождение поверхностей блоков в контакт инициирует возникновение контактных сил. В ходе взаимодействия могут возникать новые контактные силы или прерываться существующие. Такой подход позволяет учесть жесткость контакта и трение, возникающее в его плоскости.

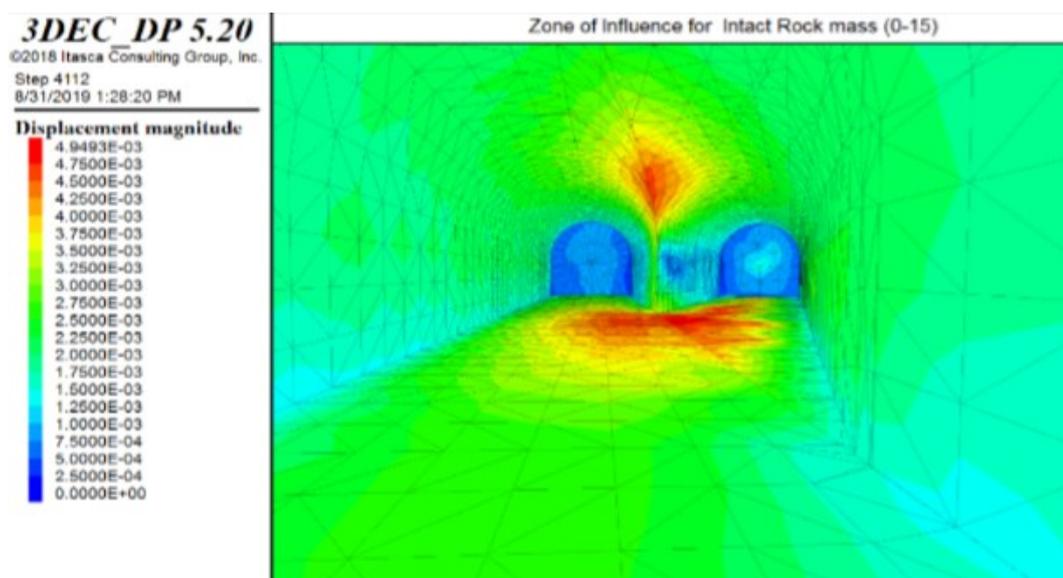


Рисунок 1.15 – Эпюра смещений на сопряжении [68]

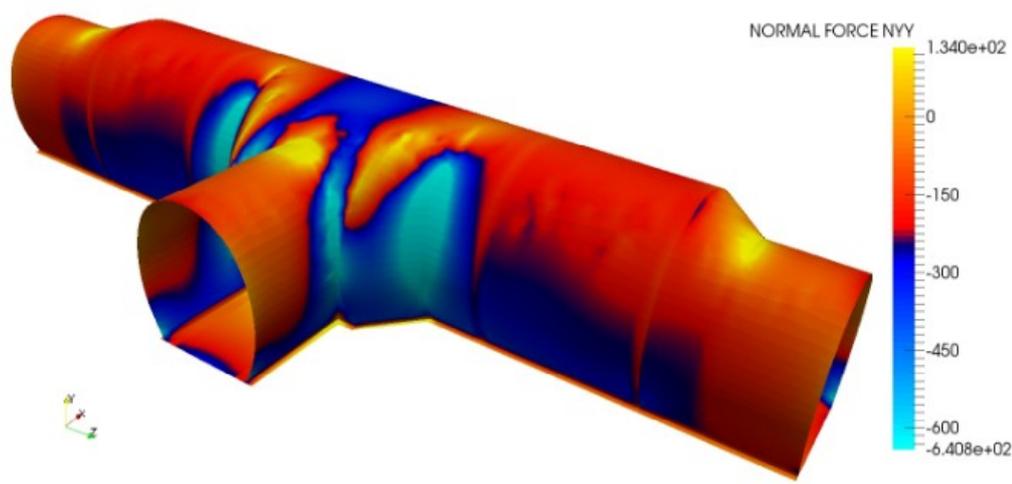


Рисунок 1.16 – Эпюра распределения нормальных усилий в обделке тоннеля [145]

В алгоритме дискретных элементов используется явная схема решения уравнений движения для системы твердых или деформируемых тел. Динамическое уравнение равновесия для каждого блока многократно решается до тех пор, пока не будут выполнены граничные условия, законы контакта и движения. При граничных условиях подразумеваются и трещины, представленные интерфейсами. Контактный закон может быть линейным, упругопластическим или нелинейным (пластическим). Также существует несколько способов представления трещины: как плоская поверхность; в виде «зубчатой» поверхности или шероховатой поверхности в зависимости от того, какая степень идеализации допустима. Лучшее представление о совместном поведении дает последнее.

Моделирование среды, состоящей из дискретных элементов, можно выполнить в шесть этапов [94,102]:

1. Создание блочной модели горного массива, определение граничных и начальных условий.
2. Определение контактных свойств и контактного закона.
3. Расчет сил F и моментов M всех блоков.
4. Расчет ускорений, скоростей, перемещений и вращений всех частиц.
5. Расчет новых положений x всех частиц.
6. Повторение шагов 2–5 с временным шагом Δt до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие.

Пример расчетов, полученных с помощью DEM, приведен на рисунках 1.17-1.18.

В рамках механики дискретной среды возможен прогноз смещения блоков вплоть до их выпадения и формирования нового контура выработки, что необходимо при прогнозе устойчивости обнажений больших пролетов в трещиноватых массивах, где возможно потенциальное обрушение пород приконтурной зоны.

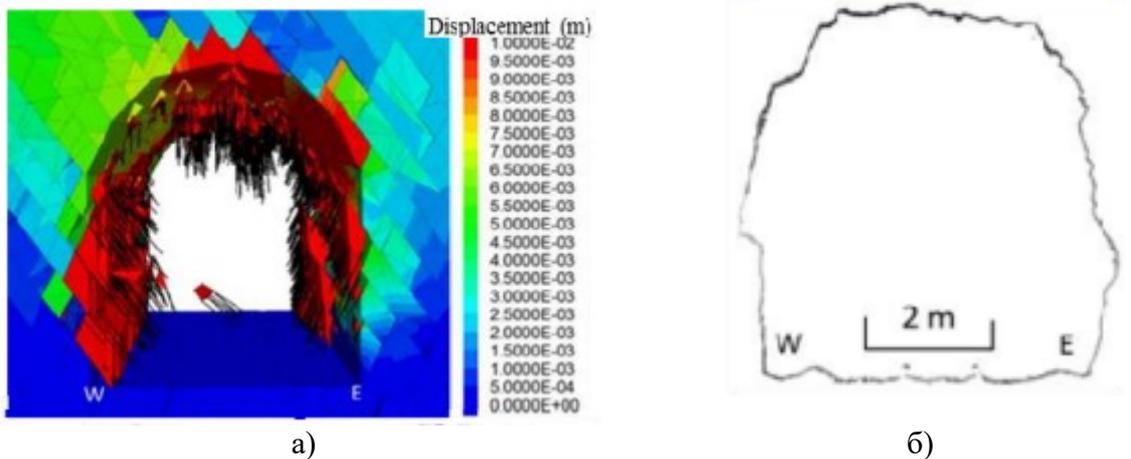


Рисунок 1.17 - Эпюра смещения блоков (а) и ее сравнение с типичным сечением выработки в данных условиях (б) [119]

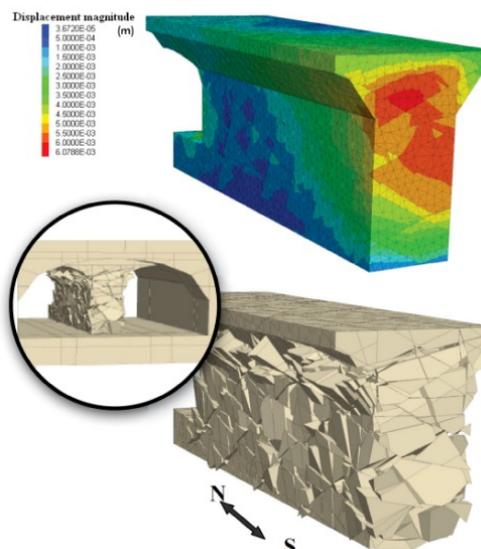


Рисунок 1.18 – Большие деформации блоков в целике [146]

1.4 Формирование напряженно-деформированного состояния массива на участках сопряжений

Основными факторами, влияющими на величину и характер горного давления, возникающего при проведении горной выработки, являются [13,6,108]: глубина заложения, физико-механические свойства горных пород, структурные и тектонические нарушения, гидростатическое давление водонапорных горизонтов (при наличии), а также размеры выработки и конструкция крепи. Устойчивость подземной горной выработки в большей степени определяется состоянием приконтурного массива. Помимо роста глубины работ и ухудшения горно-геологических условий, к негативным факторам, влияющим на устойчивость, относят техногенные: влияние очистных работ, буровзрывных работ и другие. Совокупное влияние всех факторов может привести не просто к обрушению пород, но также и к реализации динамических проявлений горного давления – горным ударам, микроударам.

При пересечении двух и более одиночных выработок, и при их соединении в одну, напряженное состояние значительно меняется, что приводит к изменению характера деформирования породного массива в приконтурной зоне. J. Li рассматривает напряженно-деформированное состояние крепи и приконтурного массива при строительстве сопряжения двух выработок под углами друг к другу 30° , 45° и 90° . Наихудшие условия наблюдались при сопряжении выработок под углом 30° , при угле 90° напряжения в приконтурном массиве также выше. Оптимальным является угол 45° , при котором фактор концентрации напряжений снижается.

К вышеприведенным факторам при сопряжении выработок добавляются также увеличенный пролет, достигающий 10-12 м, что влечет за собой значительные обнажения кровли и появление дополнительных свободных поверхностей, сложная пространственная конфигурация сопряжения, изменение сечения горной выработки по мере приближения к сопряжению и наложение зон напряжений близко расположенных выработок.

Горнодобывающие предприятия регулярно сталкиваются с проблемой поддержания устойчивости сопряжений горных выработок. Высота купола обрушения может достигать полупролета выработки (рисунок 1.19).

Неточное определение механических характеристик приконтурного массива может привести, в случае их занижения, к перерасходу материалов для крепления, а в случае завышения – к потере устойчивости, в том числе к вывалу.



Рисунок 1.19 – Зона обрушения пород на сопряжении спирального съезда гор. +100 с рудоспуском на гор. +50 на руднике Айхал [32]

Двумя основными проблемами при оценке напряженно-деформированного состояния на сопряжениях являются качественная оценка возникающих напряжений в кровле и боках выработок и определение зоны влияния сопряжения на прилегающие выработки.

К настоящему времени проведено достаточно большое количество исследований, посвященных взаимовлиянию пересекающихся выработок [71]. Большинство исследователей рассматривают влияние формы поперечного сечения, технологии строительства и вида крепи на формирование напряженно-деформированного состояния в окрестности сопряжения.

Простейшим способом учета изменения напряженно-деформированного состояния массива на сопряжениях является введение поправочного коэффициента, или коэффициента перехода, учитывающего влияние размера (ширины) выработки, а также воздействие других выработок. Такой подход принят в большинстве нормативных документов [56, 36, 56]. Он позволяет упростить расчеты, однако полученные значения завышены.

Альтернативой введению коэффициента, приводящей к более точным результатам, является расчет напряженно-деформированного состояния приконтурного массива в плоской постановке с определением эквивалентного пролета сечения [21,36]. Величина эквивалентного пролета изменяется в зависимости от глубины заложения, прочности вмещающих горных пород [16], а также зависит от угла сопряжения, конфигурации кровли, горно-геологических и горнотехнических условий.

При четырехстороннем сопряжении для определения эквивалентного пролета справедливо выражение (1.25) [36]:

$$b = \sqrt{b_1^2 + b_2^2}, \quad (1.25)$$

где b_1, b_2 – фактическая ширина сопрягающихся выработок, м.

Вышеприведенная формула определяет величину эквивалентного пролета как диагональ. Это не совсем верно с учетом того, что на практике на сопряжениях устраиваются закругления и пролет увеличивается на 10-20 %.

В работе [105] это учтено и предложено выражение (1.25) для определения эквивалентного пролета:

$$A_0 = (a_1 + a_2 + t) \cos \frac{\Psi}{2}, \quad (1.25)$$

где a_1, a_2 – ширина сопрягающихся выработок, м;

t – величина разрушения углового целика, м;

Ψ – угол примыкания, разветвления, пересечения или ответвления выработок, град.

В Инструкции по креплению [36], принятой на КФ АО «Апатит», эквивалентный пролет определяется как ширина наибольшей из сопрягаемых выработок.

Наиболее точный способ определения эквивалентного пролета – геометрически на плане для каждого конкретного сопряжения, вне зависимости от ширины сопрягающихся выработок и типа сопряжения.

Переход к плоской задаче упрощает решение и требует меньшее количество ресурсов, однако не может дать полного представления о процессах, происходящих в приконтурном массиве сопряжения горных выработок. Кроме того, существующие методики имеют ограничения по величине пролета до 7-8 м [44].

Что касается определения зоны влияния сопряжения выработок, то основные результаты в научной литературе и нормативных методиках сводятся к эмпирической оценке.

В Методике [36] сопряжение определяется как область взаимного влияния двух и более одиночных выработок при их соединении в одну, и участки спереди и сзади соединения на протяжении 10 м.

Некоторые исследователи определяют взаимное влияние выработок до размера целика между ними, равного 4-5 диаметрам (ширинам) большей выработки. Однако в исследовании [108,141] было выявлено, что зона повышенных деформаций крепей выработок, примыкающих к сопряжениям, находится в пределах 2-5 м, что гораздо меньше.

Трещиноватость, или блочность приконтурного массива вносит изменения в характер распределения напряжений [2]. Так, субгоризонтальные системы трещин практически не влияют на распределение напряжений в окрестности выработки. Однако

это касается только систем трещин, определяющих слоистость массива. При блочном характере трещиноватости картина распределения напряжений качественно меняется.

Таким образом, наиболее значимыми факторами, меняющими напряженное состояние на сопряжениях, являются пространственная конфигурация сопряжения и характеристики блочности массива в приконтурной зоне.

1.5 Анализ методов оценки устойчивости породных обнажений на участках сопряжений

Устойчивость горной выработки – это ее способность сохранять форму и размеры поперечного сечения, заданные по условиям эксплуатации. В зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий – глубины, физико-механических свойств вмещающего массива, геометрии обнажений, в литературе различают три основных типа потери устойчивости: образование заколов (шелушение); чрезмерные смещения с незначительным нарушением сплошности массива и обрушение части массива в пространство выработки [10], как обозначено на рисунке 1.20.

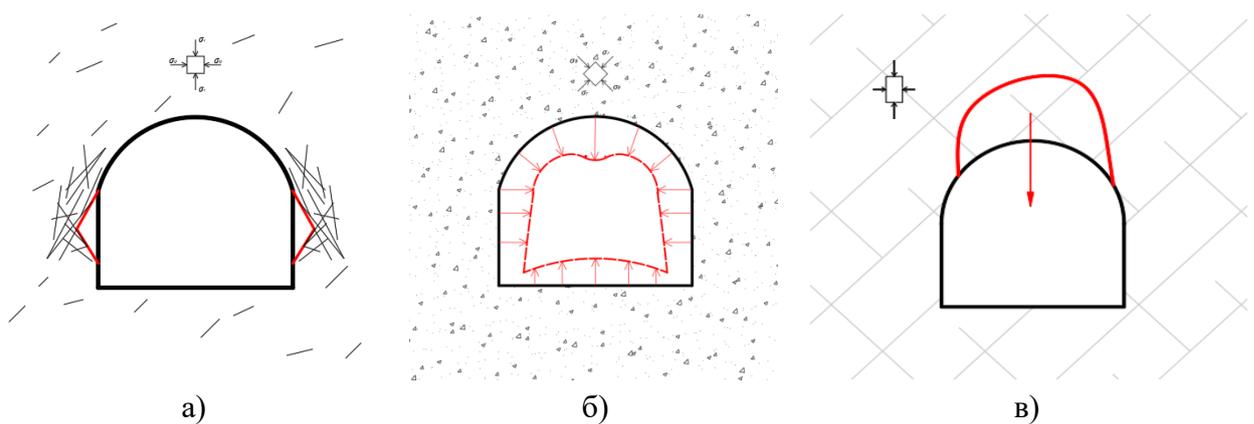


Рисунок 1.20 – Формы потери устойчивости горных выработок: а –

заколообразование; б – чрезмерные смещения; в – обрушение пород приконтурной зоны

Типы потери устойчивости, представленные на рисунке 1.20 а, б, характерны для перенапряженных массивов горных пород с различным соотношением горизонтальных и вертикальных напряжений. Механизм обрушения части массива отличается в зависимости от условий: при высоких исходных значениях напряжений разрушение массива происходит в зонах концентрации при превышении напряжениями в пределах данных зон прочностных характеристик горных пород.

При гравитационном поле напряжений и принятом допущении о том, что начальное напряженное состояние массива не оказывает влияния на степень устойчивости выработки, в качестве причины потери устойчивости принимается собственный вес породных блоков. В этом случае на устойчивость влияют прочность

горных пород, степень нарушенности массива, механические параметры трещин, а также геометрические параметры сопряжения горных выработок.

Основным условием устойчивости незакрепленной горной выработки считается непревышение максимальным главным напряжением, действующим на контуре, предела прочности пород на сжатие. Однако, разработаны и другие критерии, в том числе деформационный, прочностной, временной, балльный. Подходы, использующие в качестве основы расчета деформационный и прочностной критерии, приняты в нормативных актах [56] и локальных нормативных документах предприятий [21]. Существующие на данный момент методы оценки устойчивости выработок и параметров ожидаемого напряженно-деформируемого состояния вмещающего массива позволяют рассчитать, как правило, лишь отдельные виды деформаций породных обнажений и применимы в узком диапазоне условий конкретных регионов, в большинстве случаев носят эмпирический характер (таблица 1.7).

Таблица 1.7 – Описание критериев устойчивости

Критерий	Описание
Деформационный критерий (СП 91.13330.2012)	$U = U_T K_\alpha K_\theta K_S K_B K_t,$ U_T – типовое смещение пород, принятое за типовое, зависит от значений расчетного сопротивления пород и расчетной глубины расположения выработки; K_α – коэффициент влияния угла залегания пород и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиностойкости; K_θ – коэффициент направления смещения пород, учитывающий угол залегания пород α , угол θ между вертикалью и направлением проведения выработки; K_S – коэффициент влияния размера выработки, зависящий от ширины выработки; K_B – коэффициент воздействия других выработок; K_t – коэффициент влияния времени возведения крепи.
Временной критерий (ВСН-126-90)	$t^{np} = KS,$ где K – коэффициент ответственности прогноза, сут/МПа; S – характеристическая прочность на одноосное сжатие грунта в массиве (определяется с учетом семи поправочных коэффициентов, характеризующих трещиноватость), МПа.
Балльный критерий (проф. Н.С. Булычев)	$S = f \frac{K_M K_R K_W}{K_N K_t K_A K_\alpha},$ где f – коэффициент крепости по М.М. Протоdjаконову; $K_M, K_N, K_R, K_W, K_t, K_A, K_\alpha$ – коэффициенты, характеризующие или учитывающие соответственно влияние степени трещиноватости пород, число систем трещин, влияние шероховатости стенок трещин, увлажнение пород, влияние раскрытия незаполненных трещин, заполнение трещин раздробленной породой или вторичными материалами, ориентировку выработки относительно наиболее развитой системы трещин.

Продолжение таблицы 1.7

Критерий	Описание
Критерий напряженности элементов выработки (О.В. Тимофеев)	$P_{д,в} = \frac{\sigma_n K_1 K_2}{R K_c \xi_c K_y} \cdot \frac{K_3}{\xi_d}$ <p>где σ – напряжения в нетронутом массиве по заданному направлению, МПа; K_1 – коэффициент концентрации напряжений вследствие проведения выработки ($K_1 = 2 \div 2,8$); K_2 – коэффициент изменения напряжений в результате влияния других выработок ($K_2 \geq 1$); R – сопротивление пород в образце одноосному сжатию, МПа; K_c – коэффициент структурного ослабления массива за счет трещиноватости и слоистости ($K_c \leq 1$); K_3 – коэффициент дополнительной концентрации напряжений; K_y – коэффициент упрочнения; ξ_d – коэффициент усталостной прочности пород.</p>
Критерий напряженности элементов выработки (В.Л. Трушко)	$P_B = \frac{\sigma K_1 K_2}{R K_c \xi_B}$ <p>где σ – статическое вертикальное напряжение в нетронутом массива, МПа; K_1 – коэффициент концентрации напряжений вследствие проведения выработки; K_2 – коэффициент концентрации напряжений вследствие влияния других выработок; R – сопротивление пород в образце одноосному сжатию, МПа; K_c – коэффициент структурного ослабления массива за счет трещиноватости и слоистости; ξ_B – коэффициент, учитывающий снижение сопротивления породы вследствие водонасыщения.</p>

Категории устойчивости, определяемые этими критериями, чаще всего объединены в четыре состояния – устойчивое, средней устойчивости, неустойчивое, очень неустойчивое. В рассмотренных критериях не представлен комплексный учет всех параметров, оказывающих влияние на выработку сложной геометрии в трещиноватом массиве. Влияние трещиноватости массива лучше всего учтено в балльном критерии введением сразу нескольких коэффициентов, однако, в данном критерии полностью отсутствует учет геометрии выработки. Коэффициент воздействия других выработок, который необходимо учитывать при расчете сопряжения, предусмотрен в деформационном критерии и в критерии напряженности элементов выработки. В критерии напряженности, предложенном О.В. Тимофеевым, изменение напряжений вследствие влияния других выработок вводится лишь эмпирическим коэффициентом K_2 .

Кроме того, ни в одном из представленных критериев не учитывается влияние естественного поля напряжений в массиве до начала проходки выработок. Таким

образом, критерии применимы в условиях, в которых напряженное состояние не оказывает значительного влияния на устойчивость выработки, и потеря устойчивости происходит под собственным весом приконтурной части массива.

Данные критерии основаны на обобщении большого количества данных и имеют достаточно узкий диапазон применения: использование каждого из них некорректно при расчете устойчивости сопряжения горных выработок в трещиноватых массивах.

Тем не менее, исследователи занимаются проблемой оценки устойчивости на сопряжениях и разработкой более универсальных критериев.

1.6 Анализ методов расчета нагрузки на крепь сопряжений горных выработок

Выбор конструкции крепи и расчет ее параметров – комплексная задача, включающая в себя несколько этапов (рисунок 1.21). Параметры крепления рассчитываются в соответствии с данными о структурной нарушенности массива, полученными через рейтинговые классификации (RMR, Q или другие) [106,89,129,122] или коэффициенты структурного ослабления [36]. При данных подходах определяется расчетная прочность пород и сравнивается с предельной прочностью на сжатие. Исходя из полученных величин проводится оценка размеров нарушенных зон.

Первые два этапа – оценка устойчивости незакрепленной выработки и вытекающая из этого величина нагрузки на крепь – определяются методами численного моделирования или по результатам эмпирических расчетов. Полученные значения характеризуются величиной смещений контура выработки или размерами зоны потенциального обрушения. На расчет крепи влияет также характер распространения нарушений – локальный или по всему периметру крепи. Выбор оптимальной конструкции крепи осуществляется после установления прогнозного типа потери устойчивости приконтурного массива выработки или сопряжения.

Оптимальная конструкция выбирается исходя из типа структурной нарушенности вмещающего массива [106]. В случае с анкерной крепью результирующим параметром является длина анкеров, которая выбирается исходя из их назначения: крепление нарушенного участка, или упрочнение приконтурного массива (рисунок 1.22).

В случае с набрызгбетонной крепью необходимо определиться с такими ее параметрами, как толщина, наличие в составе фибры и участки нанесения.

Оценка устойчивости незакрепленной выработки

- исходные горо-геологические данные: структурно-текстурные элементы (макродефекты строения), прочностные, деформационные свойства вмещающих пород, обводненность, наличие остаточных тектонических напряжений, склонность пород к динамическими формам проявления горного давления, горнотехнические данные (форма, размеры и площадь сечения сооружения, глубина расположения, расположение относительно других выработок)
- прогнозирование смещений пород
- прогнозирование зоны возможного обрушения

Определение нагрузки на крепь

- постоянные нагрузки: контактные силы, воздействующие на крепь вследствие деформационного ее взаимодействия с массивом горных пород, давление горных пород со стороны массива, свободно действующий на крепь вес горных пород
- временные нагрузки: вес стационарного оборудования; температурные климатические воздействия; воздействия усадки и ползучести бетона

Выбор оптимальной конструкции крепи

- тип крепи выбирается исходя из категории, прогнозного типа потери устойчивости
- рамная, набрызгбетонная, анкерная, комбинированная

Расчет элементов крепи

- осуществляется по существующим методикам:
 - по первому предельному состоянию
 - по второму предельному состоянию

Рисунок 1.21 – Этапы расчета крепи [56,37]

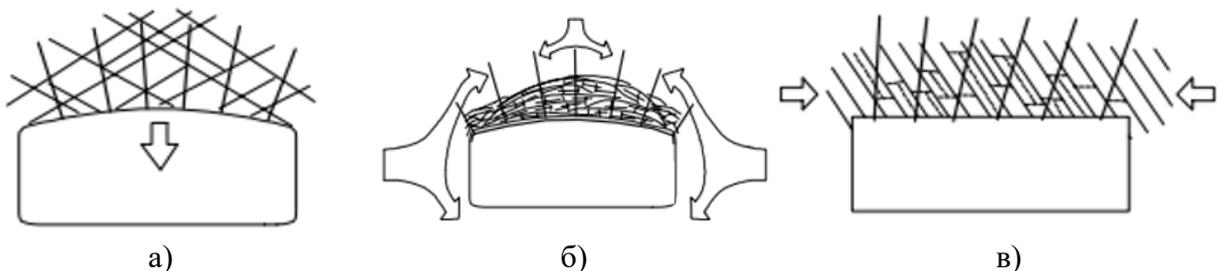


Рисунок 1.22 – Назначение анкеров: а – удержание (блочный массив, гравитационное поле напряжений); б – поддержание (при возможности хрупкого разрушения приконтурного массива под действием значительны напряжений); в – укрепление (при наличии поверхностей скольжения и блочности массива) [106]

Аналитическим обоснованием объема пород, который действует на крепь выработки после установления равновесного состояния в массиве, занимались многие ученые, начиная с XX столетия. Обобщающей гипотезой является теория сводообразования, сформулированная проф. М.М. Протодяконовым, согласно которой вес пород определяется крепостью пород f и полупролетом выработки a . Нагрузка на крепь при таком подходе пропорциональна размерам выработки, но не зависит от формы и глубины расположения выработки. Не принимаются во внимание также свойства горных пород и технологические схемы возведения крепи. При таком подходе даже при начальном минимальном сцеплении нагрузка на крепь равна нулю.

Дальнейшие исследования показали, что в случае сильно нарушенных или несвязных пород вокруг выработки могут образовываться призмы сползания, которые увеличивают пролет выработки на величину, зависящую от высоты выработки и угла внутреннего трения пород.

По нормативным методикам величина зоны нарушенных пород определяется эмпирически (1.26):

$$b = \frac{a}{f \cdot K_c}, \quad (1.26)$$

где a – полупролет выработки в проходке, м;

f – коэффициент крепости пород по классификации М. М. Протодяконова;

K_c – коэффициент структурно-текстурного ослабления пород.

Нормативная нагрузка от веса пород в пределах указанной зоны P_B определяется из выражения (1.27). Расчет строится на предположении, что нагрузка действует вертикально:

$$P_B = \gamma \cdot b, \quad (1.27)$$

где γ – объемный вес пород кровли в пределах возможного вывала, кН/м³;

b – высота зоны опасных деформаций и возможного вывала пород кровли выработки, м.

Расчетная вертикальная нагрузка $P_{B.H}$ определяется из выражения (1.28):

$$P_{B.H} = K_{\Pi} K_H m_B P_B = \frac{K_{\Pi} \cdot K_H \cdot m_B \cdot \gamma \cdot a}{f \cdot K_c}, \quad (1.28)$$

где K_{Π} – коэффициент перегрузки, принимаемый для главных вскрывающих выработок и камер – 1,25, для магистральных и других выработок – 1,1;

K_H – коэффициент, учитывающий назначение выработки: для главных вскрывающих выработок $K_H = 1,1$; для остальных $K_H = 1$;

m_B – коэффициент, учитывающий влияние способа проведения выработки, при буровзрывном способе $m_B = 1$.

Для расчета нагрузок на крепи сопряжений по вышеприведенным формулам можно принимать величину эквивалентного пролета вместо ширины одиночной выработки. Данный метод не учитывает структурную нарушенность и напряженное состояние массива пород перед проведением выработок.

В соответствии с Методикой [36], прогноз нагрузок на крепь сопряжений определяется аналогично. Нормативная нагрузка на крепь может определяться также по графику в зависимости от расчетных смещений породного контура (рисунок 1.23). Расчетные смещения устанавливаются в соответствии с формулой, приведенной в таблице 1.7.

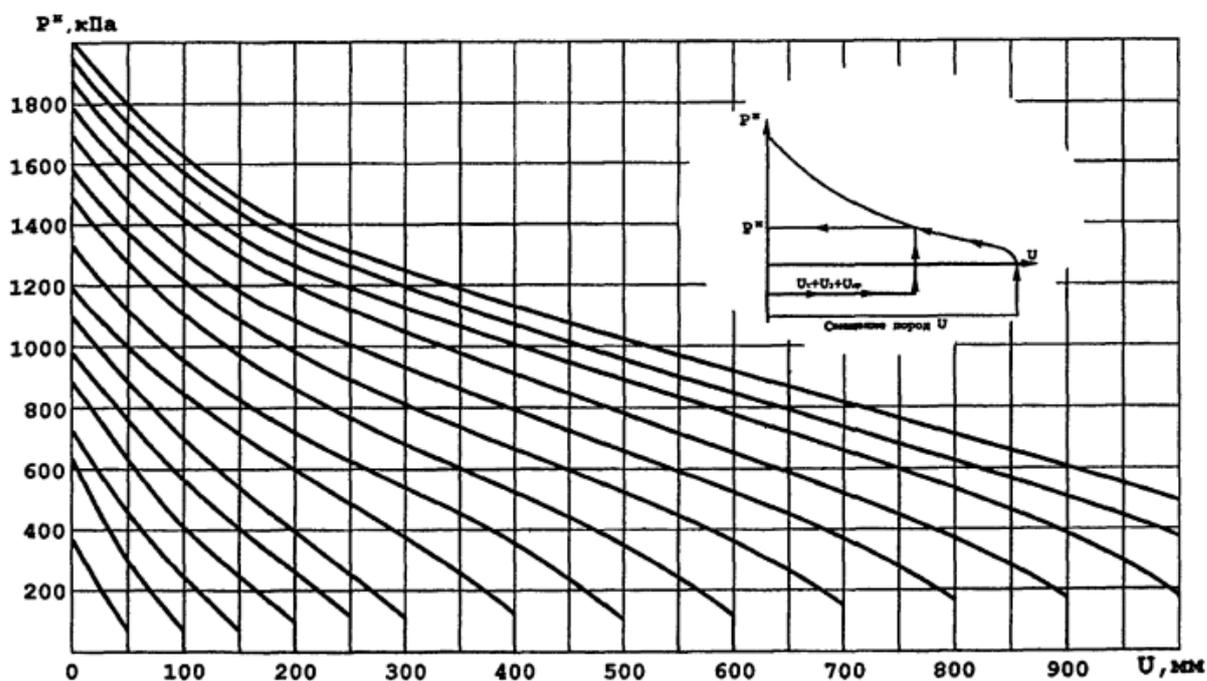


Рисунок 1.23 – График для определения нормативной нагрузки на жесткую крепь [36]

1.7 Выводы по Главе 1

Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, призваны обосновать рациональность учета структурной нарушенности в окрестности сопряжений горных выработок в явном виде. Целью работы является повышение достоверности прогноза нагрузок на крепь сопряжений горных выработок при их проектировании, строительстве и эксплуатации в структурно нарушенных горных массивах при разработке апатит-нефелиновых месторождений. В связи с этим первая глава состоит из двух логических разделов – рассмотрение и анализ современных методов описания структурной нарушенности, а также анализ разработанных методов прогноза

напряженно-деформированного состояния и устойчивости породного контура на участках сопряжений горных выработок.

Трещиноватость породного массива оказывает значительное влияние на механические свойства пород и устойчивость обнажений. В рамках анализа методов описания структурной нарушенности рассмотрены существующие классификации трещиноватых массивов и параметры, качественно и количественно описывающие нарушения. Из всех возможных вариантов трещиноватости – слоистости, хаотической трещиноватости и так далее, наибольший интерес в рамках работы представляет блочный массив, формирующийся при наличии нескольких взаимно пересекающихся систем трещин. Блоки, или отдельности, склонны к потере устойчивости при обнажении и могут приводить к вывалам при проведении выработок, кроме того, в целом снижается прочность, жесткость массива и наблюдается анизотропия свойств.

Грамотный и полный учет всех этих параметров может предотвратить потерю устойчивости при строительстве выработки. Для условий одиночных выработок разработано множество методов прогноза устойчивости приконтурного массива, дающих результаты различной точности в зависимости от условий. Сходимость решений с натурными данными может быть достигнута даже при плоской постановке задачи. Однако сопряжения горных выработок характеризуются сложной пространственной конфигурацией и большим пролетом обнажения, что обуславливает необходимость рассмотрения пространственной задачи и делает практически невозможным применение аналитических методов из-за их математической сложности или эмпирических методов из-за их узкой области применения. Сложность прогноза напряженно-деформированного состояния массива на сопряжениях горных выработок повышается при их расположении в блочных горных породах. Исследования показывают, что поведение блочного массива описывается не только механическими свойствами горной породы, получаемыми из лабораторных испытаний, но также и механическими свойствами по контактам трещин и поверхностей ослабления.

Единственным на настоящий момент методом, позволяющим комплексно решить обе поставленные задачи, является численное моделирование. Численное моделирование обеспечивает учет натуральных параметров массива с минимальной степенью упрощения. При выборе подхода к моделированию среды следует обратить внимание, что представление массива в качестве сплошной среды позволяет получить приемлемые результаты при минимальном количестве исходных данных и ускорить расчет, однако результатом может стать лишь качественная оценка области предположительной потери устойчивости, однако таким методом невозможно предсказать характер потери

устойчивости. Представление массива в виде набора дискретных блоков позволяет спрогнозировать обрушение и определить параметры зоны возможного обрушения, однако метод требователен к ресурсам, кроме того, на настоящий момент не существует достаточно точных геофизических методов, позволяющих достоверно описать трещиноватость внутри массива.

В качестве компромисса данных двух методов выдвинуто предположение о том, что достоверный прогноз напряженно-деформированного состояния приконтурного массива на сопряжениях горных выработок может осуществляться при моделировании сопряжения в пространственной постановке с заданием некоторой зоны приконтурного массива в виде блочной дискретной среды, при этом остальной массив задается в виде сплошной среды с эквивалентными свойствами. При отсутствии подробных данных о трещиноватости необходимо разработать методику, позволяющую достоверно описать параметры зоны возможного обрушения.

Таким образом, в диссертационной работе поставлены следующие задачи:

1. Анализ типов структурной нарушенности горных пород и выделение основных видов нарушений на апатит-нефелиновых месторождениях на основании обработки данных геологического картирования.

2. Разработка методики численного моделирования и алгоритма построения численных моделей для прогноза развития геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок с различными геометрическими параметрами.

3. Исследование формирования напряженно- деформированного состояния породного массива в окрестности сопряжений горных выработок методами механики сплошной и дискретной сред.

4. Исследование влияния горно-геологических, геомеханических и горнотехнических факторов на устойчивость сопряжений горных выработок и формирование нагрузок на крепь.

5. Разработка методики оценки устойчивости горных выработок и прогноза нагрузок на крепь сопряжений в структурно-нарушенных массивах горных пород.

Исходя из вышесказанного, актуальной задачей является выявление закономерностей изменения напряженно- деформированного состояния структурно-нарушенного массива горных пород для условий месторождений апатит-нефелиновых руд и повышение достоверности прогноза нагрузок на крепь сопряжений горных выработок, расположенных в таких условиях.

ГЛАВА 2 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА НА УЧАСТКАХ СОПРЯЖЕНИЙ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

2.1 Общие положения

Наиболее полно учесть все возможные геометрические и механические свойства нарушенного массива, вмещающего сопряжение горных выработок, позволяет применение численного моделирования. Однако решение любой геомеханической задачи подразумевает некоторую степень упрощения, обусловленную качеством и количеством исходных данных, а также имеющимися расчетными мощностями.

Калибровка численных моделей, а именно оценка достоверности получаемых расчетных результатов, производится по данным натуральных наблюдений. Данные могут быть получены на основании геомеханического мониторинга [41], представляющего собой комплексную систему наблюдений за изменениями напряженно-деформированного состояния массива, параметрами взаимодействия массива с выработками и крепью, динамическими процессами. Данные о массиве, которые в дальнейшем подвергаются обработке, получают непосредственно в массиве или в лабораторных условиях (например, при определении прочностных свойств горных пород).

Результаты геомеханического мониторинга могут быть использованы для прогноза формы потери устойчивости обнажения, а также для оценки влияния на устойчивость таких факторов, как параметры поля напряженного состояния массива, структурная нарушенность, зоны разуплотнения вмещающих пород и другие.

При анализе и приближенной оценке величины напряжений на обследуемом участке могут применяться визуальные методы – анализ трещиноватости массива, внешних признаков потери устойчивости.

В случае строительства выработок в структурно-нарушенных массивах необходимость проведения натуральных исследований обусловлена значительным отличием свойств в массиве от свойств в образце. Влияние оказывает сложное напряженное состояние массива, масштабный эффект, наличие нарушений.

2.2 Натурные исследования механизма формирования горного давления на участках сопряжений горных выработок

2.2.1 Методика исследований

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

Картирование горных выработок является одним из способов выявления систем трещин, на основе параметров которых в дальнейшем определяется прочность массива. Оно позволяет в короткие сроки оценить напряженное состояние массива на большой площади горных работ.

Исходными данными являются расположение горной выработки (наименование блока, горизонта, выработки, участок выработки), проектные геометрические параметры горной выработки (длина, ширина, высота, высота подъема свода – при наличии) и результаты структурного картирования участка горной выработки (тип нарушения, азимут падения, угол падения, расстояние до соседней трещины, протяженность трещины, шероховатость стенок трещины, литология заполнителя, прочность заполнителя, раскрытие трещины, прочность стенок трещины).

Для оценки форм структурной нарушенности в журнал наблюдений занесены данные о расположении выработки, месте участка проявления горного давления, категории выработки и потенциально влияющих горнотехнических факторах. На основании анализа этих данных возможно соотнести категорию состояния выработки и преобладающие при таких условиях формы проявления горного давления.

В условиях средне- и сильнотрещиноватых массивов устойчивость обнажения в первую очередь зависит от количественных и качественных характеристик трещиноватости. Прочностные характеристики трещин и других нарушений на сдвиг в значительной степени зависят от шероховатости поверхности контакта. Шероховатость характеризуется коэффициентом шероховатости JRC [81]. Все разработанные натурные и лабораторные методы, позволяющие измерить шероховатость поверхности трещины, в целом подразделяются и «контактные» (непосредственное измерение) и «бесконтактные» (геофизические методы, лазерное сканирование, фотограмметрия [143]), позволяющие получить двумерную или пространственную топографию трещины, однако большинство разработанных методов дает наилучшие результаты при использовании на небольших образцах в лаборатории. Приведенные в разделе 2.2.3 характеристики контактов трещин определены в рамках работы ВНИМИ «Исследование устойчивости бортов и отвалов на карьерах комбината «Апатит» [41].

2.2.2 Результаты определения физико-механических свойств массива

Хибинский массив – крупнейшая многофазная интрузия, приуроченная к тектоническому контакту метаморфизированных образований архея и протерозоя (рисунок 2.1). Все слагающие массив породы, за исключением ийолит-уртитов и апатит-нефелиновых руд, принадлежат к семейству нефелиновых сиенитов, и отличаются текстурой и вещественным составом: хибиниты, рисчорриты, лявочорриты [40].

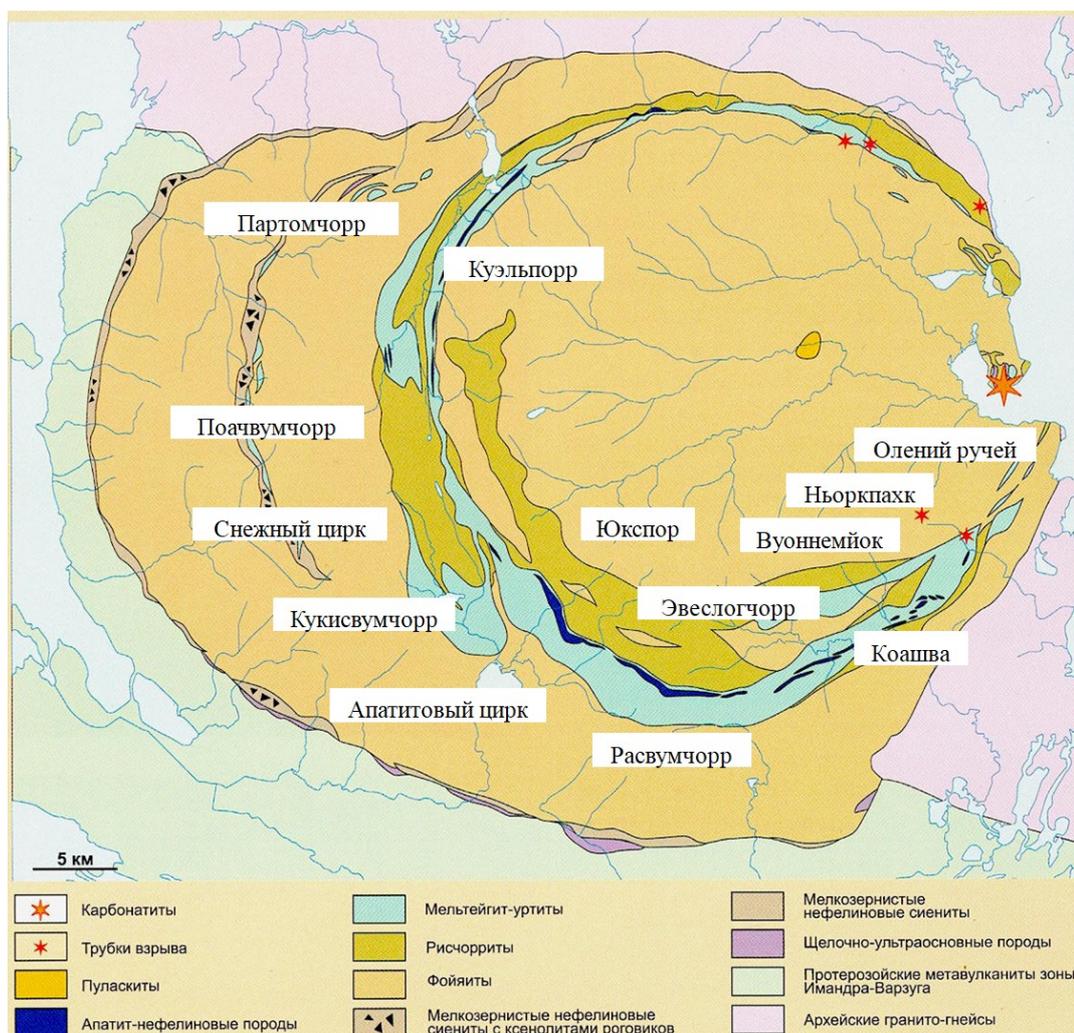


Рисунок 2.1 – Обзорная схема расположения апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива [41]

Исследования физико-механических свойств пород и руд апатит-нефелиновых месторождений данного региона производились с начала XX века такими организациями, как ВНИМИ, КНЦ РАН, Санкт-Петербургский горный университет [41] и отражены в работах ученых и исследователей [19,24,25,130].

Исследователями выделено несколько основных типов руд – богатая, линзовидно-полосчатая, полосчатая, пятнисто-полосчатая, сетчатая. Физико-механические свойства руд отличаются в зависимости от типа руд или месторождения. Наибольшие отличия наблюдаются для прочности образцов при одноосном сжатии и растяжении, наименьшая

вариативность свойств наблюдается для угла внутреннего трения. На основании полученных данных были построены гистограммы распределения свойств руд различных типов (рисунки 2.2, 2.3).

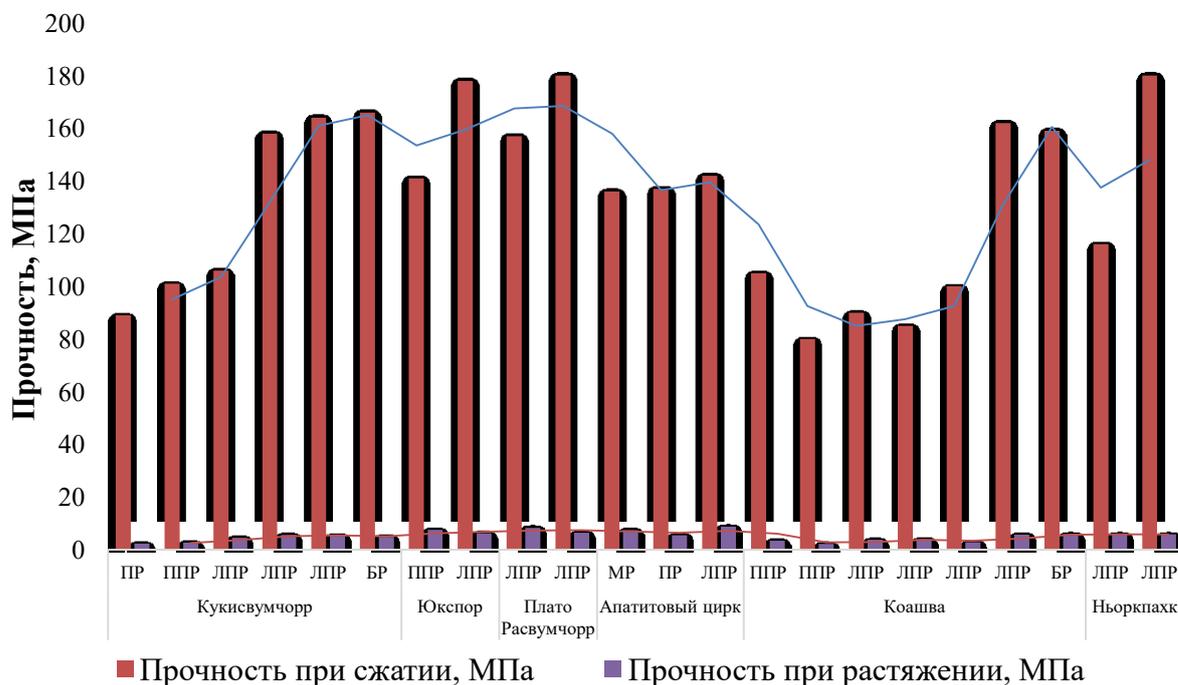


Рисунок 2.2 – Гистограмма распределения прочности при одноосном сжатии и растяжении для руд: ЛПР – линзовидно-полосчатая руда; ПР – полосчатая руда; БР – богатая руда; ППР – пятнисто-полосчатая руда, МР – массивная руда

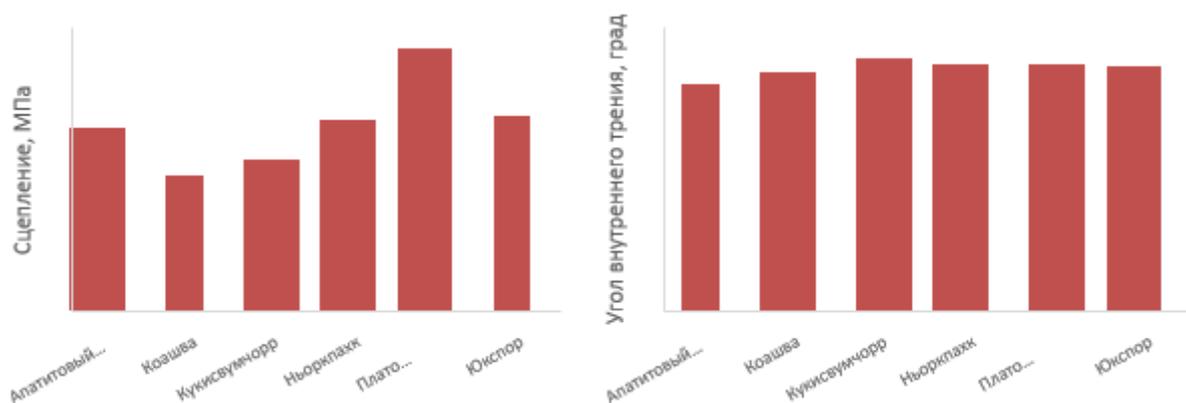


Рисунок 2.3 – Гистограмма распределения сцепления (а) и угла внутреннего трения (б) для всех типов руд

В рамках настоящих исследований физико-механические свойства руд усреднены и выделены в объединенный литотип – апатит-нефелиновые руды, так как все рассмотренные типы руд незначительно отличаются по параметрам структурной нарушенности и отличие в их кубиковой прочности не повлияет на результаты расчета в массиве.

На рисунках 2.4-2.5 приведены гистограммы распределения прочностных и деформационных свойств нескольких типов вмещающих пород – уртитов, рисчорритов, ийолитов, – для условий всех месторождений.

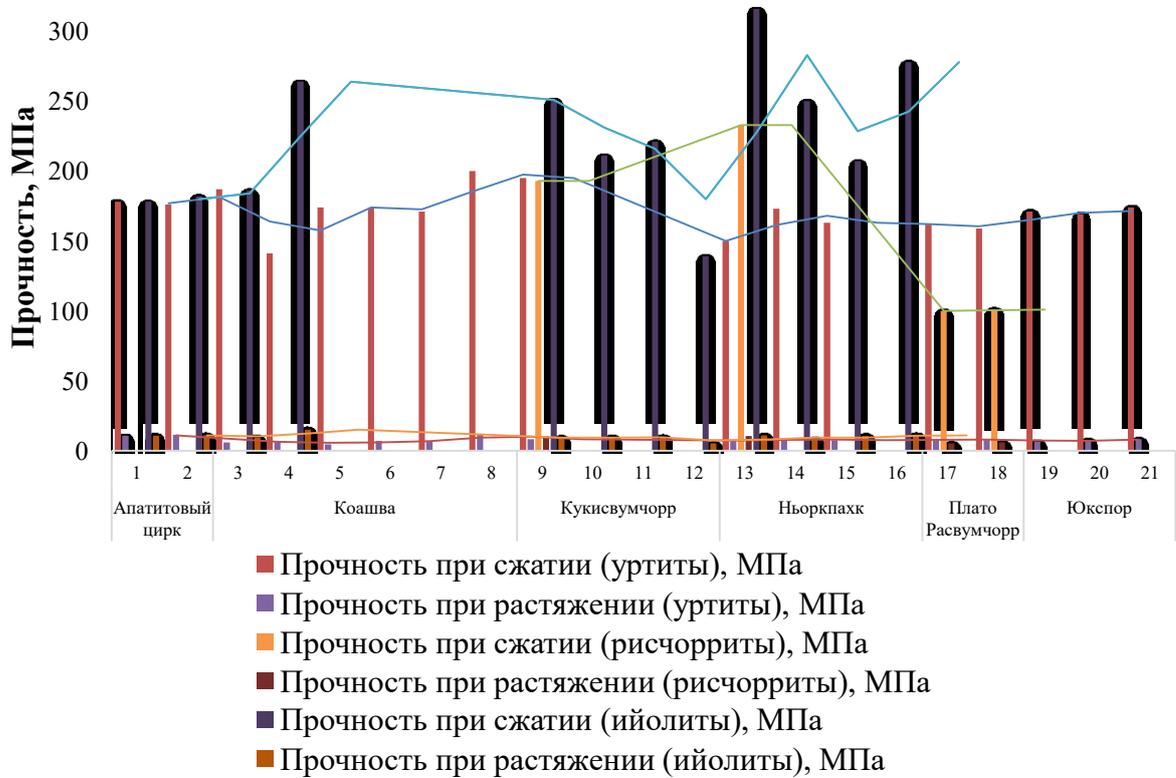


Рисунок 2.4 – Гистограмма распределения прочности при одноосном сжатии и растяжении для вмещающих пород

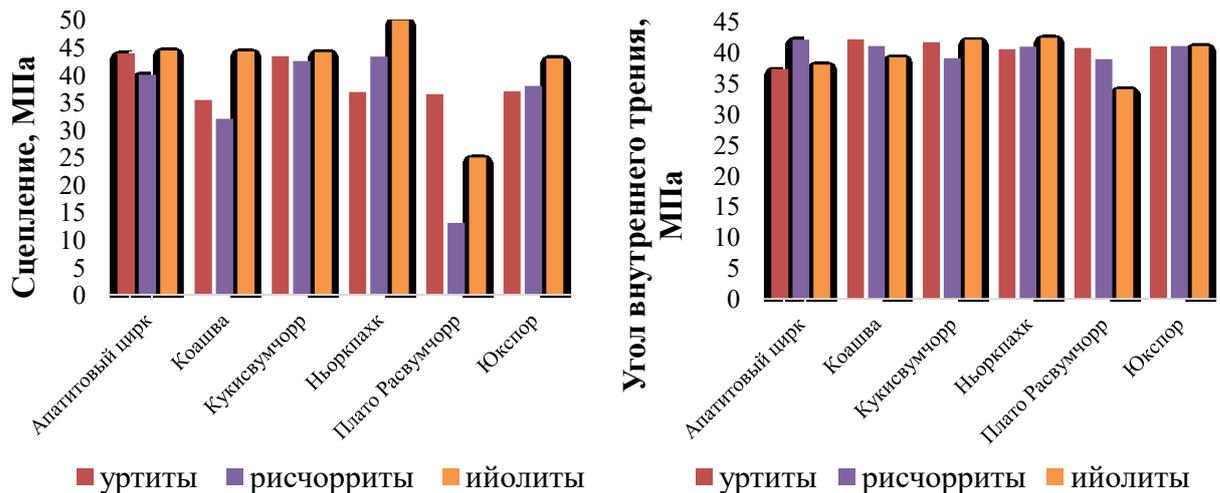


Рисунок 2.5 – Гистограмма распределения сцепления (а) и угла внутреннего трения (б) для вмещающих пород

Результаты статистического анализа и усреднения свойств по литотипам для дальнейшего численного моделирования блочных массивов представлены в разделе 3.2.1.

2.2.3 Результаты определения параметров структурной нарушенности массива

Для установления геометрических параметров трещиноватости массива проведен анализ данных картирования выработок Кировского рудника, расположенных на горизонтах в интервале +90 - +470 м. Данные о выработках представлены в таблице 2.1.

По результатам структурного картирования и определения нарушений в окрестности выработок построены круговые диаграммы трещиноватости (рисунок 2.6), на основании которых определены средние значения углов падения и азимутов простирания трещин.

В таблице 2.2 приведены параметры систем трещин, определяющие их пространственное расположение. На основании анализа данных физико-механических свойств и структурной нарушенности горных пород апатит-нефелиновых месторождений установлено, что в массивах чаще всего наблюдается более двух систем трещин. При наличии нескольких взаимно пересекающихся систем трещин образуются отдельности или блоки, характеризующиеся средним размером l , которые могут смещаться по поверхностям контактов. Пространственные построения систем трещиноватости на основании выделенных параметров приведены в главе 4.

На основании результатов структурного картирования и ожидаемого состояния горной выработки определяются показатели Q , GSI , а также определяется размер нарушенной зоны на протяженном участке выработки и на участке сопряжения. Расчетные формулы приведены в главе 1.

В главе 1 приведено обоснование необходимости достоверного определения контактных свойств поверхностей ослабления. ВНИМИ [41] были проведены лабораторные и натурные испытания пород для месторождений Плато Расвумчорр, Юкспорское, Апатитовый цирк, Кукисвумчоррское. Образцы пород в ходе проведения лабораторных исследований физико-механических свойств, испытывались в основном на косой срез. Результаты испытаний представлены в таблице 2.4.

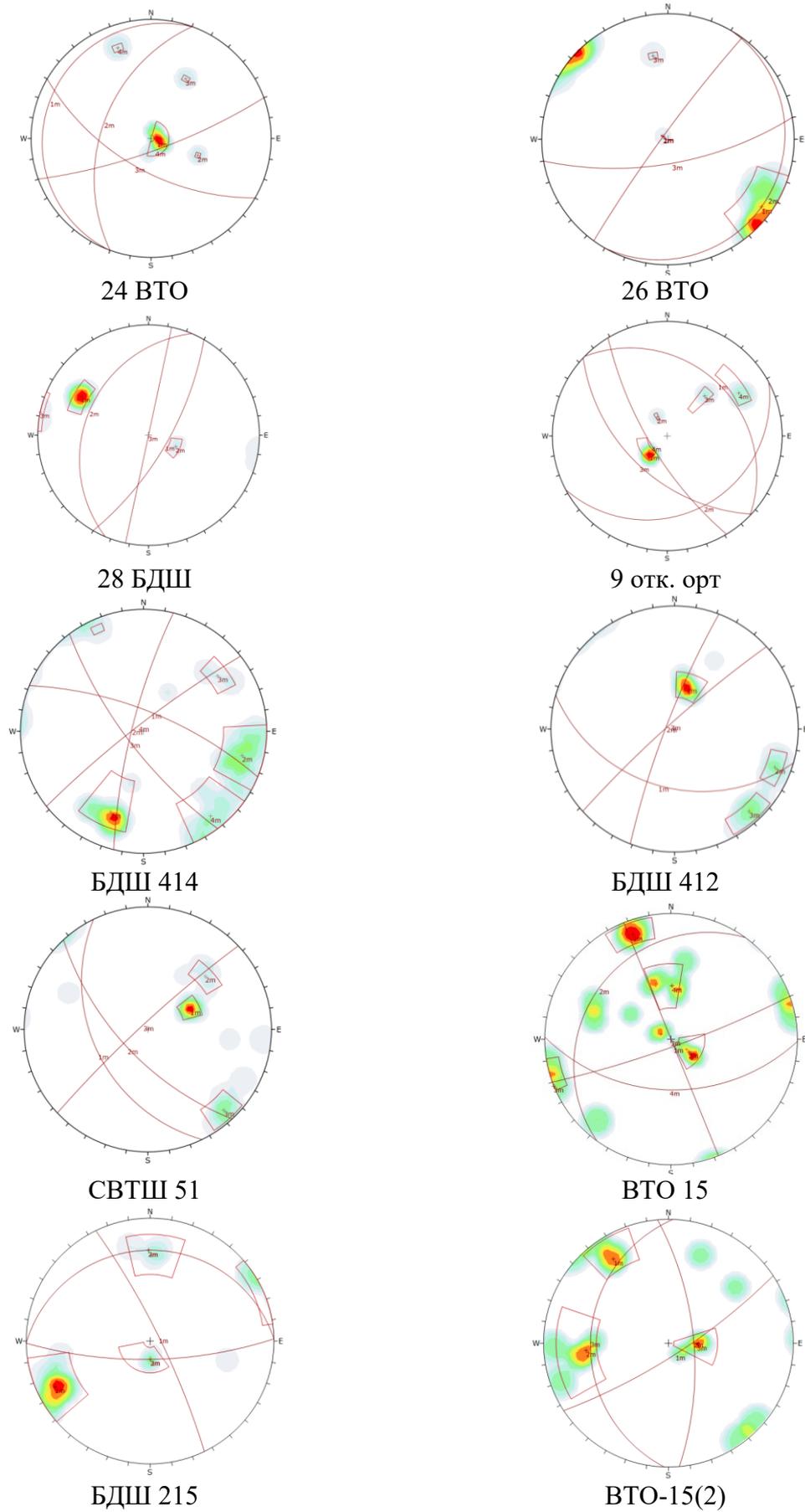


Рисунок 2.6 – Круговые диаграммы трещиноватости для выработок

Таблица 2.1 – Расположение горных выработок

Наименование рудника	Наименование блока	Наименование горизонта	Наименование выработки	Участок выработки	Длина выработки, м	Ширина выработки, м	Высота выработки, м
ОКР	7/12	+285	24 ВТО	от оси 22 БДШ на СВ	68	5,3	3,8
ОКР	7/12	+285	26 ВТО	С 218 БДШ на ЮЗ (ст. ЮВ)	12	4,8	4,5
ОКР	7/12	+285	28 БДШ	от оси 24 ВТО на СЗ	20	5	4
Кировский	9/12	+90	9 отк. орт	От мт 2/9 на В	3	4,1	3,6
Кировский	7/12	+375	БДШ 414	-	10	4,8	4,2
Кировский	7/12	+375 м	БДШ 412	-	10	4,8	4,2
Кировский	7/10	+400 м	СВТШ 51	-	12	4,5	4,1
Кировский	1/2П	+470 м	ВТО 15	-	8	4,6	4
Кировский	1/2П	+470 м	БДШ 215	-	5	4,6	4
Кировский	1/2П	+470 м	ВТО-15(2)	-	7	4,6	4

Таблица 2.2 – Выделенные системы трещин

Наименование выработки	1 система трещин			2 система трещин			3 система трещин			4 система трещин		
	угол падения	азимут падения	Ср. расстояние между трещинами, м	угол падения	азимут падения	Ср. расстояние между трещинами, м	угол падения	азимут падения	Ср. расстояние между трещинами, м	угол падения	азимут падения	Ср. расстояние между трещинами, м
24 ВТО	6,1	291,1	0,1	60	290	0,04	60	210	0,5	78	160	0,5
26 ВТО	85,60	305,9	0,08	5	120	0,05	68	170	0,05	-	-	-
28 БДШ	69,7	119,8	0,04	29,7	292,6	0,13	90	101,6	2	-	-	-
9 отк. орт	25	43,7	0,2	21	152,2	0,2	50,6	223,1	0,2	72,1	238,65	0,2
БДШ 414	70	216	0,55	77	120	1,05	67	50	0,6	77	146	0,4
БДШ 412	34	10	0,42	80	110	0,55	82	140	0,15	-	-	-
СВТШ 51	37	50	0,5	55	60	0,6	80	140	0,2	-	-	-
ВТО 15	83	160	0,3	17	306	0,05	90	68	0,1	60	175	0,2
БДШ 215	85	62	0,3	74	175	0,2	17	350	0,2	-	-	-
ВТО-15(2)	78	147	0,1	68	84	0,15	27	272	0,1	-	-	-

Таблица 2.3 – Результирующие показатели структурной нарушенности

Наименование выработки	Результирующие показатели структурной нарушенности							
	протяженный участок				сопряжение			
	RQD	GSI	Q	размер нарушенной зоны, м	RQD	GSI	Q	размер нарушенной зоны, м
24 ВТО	12,5	37,60	1,25	0,4	12,5	37,60	0,417	1,04
26 ВТО	59,92	68,96	23,97	0,05	59,25	68,96	7,99	0,13
28 БДШ	27	52,49	3,59	0,15	27	52,49	1,2	0,39
9 отк. орт	55	41,8	0,041	0,69	55	41,8	0,014	1,70
БДШ 414	72,5	67,5	1,81	0,23	72,5	67,5	0,6	0,57
БДШ 412	72,5	67,5	2,41	0,18	72,5	67,5	0,8	0,60
СВТШ 51	72,5	75,25	3,62	0,17	72,5	75,25	1,2	0,42
ВТО 15	15	24,8	0,1	0,86	15	24,8	0,033	2,15
БДШ 215	72,5	70	3,22	0,23	72,5	70	1,07	0,58
ВТО-15(2)	60	48,5	0,75	0,44	60	48,5	0,25	1,1

Таблица 2.4 – Результаты лабораторных испытаний пород по контактам

Наименование породы	Глубина залегания трещины	Вторичные изменения по трещине	Сцепление С, Па	Угол трения по контакту φ, град
Рисчоррит	304,15	Цеолит, шпреуштейн	6,3	34
Уртит шпреуштейнизированный	240,69	Цеолит, эгирин, сфен	5,5	35
Уртит шпреуштейнизированный	247,24	Цеолит, слабо сфен	7,4	23
Уртит шпреуштейнизированный	251,10	Цеолит, шпреуштейн	14	17
Уртит	467,24	Цеолит	8,5	35
Уртит	474,90	Шпреуштейн, слабо сфен	Обр. разрушен	
Ийолит	349,02	Шпреуштейн	8,5	-
Мельтейгит	248,32	Ожелезнение, цеолит	8	-
Ийолит	356,28	Слюдит	9	-
Ийолит	356,53	Слюдит	8,8	-
Ийолит	358,11	Цеолит, шпреуштейн	7,6	-
Уртит	484,20	Цеолит	6,2	-
Уртит	294,46	Цеолит	6	-

2.2.4 Результаты исследований форм потери устойчивости в выработках

Все возможные наблюдаемые формы проявления горного давления на трех месторождениях объединены по участкам проявления: на протяженной части выработки, непосредственно на сопряжении и в зоне влияния сопряжения.

Большая часть горных выработок на всех рудниках проходит по массиву руд или вмещающих пород, однако встречаются участки дополнительных нарушений, окисленные зоны или зоны шпреуштейнизации. Чаше всего пересечения выработками таких зон приводит к вывалообразованию в кровле и стенках выработки или к динамическим проявлениям горного давления. Однако, по результатам многолетних наблюдений можно выделить четыре основных типа причин вывалообразования и других форм проявления горного давления. В данном разделе проведен анализ влияния каждого из нижеприведенных факторов на тип и степень проявления горного давления. Для удобства укрупненного анализа все факторы объединены в четыре подгруппы, пояснения к которым приведены на диаграмме (рисунок 2.7).

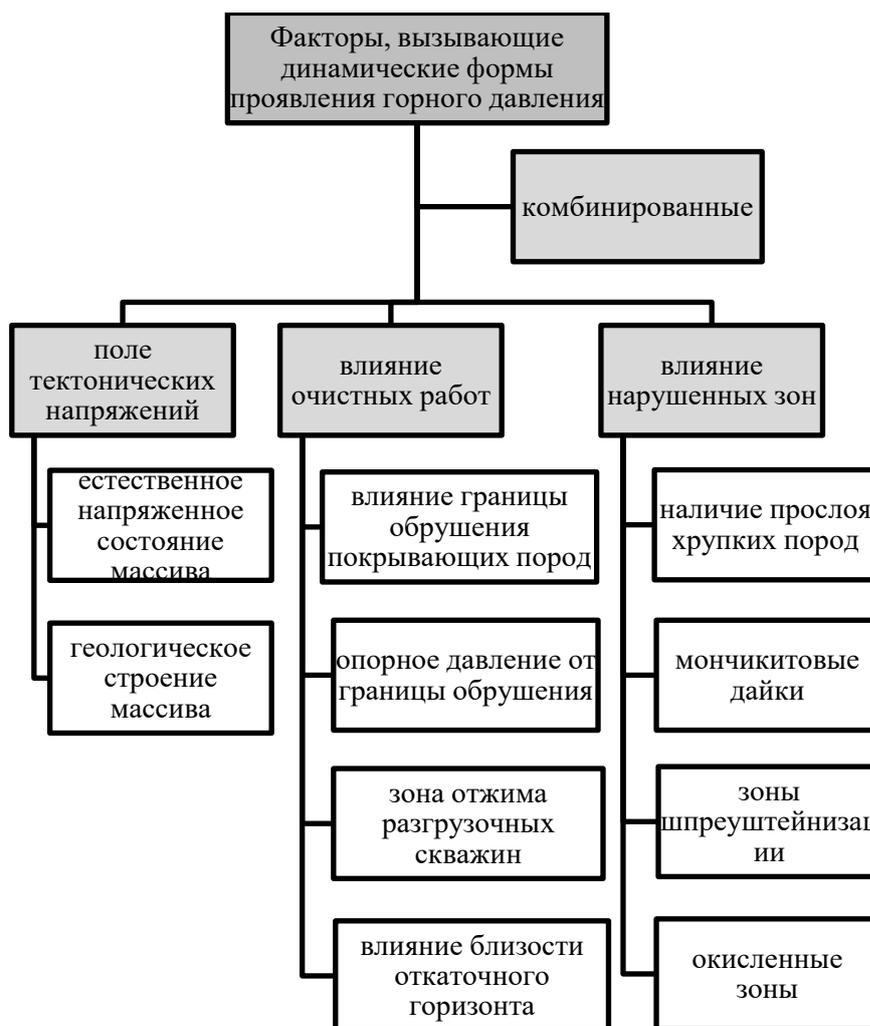


Рисунок 2.7 – Диаграмма факторов, влияющих на нарушение устойчивости выработок

Рудники Хибинского массива характеризуются сложным литологическим строением и тектоническим напряженным состоянием. На плане буродоставочного горизонта рудника Кукисвумчорр (рисунок 2.8) выделены зоны шпреуштейнизации и окисленные зоны.

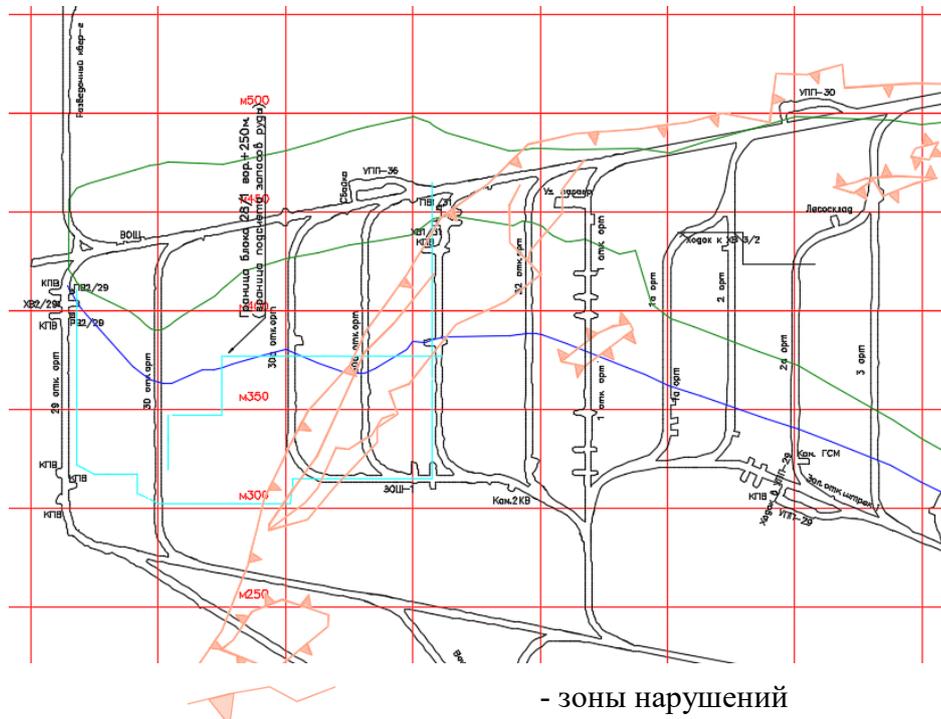


Рисунок 2.8 – План горизонта +250 рудника Кукисвумчорр

В результате обработки данных наблюдений за выработками на апатит-нефелиновых месторождениях установлено процентное соотношение наиболее частых причин нарушения устойчивости приконтурных зон выработок (рисунки 2.9-2.11).

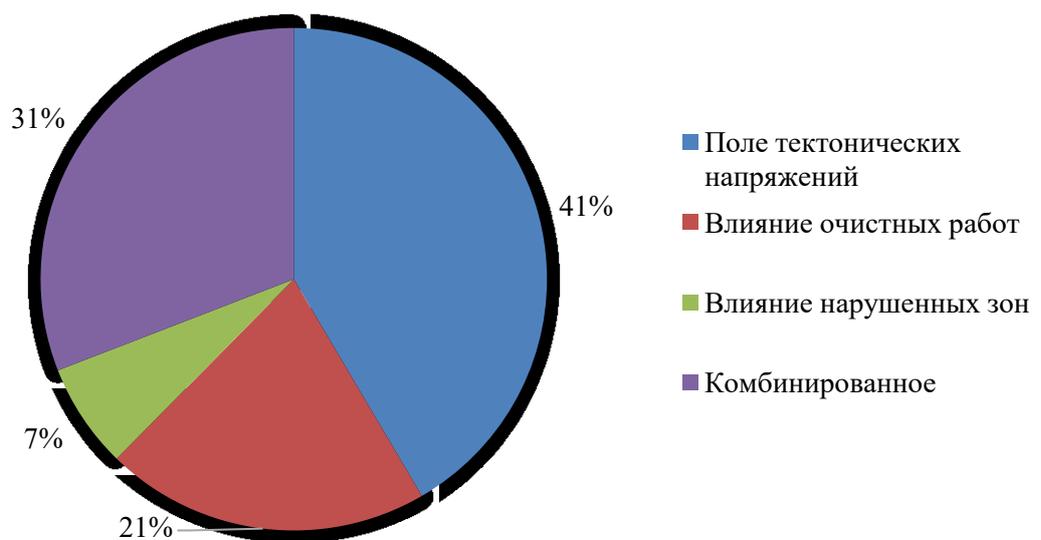


Рисунок 2.9 – Распределение причин потери устойчивости на протяженных участках выработок

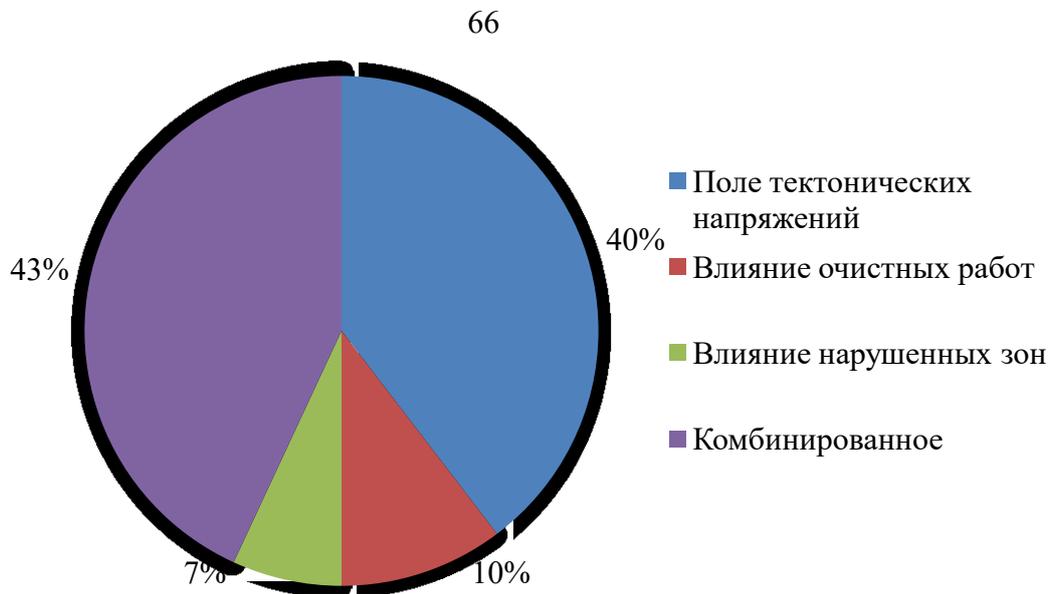


Рисунок 2.10 - Распределение причин потери устойчивости на сопряжениях горных выработок

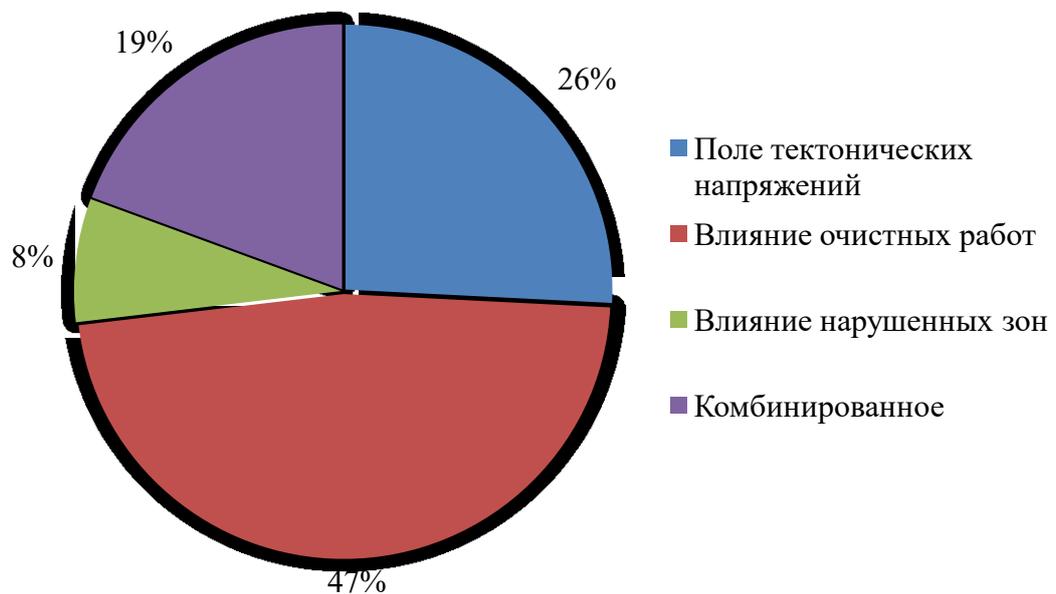


Рисунок 2.11 – Распределение причин потери устойчивости в зонах влияния сопряжений горных выработок

Установлено, что на протяженных участках выработок, не подверженных влиянию сопряжений, наиболее частой причиной нарушения устойчивости является влияние естественного поля напряжений. Для апатит-нефелиновых месторождений характерно превышение горизонтальными (тектоническими) компонентами вертикальных (гравитационных). Чаще всего при таких условиях происходит хрупкое разрушение контура выработки (рисунок 2.12, а). Блоки горной породы при этом оказываются зажатыми в массиве под влиянием тектонических напряжений. Выпадение блоков из массива возможно только при комбинации нескольких влияющих факторов

(рисунки 2.10, 2.11) – естественное поле напряжений составляет хоть и значительную, но меньшую долю при установлении причин обрушений.



а)

б)

Рисунок 2.12 – Пример хрупкого разрушения контура выработки (а) и обрушения по зоне ослабления (б)

Более подробно необходимо рассмотреть комбинацию факторов. Несмотря на то, что невозможно выделить процентное соотношение степени влияния каждого из факторов при их совместном влиянии, чаще всего наблюдается совместное действие естественного напряженного состояния и влияния очистных работ. Приближение очистных работ приводит к концентрации напряжений до 4-5 раз.

На рисунке 2.13 рассмотрены только комбинированные факторы, наблюдаемые на участках сопряжений или в зонах влияния сопряжения. Непосредственно на сопряжении к обрушению в большинстве случаев приводит именно комбинация факторов.

При структурном картировании и описании нарушений производятся зарисовки, либо фотофиксация размеров и конфигурации нарушений в выработках и на сопряжениях выработок.

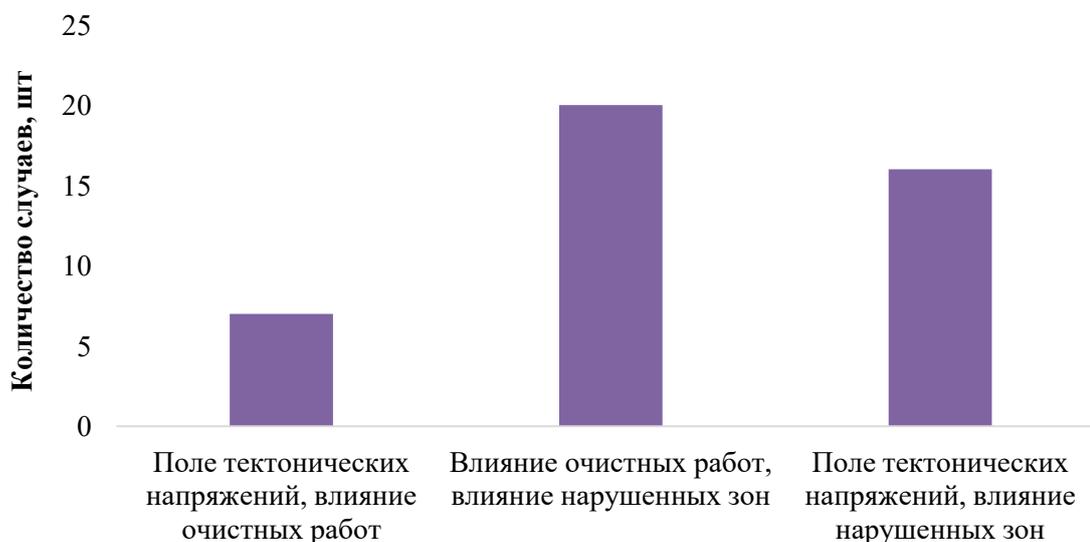


Рисунок 2.13 – Соотношение факторов при потере устойчивости в результате нескольких причин на сопряжениях

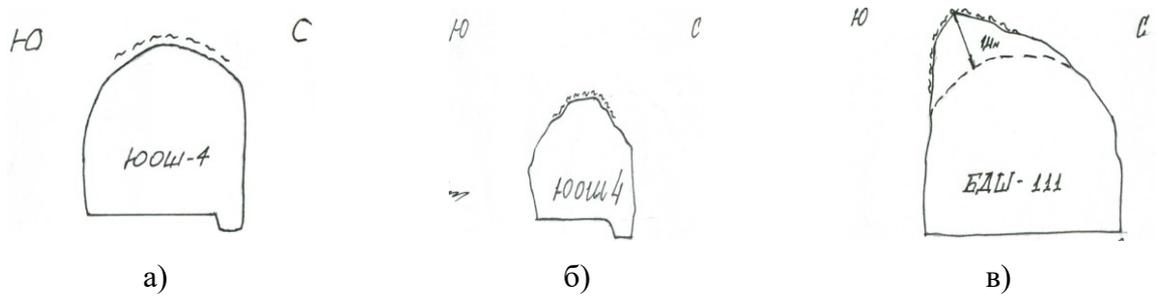


Рисунок 2.14 – Графическая фиксация конфигурации и размеров нарушений в выработках категории В: влияние мощной зоны шпреуштейнизации на гор. +470 м (а); влияние очистных работ (б); влияние естественного поля напряжений (в)

Проведенный анализ зарисовок и фотографий позволил на участках выработок, в которых установленной формой потери устойчивости является обрушение пород из кровли и стенок (вывал), определить размеры нарушенных зон.

Определение размеров зон обрушения должно осуществляться отдельно для протяженных участков и участков сопряжений, так как размеры обрушения значительно отличаются в зависимости от их положения. Размеры нарушенных зон на графике (рисунок 2.15) приведены в относительные величины: линейный размер зоны к пролету выработки или сопряжения.

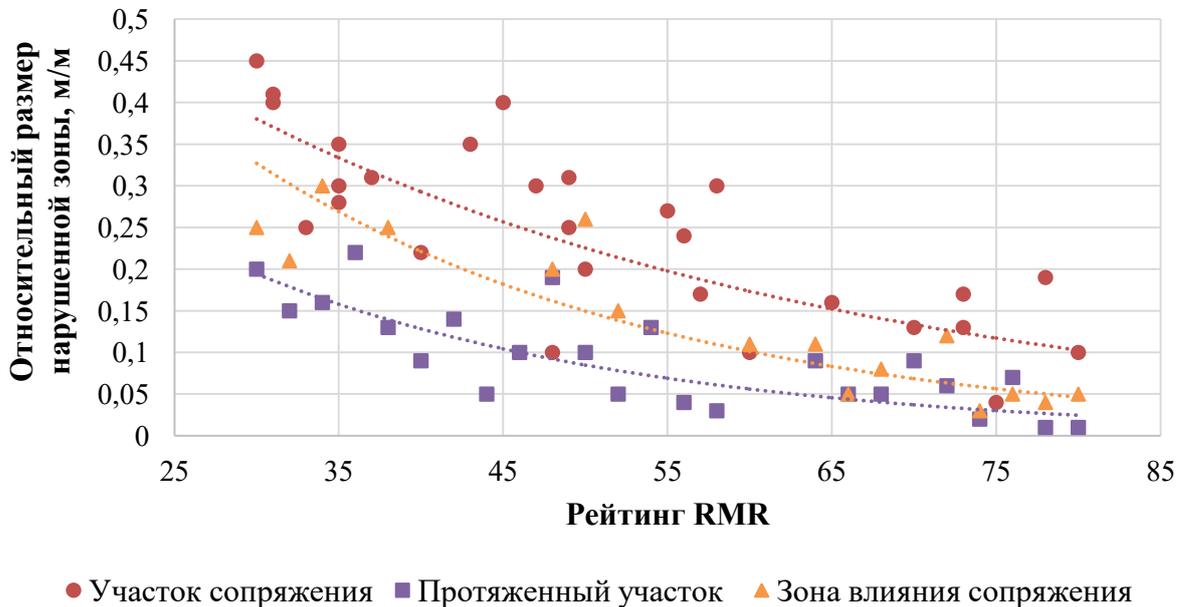


Рисунок 2.15 – Относительные размеры участков обрушения на протяженных участках выработок и на сопряжениях горных выработок при коэффициенте бокового распора 2,3

По результатам анализа данных натуральных наблюдений в выработках можно сделать следующие выводы:

1. В основном выработки устойчивы, за исключением нарушенных зон, и мест концентрации напряжений (соединение выработок с камерой, другой выработкой).

2. Все факторы, влияющие на устойчивость контура выработок, можно объединить в несколько групп: естественное поле напряжений, влияние очистных работ, влияние нарушенных зон при их подработке или пересечении. Чаще всего потеря устойчивости наблюдается при комбинации данных факторов.

3. Нарушенность приконтурного массива в окрестности одиночной выработки и сопряжения может отличаться практически в 1,5-2,5 раза.

2.3 Механизм потери устойчивости приконтурного массива на участках сопряжений

Среди всех форм проявления горного давления для незакрепленных горных выработок, расположенных в трещиноватых массивах, характерно обрушение пород в кровле и в стенках. Образование зон нарушений происходит в местах концентрации напряжений, или разгрузки, в зависимости от напряженного состояния массива.

Значение коэффициента концентрации зависит от механических свойств вмещающего массива. Наибольшие значения наблюдаются в сплошном, нетрещиноватом массиве, сложенном упругими, жесткими породами. Значения напряжений в приконтурном массиве снижаются при возможности образования зон пластических деформаций. В итоге вокруг выработки образуется ряд зон с повышенными и пониженными напряжениями, что оказывает влияние на характер потери устойчивости и поведения крепи выработки.

В гравитационном поле напряжений вокруг выработки формируются две новые зоны напряженного состояния пород: в кровле и почве – зона пониженных напряжений; в боках – зона повышенных напряжений. При достаточно большом пролете напряжения в зоне пониженных напряжений могут стать растягивающими. Так как прочность пород на растяжение примерно в 10 раз меньше, чем прочность на сжатие, то это означает, что в первую очередь разрушению подвержены породы в кровле и почве выработки. При рассмотрении массива в качестве сплошного превышение напряжениями предела прочности на растяжение в горных выработках наблюдается редко. Однако снижение напряжений в данной зоне приводит к снижению отпора при рассмотрении массива в виде дискретной среды.

Так, при малых напряжениях породного массива $\sigma_1/\sigma_{c,i} < 0,3$, процесс обрушения породной массы в выработку в основном определяется степенью нарушенности породного массива и ориентацией систем трещин относительно

выработки. Обрушение в слабонапряженных массивах происходит с формированием свода естественного равновесия, за контуром которого массив остается устойчивым.

Однако, по мере роста напряжений в массиве, процесс обрушения породной массы в выработку становится связан с формированием новых трещин, которые ориентированы параллельно контуру выработки. При средних глубинах трещины локализируются в приконтурной области выработки, однако, по мере увеличения напряжений происходит и увеличение зоны хрупкого разрушения. Разрушение хрупкого породного массива в окрестности горной выработки проявляется в виде шелушения или отслаивания породы, в результате которой формируется V-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.

Объем породы (в зоне свободного обрушения в первом случае и в зоне хрупкого разрушения во втором случае) формирует нагрузку на крепь и должен быть определен для повышения достоверности расчета параметров временной или постоянной крепи.

В трещиноватом массиве деформация породного контура состоит из двух компонент – деформации сплошных блоков породы и смещений вдоль поверхностей ослабления [90,123]. В рамках решения геомеханической задачи деформациями в блоках можно пренебречь. На рисунке 2.16 показан механизм обрушения блока. Блок при достаточной силе трения и сцеплении по контактам может некоторое время удерживаться в массиве (рисунок 2.16, а). Затем при увеличении нагрузки, например, от влияния очистных работ блок преодолевает сцепление и отрывается (рисунок 2.16 б, в). Критерием отрыва принята величина раскрытия трещины 0,1 мм – при данной величине раскрытия сцепление пропадает и возможно дальнейшее выпадение блока.

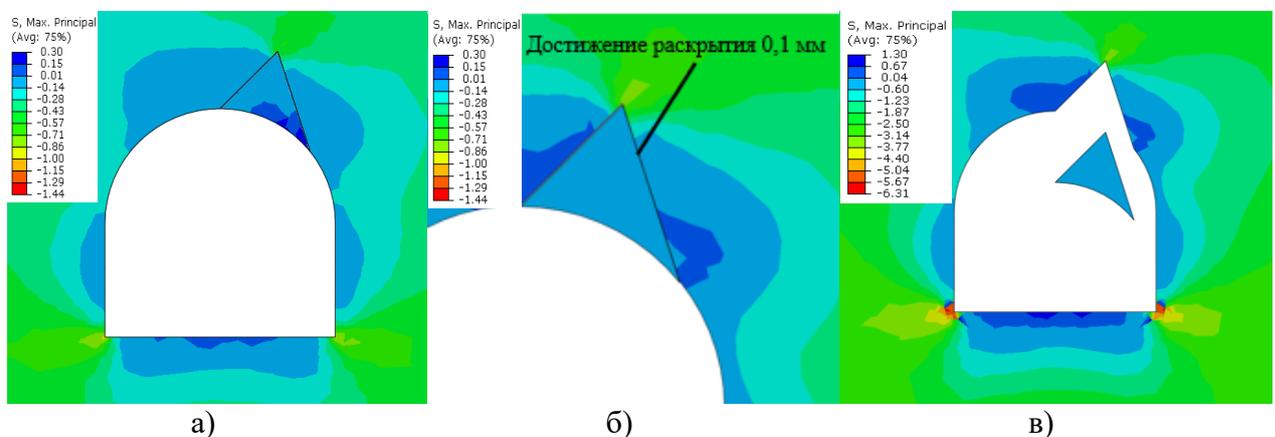


Рисунок 2.16 – Иллюстрация потери устойчивости породного блока

2.4 Формирование нагрузок на крепь сопряжений горных выработок

Для условий рудников КФ АО «Апатит» наиболее рациональной формой сечения является прямоугольно-сводчатая с двухрадиусным сводом, наиболее близким по форме к своду естественного равновесия. На рисунке 2.17 представлены эпюры распределения напряжений в окрестности горной выработки прямоугольно-сводчатого очертания, расположенной в гравитационном поле распределения напряжений.

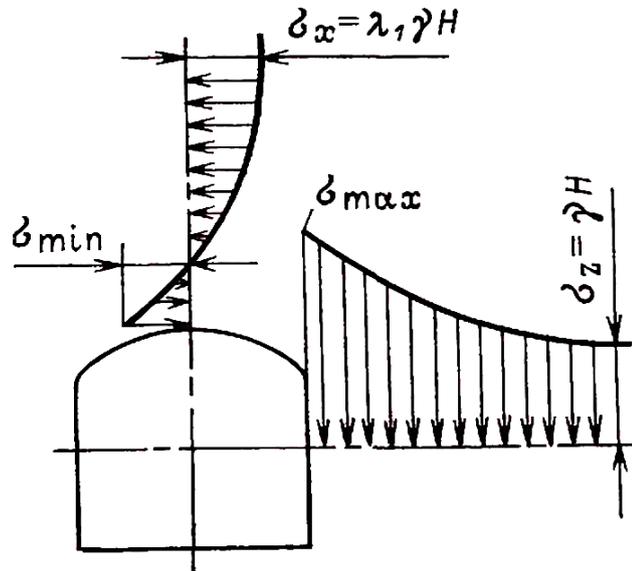


Рисунок 2.17 – Эпюры напряжений на контуре горизонтальной выработки

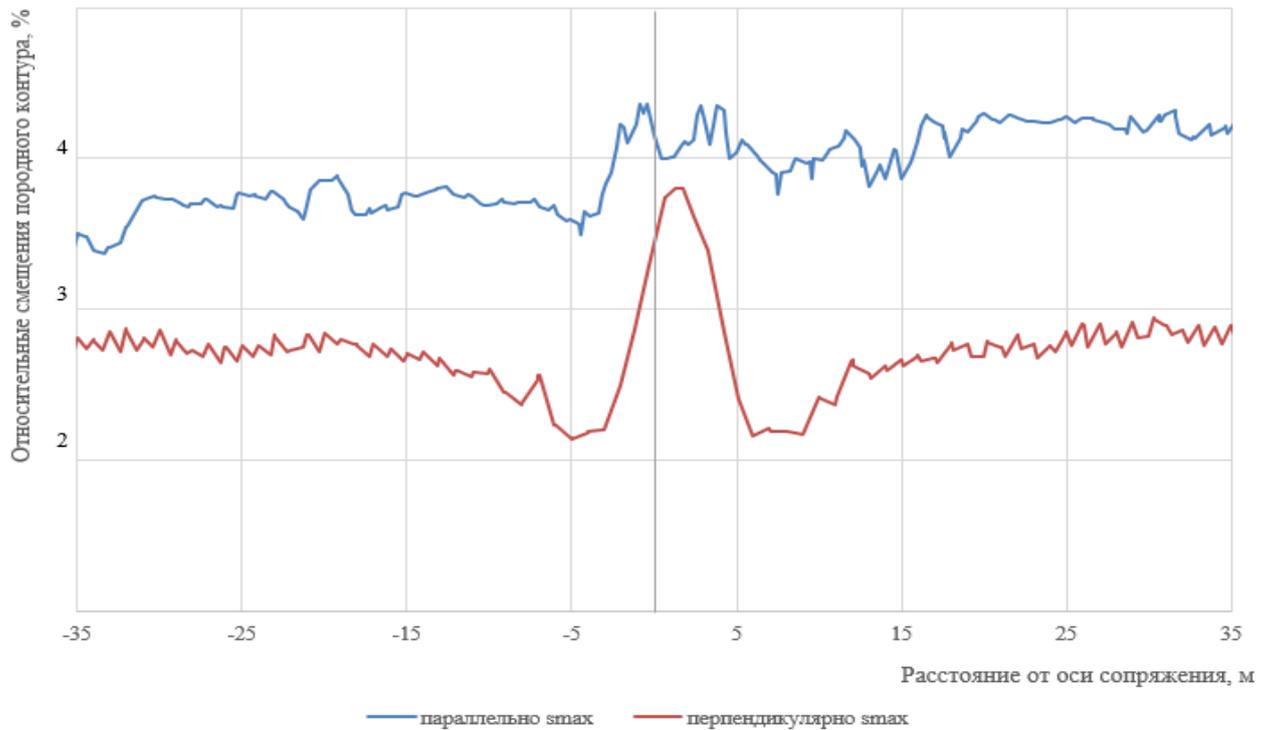


Рисунок 2.18 – Графики распределения смещений по осям выработок,

расположенных параллельно и перпендикулярно действию главного напряжения («0» - центр сопряжения)

На рисунке видно, что в боках выработки наблюдаются повышенные напряжения, действующие в вертикальном направлении. При наличии трещиноватости блоки породы могут быть зажаты в боках выработки и не склонны к обрушению. В кровле, наоборот, наблюдаются пониженные и даже растягивающие напряжения, что при среднем относительном размере блоков, меньшем пролета выработки, обеспечивает возможность их выпадения. В тектоническом поле напряжений картина зеркально отличается.

По мере приближения к оси сопряжения величины напряжений и смещения контура двух взаимно пересекающихся одиночных выработок меняются, как показано на рисунке 2.18.

2.5 Разработка методики построения численных моделей прогноза напряженно-деформированного состояния системы «крепь – массив» на участках сопряжений горных выработок

Общие положения

Численные модели, позволяющие достоверно описать поведение трещиноватого массива, должны содержать как верное геометрическое отображение структурной нарушенности, так и подобранный набор параметров, описывающих механическое и деформационное поведение массива.

Общий алгоритм создания пространственной геомеханической модели массива, вмещающей сопряжение горной выработки, состоит из нескольких логических этапов (рисунок 2.20).

Выбор граничных условий

При моделировании реальный массив заменяется участком массива, который ограничен некоторыми плоскостями. В реальном массиве распределение напряжений является условно бесконечным, однако при моделировании необходимо оценить влияние граничных условий на формируемое напряженно-деформированное состояние и минимизировать его.

Изучение влияния граничных условий как для двумерной, так и для трехмерной постановок сводится к анализу влияния расстояния H_1 и H_2 от контура рассматриваемой выработки до верхней и боковых граней соответственно, перемещение по которым ограничивается в направлении соответствующих осей. В пространственной постановке влияние размера H_3 от торцевой грани выработки до торцевой грани модели принимается аналогично величине H_2 . На расстоянии около $4B$ (B – пролет выработки, м) от контура выработки грани не оказывают влияния на значения напряжений на контуре выработки.

Значительная разница в величинах смещений контура выработки в вертикальном и горизонтальном направлениях наблюдается лишь при удалении граней на расстояние до $2R$. Дальнейшее удаление граней не оказывает значительного влияния на смещения (рисунок 2.19). Таким образом, рекомендуется удалять грани на расстояние не менее $4R$.

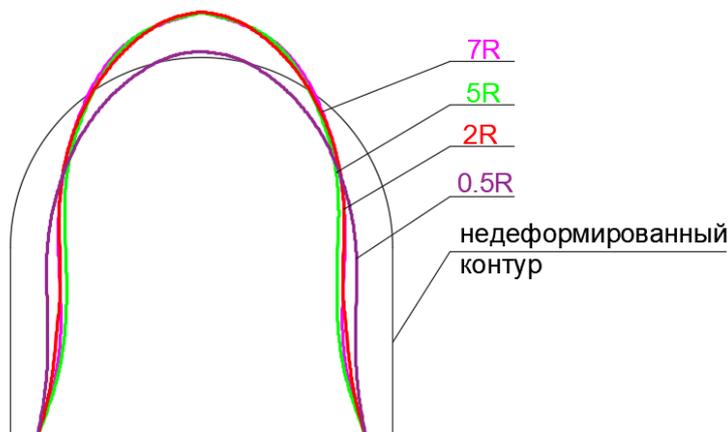


Рисунок 2.19 – Зависимость смещений на контуре выработки от удаленности граней: верхней и боковой

Выбор моделей представления участков сплошного массива и нарушений

Блоки породы, или отдельности, представляются в виде сплошных деформируемых тел. Для описания поведения деформируемых блоков выбрана упругопластическая модель Кулона-Мора. Критерий Кулона-Мора предполагает, что разрушение определяется максимальным напряжением сдвига, а напряжение сдвига зависит от нормального напряжения. Механическая модель поведения является дополненным классическим критерием разрушения Кулона-Мора. Модель является упругопластической. Поведение массива является упругим и изотропным. Поведение материала при упрочнении описывается как изотропное когезионное.

Критерий предполагает, что разрушение происходит, когда касательное напряжение в любой точке материала достигает значения, которое линейно зависит от нормального напряжения в той же плоскости.

Необходимыми данными для расчета модели на основе критерия прочности Кулона-Мора являются сцепление и угол внутреннего трения, используемые для расчета зон пластического течения, в которых значения напряжений превысили критические значения.

В случае представления массива в качестве дискретной среды расчетными являются параметры, определенные по результатам испытаний. При представлении массива сплошной средой прочностные свойства понижаются в соответствии со степенью структурной нарушенности массива.



Рисунок 2.20 – Порядок создания численной модели

Упругопластическая модель для описания сплошного массива выбрана, так как является наиболее нетребовательной к исходным данным. Больше внимание необходимо уделять описанию контактного поведения трещин, для чего используется модель Бартона-Бандиса [79]. Данный критерий позволяет учесть качество контакта и совместную прочность пород и трещин при сжатии. Скольжение по трещине происходит при достижении силой трения по контакту предельного значения.

Требования к конечно-элементной сетке

Выбор формы конечных элементов зависит от геометрии модели. При сложной геометрии рекомендуется выбирать элементы тетраэдральной формы [67], при наличии блоков правильной формы могут применяться конечные элементы в виде призм.

Для численной модели определённых размеров существует минимальный линейный размер конечного элемента, дальнейшее уменьшение которого не приведет к изменениям прочностных характеристик исследуемого объекта [9]. Меньший размер конечного элемента обеспечивает более точный результат, однако значительно увеличивает время расчета в больших и, особенно, в пространственных моделях.

Исследованиями установлено, что размер конечного элемента влияет на механические характеристики исследуемого материала. При размере стороны конечного элемента более 0,1 м выявлено снижение расчетной прочности в образцах при численном моделировании [8].

Таким образом, на контуре выработки линейные размеры конечных элементов не должны превышать 0,1 м. По мере удаления от объекта исследований и приближении к граням модели размер элемента может увеличиваться.

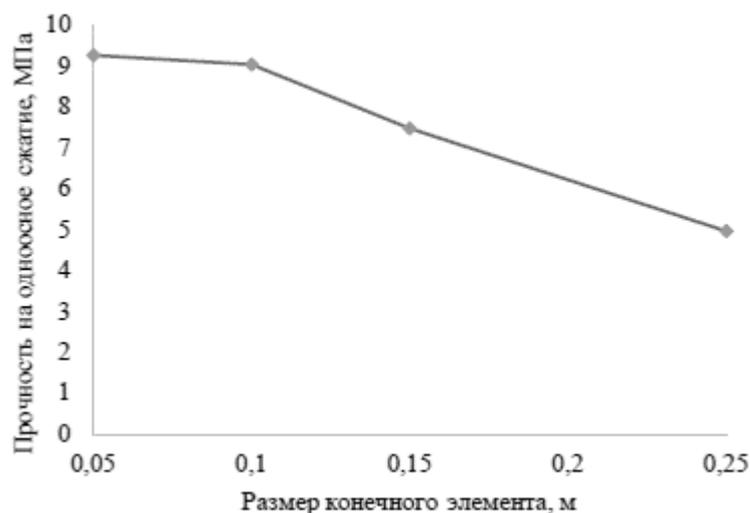


Рисунок 2.21 – Влияние размера сетки на величину предела прочности на сжатие блочного массива [8]

2.6 Выводы по Главе 2

Проанализированы данные о физико-механических и структурной нарушенности вмещающего массива для Юкспорского, Кукисвумчоррского месторождений, а также для месторождений Апатитовый Цирк и Плато Расвумчорр, полученные в разное время научными институтами ВНИМИ, КНЦ РАН и Санкт-Петербургским горным университетом. Натурные исследования подтвердили, что на рудниках Хибинского массива выделяется четыре основные системы трещин. Обоснованы механические характеристики контактных поверхностей, характерные для апатит-нефелиновых месторождений.

Приведенные во второй главе результаты натурных исследований состояния выработок позволили определить, что в основном выработки находятся в устойчивом состоянии, наиболее распространенными категориями состояния являются категории «Б» и «В». Нарушенные зоны наблюдаются в основном в местах концентрации напряжений, например, при соединении выработки с камерой, или выработки с другой выработкой – на сопряжении. Размер нарушенной зоны в приконтурном массиве в окрестности сопряжения может превышать до 2,5 раз размер нарушенной зоны в окрестности одиночной выработки.

На устойчивость приконтурного массива горных пород влияет три основных группы факторов – напряженное состояние массива до проведения горных выработок, влияние очистных работ и наличие зон нарушений, чаще всего данные группы факторов наблюдаются вместе.

В предположении о том, что формирование нагрузок на крепь в рассматриваемых условиях, скорее всего, будет происходить путем обрушения породных блоков, разработана методика построения численных конечно-элементных моделей, которая позволит определить зависимости размера зоны возможного обрушения от всех вышеперечисленных факторов.

ГЛАВА 3 ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ СОПРЯЖЕНИЙ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В СТРУКТУРНО- НАРУШЕННЫХ МАССИВАХ

3.1 Общие положения

Оценка изменения напряженно-деформированного состояния в результате рассечки сопряжений является комплексной многофакторной задачей. Анализ проведенных натуральных и лабораторных исследований показал, что при прогнозе напряженно-деформированного состояния необходимо решать пространственную задачу с учетом трещиноватости в приконтурной зоне.

В результате анализа данных мониторинга и научной литературы, проведенных в главе 1, установлено, что в трещиноватых массивах, которые можно охарактеризовать как блочные, наиболее характерной формой потери устойчивости является обрушение, параметры которого зависят от механических характеристик горной породы и напряженного состояния массива.

Большое количество факторов наилучшим образом может быть учтено при численном моделировании. При этом выделяется несколько подходов к численному моделированию, проявляющихся на этапе расчетной схемы: возможность представления массива в виде сплошной или дискретной среды. В сложных случаях или недостаточно точных натуральных данных по трещиноватости представление массива сплошной средой позволяет качественно оценить размеры и параметры зоны ослабления в окрестности сопряжений горных выработок. В общем случае порядок численного моделирования представлен на рисунке 3.1.

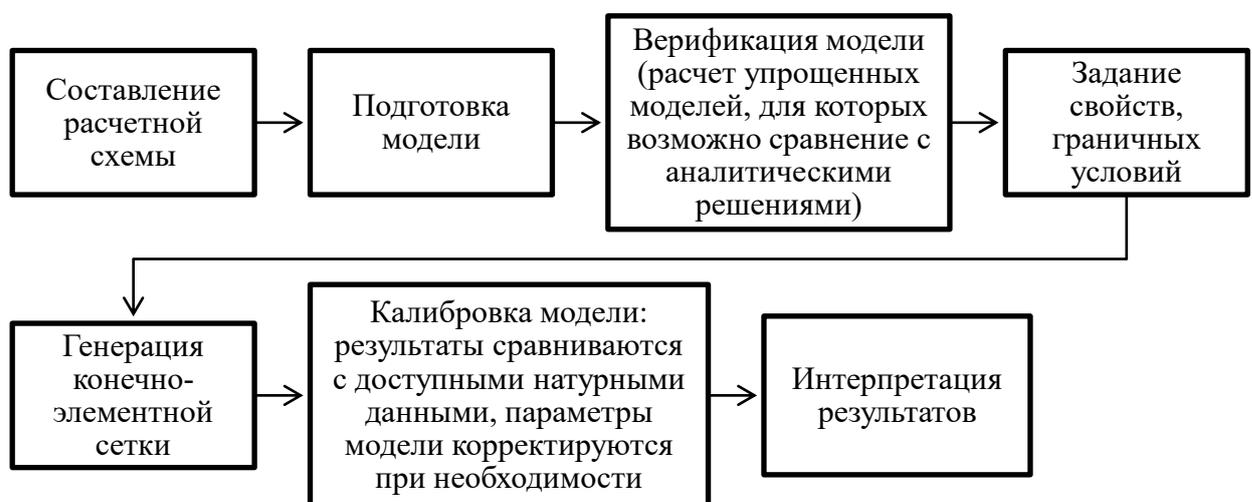


Рисунок 3.1 – Общий порядок численного моделирования

3.2 Обоснование параметров численных моделей для прогноза развития геомеханических процессов в структурно-нарушенных массивах

3.2.1 Физико-механические свойства и структурная нарушенность массива

Методика прогноза напряженно-деформированного состояния массива в окрестности сопряжений горных выработок, расположенных в трещиноватых массивах, предложенная в диссертационной работе, может быть адаптирована для условий любого месторождения при известных физико-механических свойствах пород и определенном напряженном состоянии. Однако первоначальная разработка методики основана на рассмотрении условий, характерных для Хибинского массива апатит-нефелиновых руд.

В работе результаты лабораторных и натурных исследований усреднены для установления общих зависимостей деформирования породного массива. При исследовании отдельного сопряжения необходимо устанавливать входные параметры с максимальной точностью.

Обоснование усреднения свойств на основании статистических данных представлено в разделе 2.2.2. Принятые для каждого типа вмещающих пород свойства сведены в таблицу 3.1. В дальнейшем при моделировании для локальной модели принимаются свойства каждого из литотипов последовательно.

Под структурной нарушенностью, влияющей на физико-механические свойства рассмотренных в предыдущем разделе пород, понимается трещиноватость массива, характеризующаяся количеством и геометрическими параметрами систем трещин. Натурные исследования подтверждают основные выделенные системы трещиноватости на месторождениях Хибинского массива [25,41]. В таблице 3.2 приведены усредненные показатели данных систем, которых приняты за основу при моделировании.

В диссертационной работе моделирование проводится как с применением метода сплошной среды, так и дискретной. В упругопластической постановке используются следующие параметры: удельный вес горной породы, модуль упругости, коэффициент Пуассона, сцепление и угол внутреннего трения породы. При этом параметры прочности и упругости должны быть снижены в зависимости от имеющейся трещиноватости. Показатели упругости с учетом структурной нарушенности рассчитываются через показатель RMR.

Таблица 3.1 – Физико-механические свойства пород Хибинского массива

Параметр		Луяврит трахитоидный	Уртиты	Рисчорриты	Ийолиты	Апатит- нефелиновые руды	Зоны шпреуштейн изации	
Прочность при сжати, МПа	Диапазон	мин	214,8	51,9	160	61,2	90	24
		макс	277	180	180	200	174	50
	Среднее		245,9	130,2	170	155,3	141,5	36
Прочность при растяжении, МПа	Диапазон	мин	9,2	10	9	9,5	2	4
		макс	15,8	18,8	12	17,2	8,9	16
	Среднее		12,5	13,5	11	12,1	6	9
Модуль упругости, МПа	Диапазон	мин	75800	18500	-	40300	35000	17200
		макс	77000	70000	-	85000	85000	38300
	Среднее		76400	40680	65300	66825	58125	24420
Коэффициент Пуассона	Диапазон	мин	0,24	0,2	-	0,22	0,18	0,16
		макс	0,27	0,29	-	0,23	0,25	0,30
	Среднее		0,26	0,24	0,26	0,23	0,2	0,23
Сцепление, МПа	Диапазон	мин	41,4	23	-	21,5	11,2	0,07
		макс	51,8	44	-	45	40,4	1,49
	Среднее		46,6	31,7	33,6	36,8	20,3	0,64
Угол внутреннего трения	Диапазон	мин	39,5	36,4	-	37,9	37,8	5
		макс	49	40	-	49,5	53,5	16
	Среднее		44,3	38,5	41,0	41,8	44,9	12

Таблица 3.2 – Выделенные системы трещиноватости на примере месторождения Юкспор

Система трещин	Средний угол падения	Средний азимут	Интенсивность трещин, шт/м	Характеристика шероховатости	Толщина заполнителя мм	Средний размер структурных блоков, м
I	5	355	5-10	Ровная, плавно искривленная	1-2	0,1x0,1x0,2
II	42	9	3	Слегка волнистая, с зеркалами скольжения	5-20	0,3x0,5x1
III	73	255	0,2	Выполнены натролитом	5-15	2x2x4
IV	82	116	0,8	Выполнены натролитом	до 0,5	1x1x2

Показатель RMR также рассчитан усредненно для всех физико-механических условий. Модуль упругости с учетом структурного ослабления определяется согласно (3.1) [83]:

$$E_M = E \cdot e^{\frac{RMR-100}{36}} \quad (3.1)$$

где E – модуль упругости пород в образце.

Коэффициент Пуассона с учетом структурного ослабления определяется по выражению (3.2) [76]:

$$\nu_M = 0,5 - 0,2 \cdot \frac{RMR}{RMR + 0,2(100 - RMR)} \quad (3.2)$$

Расчетные показатели в таблице 3.3 определены на основании данных, приведенных в таблицах 3.1 и 3.2. При моделировании блочной среды для блоков принимаются значения модуля упругости и коэффициента Пуассона ненарушенного массива. Механические свойства по контактам принимаются на основании проведенных лабораторных исследований, сведенных в таблицу 2.4: в ризкорритах сцепление $c = 6,3$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi = 34^\circ$; в урритах $c = 8,5$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi = 35^\circ$.

Как показано в главе 1, при определенных условиях даже в сильнотрещиноватых массивах может не произойти обрушение пород в пределах нарушенной зоны вследствие направления действия максимальных компонент напряжений. В условиях рудников Хибинского массива на глубоких горизонтах наблюдается тектоническое распределение

напряжений: превышение горизонтальными компонентами напряжений вертикальных [33].

Таблица 3.3 – Физико-механические свойства пород и руд на месторождениях, принятые в численном моделировании

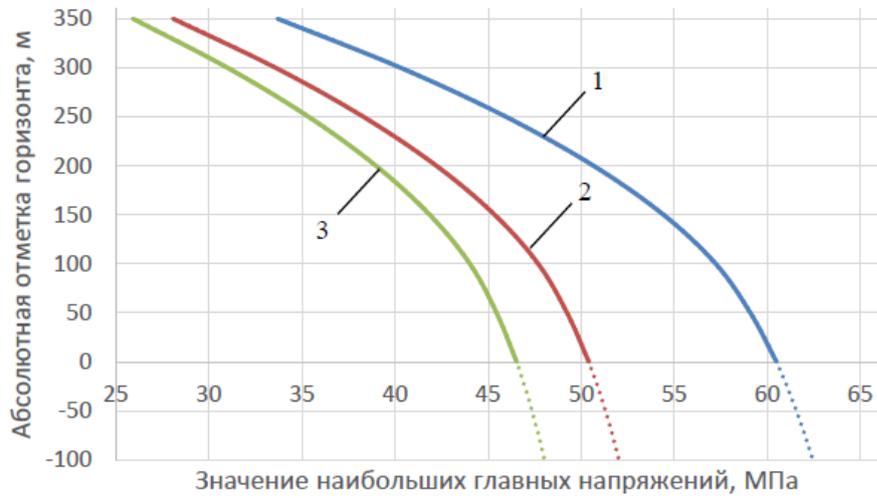
Наименование породы	Удельный вес, МН/м ³	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	RMR	Модуль упругости в массиве, МПа	Коэффициент Пуассона в массиве
Рисчорриты (висячий бок)	0.028	65300	0.26	58	20335	0,33
Уртиты (лежащий бок)	0.028	40680	0.24	50	10144	0,33
Апатит-нефелиновая руда	0.030	58125	0.20	51	14902	0,33
Зона шпреуштейнизации	0.018	24420	0.23	58	7604	0,33

В зависимости от глубины значения горизонтальных напряжений изменяются по нелинейным законам (рисунок 3.2) [50]. В данной работе исследуется напряженное состояние массива при отношении горизонтальной и вертикальной составляющих σ_h/σ_v от 0,5 до 3. Вертикальная компонента напряжений определяется по гравитационному закону.

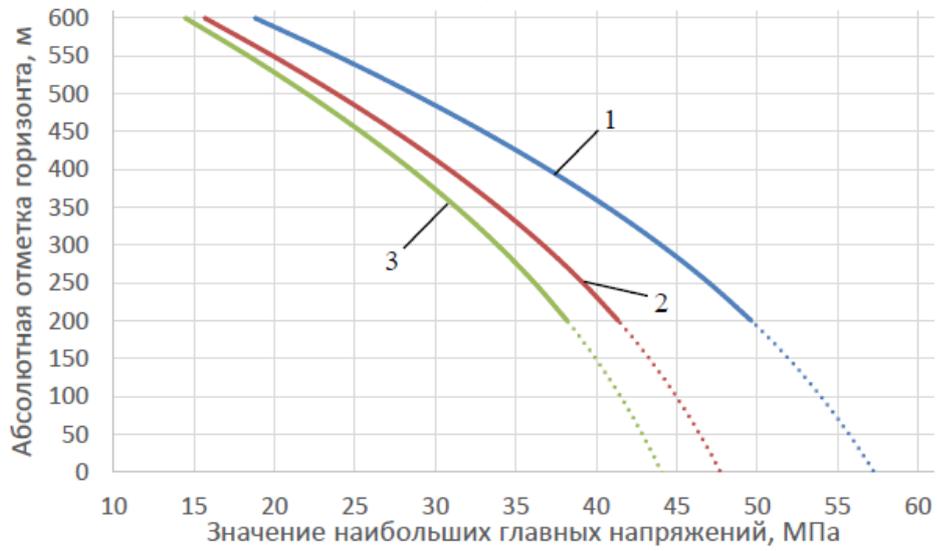
3.2.2 Постановка задачи

Изучение напряженно-деформированного состояния в окрестности сопряжения выработок, а в дальнейшем изучение зависимостей формирования нагрузок на крепи производится на основании пространственных конечно-элементных моделей. Модели с массивом, представленным сплошной средой, реализованы в программном комплексе Simulia Abaqus/Standart, модели массива, представленного дискретной средой – в программном комплексе 3DEC (Itasca).

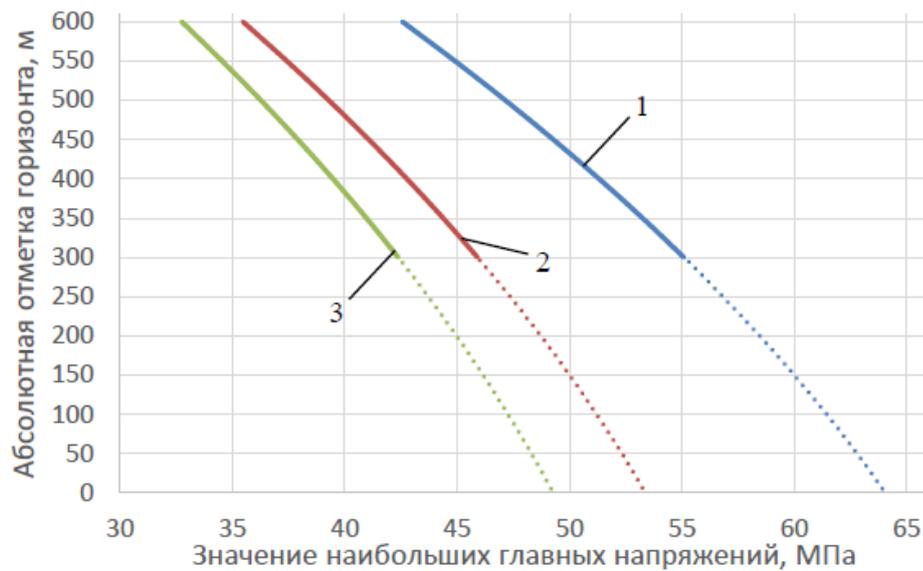
В обоих случаях модель, общая расчетная схема которой приведена на рисунке 3.3, представляет собой параллелепипед – массив (1), содержащий в себе сопряжение двух выработок одного из типов (2). В первом случае массив представляется в виде сплошной среды без нарушений, во втором случае нарушения представлены в явном виде в соответствии с их геометрическими параметрами (рисунок 3.3, б).



а)



б)



в)

Рисунок 3.2 – Изменение наибольших напряжений во вмещающем массиве с глубиной на Кукисвумчоррском (а), Юкспорском (б) месторождениях, месторождении Апатитовый Цирк и Плато Расвумчорр (в) [62]

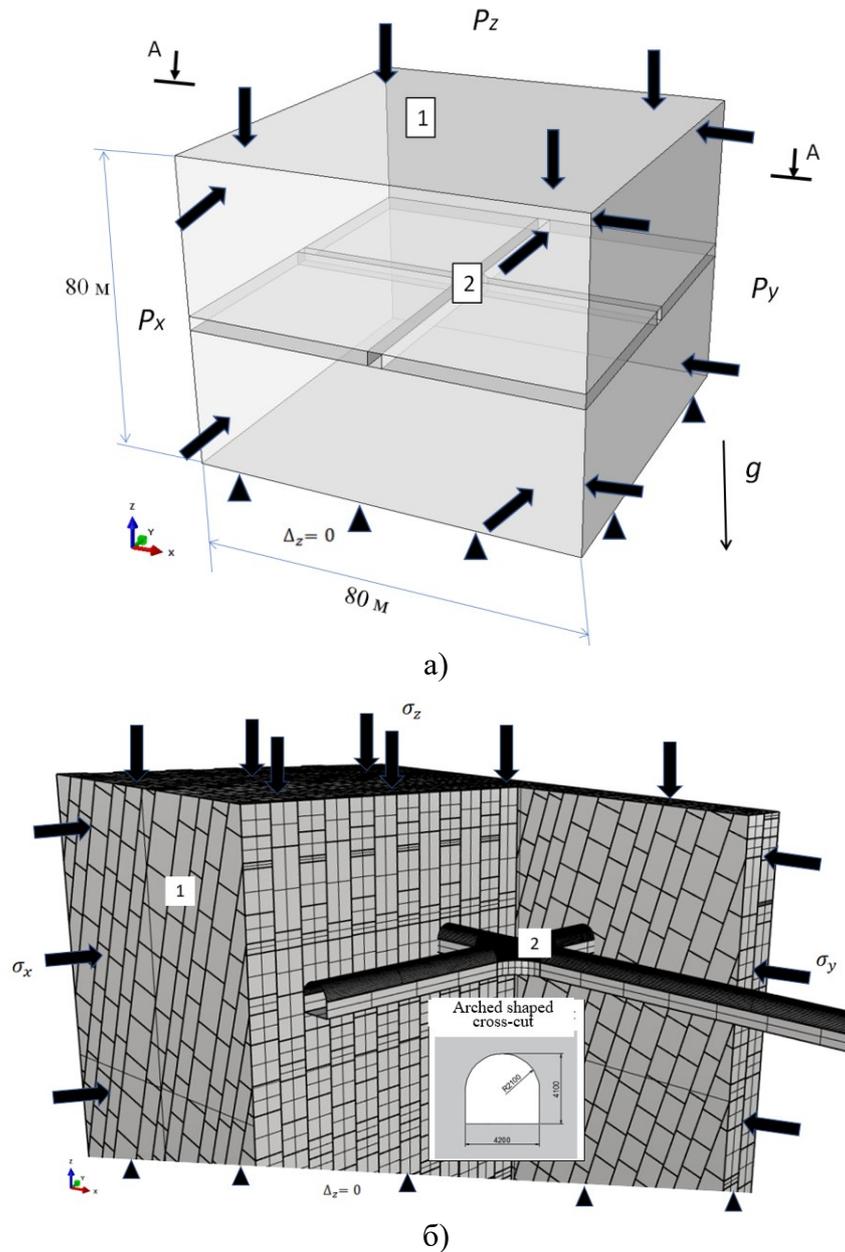


Рисунок 3.3 – Расчетная пространственная схема конечно-элементной модели для сплошного (а) и дискретного (б) массива: 1 – вмещающий массив, 2– сопряжение горных выработок

Выбранный во всех случаях общий размер модели – 80 x 80 x 80 м, позволяет исключить влияние граничных условий на распределение напряжений в окрестности сопряжения горных выработок. На гранях модели запрещены смещения в направлениях, перпендикулярных граням.

Модель анизотропна и учитывает не только внутреннюю анизотропию (блочное строение), но и изменения положений блоков в результате деформации. Поведение блоков горных пород в методе дискретных элементов описывается упругопластической моделью, основанной на критерии прочности Мора.

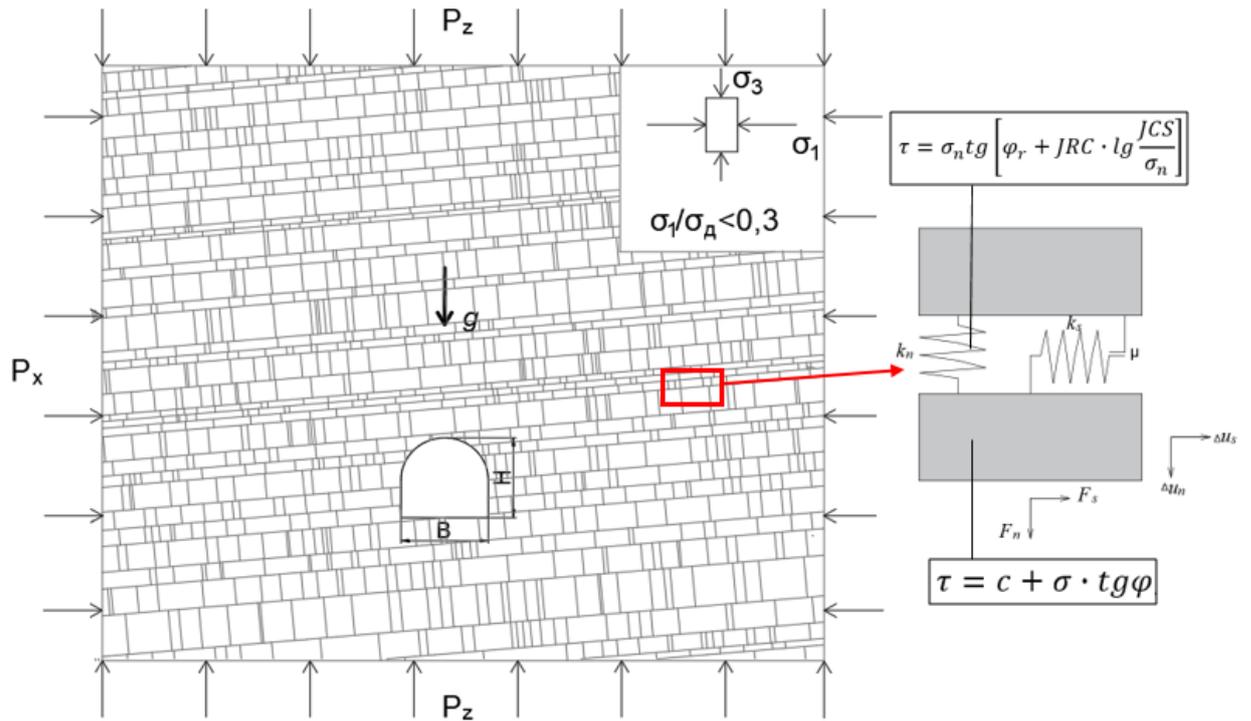


Рисунок 3.4 – Разрез по сечению расчетной модели с описанием моделей задания массива и контактов: 1 – вмещающий массив, 2– сопряжение горных выработок

Для упругопластической постановки требуется минимальное количество параметров – удельный вес породы, модуль упругости, коэффициент Пуассона, сцепление и угол внутреннего трения. Тем не менее, он достаточно точно описывает поведение массива горных пород [113]. Размеры сопрягающихся выработок приняты равными друг другу. Расчеты проводились для нескольких типоразмеров поперечных сечений (рисунок 3.5) сводчатой или прямоугольной формы.

Моделирование выполнено в два этапа: на первом сформировано естественное напряженное состояние массива пород под влиянием гравитационно-тектонического поля напряжений, на втором – смоделирована выемка пород в пределах контура выработки или сопряжения горных выработок без установки крепи. Напряжения оцениваются в нескольких сечениях – на удалении 20 м от оси сопряжения (сечение I-I), 10 м (сечение II-II), на внешней границе сопряжения (сечение III-III) и по оси сопрягаемой выработки (сечение IV-IV).

После оценки характера потери устойчивости приконтурного массива и определения размеров вывалов в зависимости от условий, производится оценка нагрузки на крепь и выбор типа крепи с оценкой ее несущей способности.

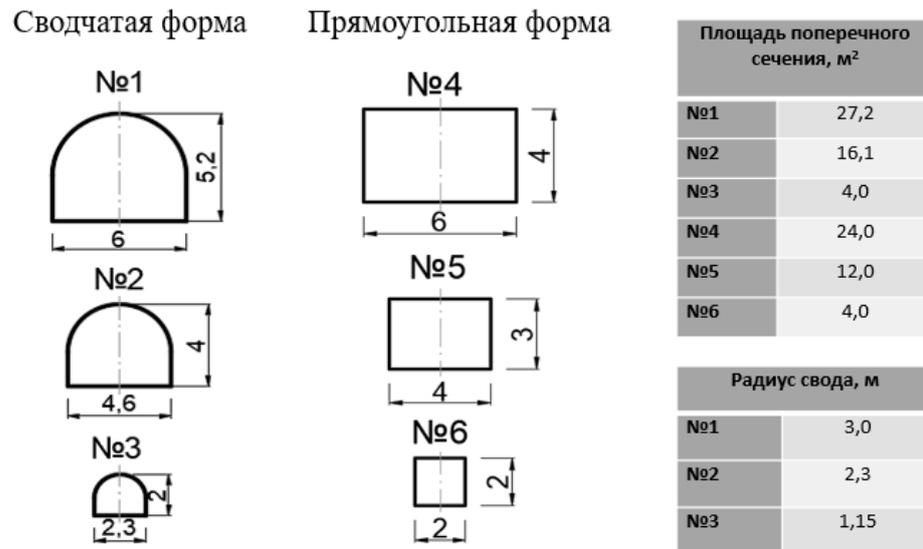


Рисунок 3.5 – Варианты поперечных сечений выработок

3.2.3 Верификация модели

Точность прогноза при численном моделировании значительно зависит от принятой модели механического поведения горного массива и модели контактного взаимодействия. Механическое поведение сплошных блоков горных пород описывается критерием Кулона Мора. Он требует небольшого количества входных параметров, но обеспечивает адекватное описание нелинейного деформирования массива.

В данном исследовании основное внимание уделяется контактной модели, поскольку она оказывает наиболее значительное влияние на возможность блоков образовывать зону разрушения, ее форму и размеры.

В основном выработки устойчивы, за исключением участков с зонами окисления или концентрации напряжений (пересечение с камерой или другой выработкой). Однако при большой напряженности шва и преобладании вертикального давления над горизонтальным в кровле пересечения и большом пролете может произойти обрушение. Возможность обрушения блоков горных пород обеспечивается недостаточным сцеплением или боковым давлением.

Многофакторное влияние пространственной геометрии пересечения, конфигурации кровли, исходного напряженного состояния представлено в виде диаграммы на рисунке 3.6. Данные получены путем измерения размеров зон разрушения для разных типов пересечений в пределах Кировского рудника и статистической обработки. Диаграмма обобщает влияние типа сопряжения, формы кровли и угла между пересекающимися выработками.

Размеры зон потенциального разрушения на рисунке 3.6 определены в зависимости от интенсивности трещиноватости и параметров контакта. Критерий контура зоны возможного обрушения установлен в результате выделения зон с наиболее интенсивными смещениями блоков: потенциально обрушатся блоки, раскрытие трещин по контактными поверхностям которых хотя бы с 3 сторон произошло более чем на 0,1 мм.

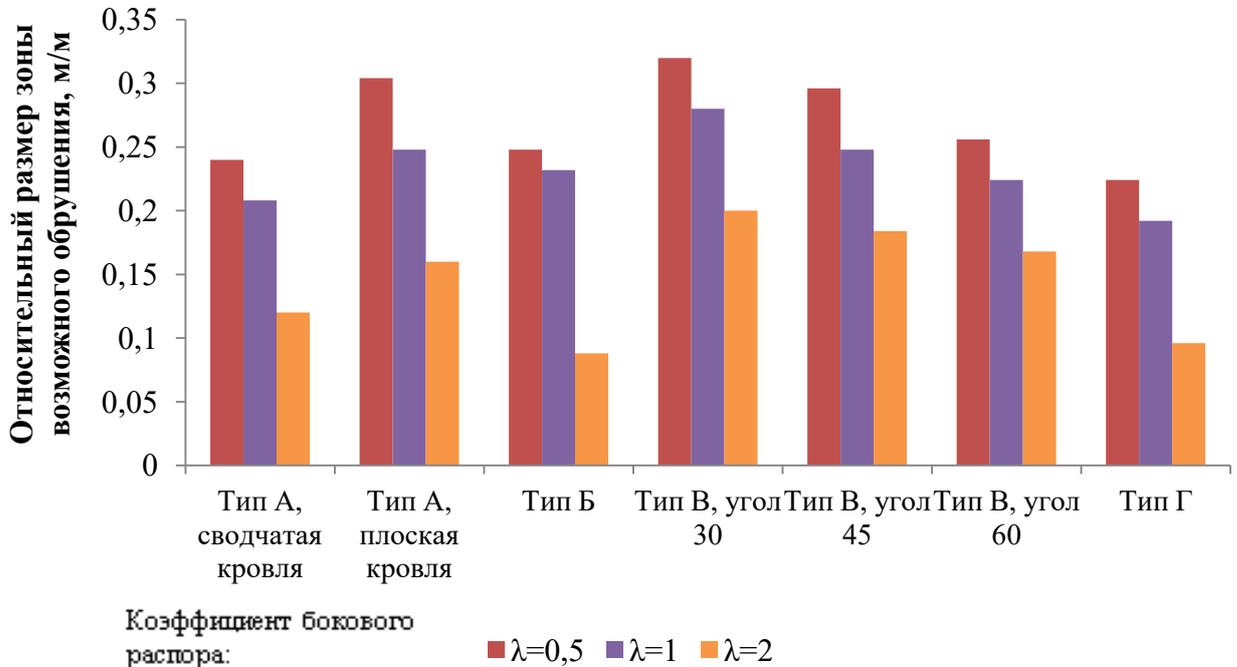


Рисунок 3.6 – Диаграмма размеров зон возможного обрушения для сопряжений различных типов в зависимости от напряженного состояния массива горных пород.

Данные диаграммы будут использованы для количественной и качественной оценки достоверности получаемых при численном моделировании размеров зон возможного обрушения на сопряжениях.

Для оценки корректности моделирования контакта по трещинам проанализированы дискретные модели с контактами между блоками, заданными в явном виде (как шероховатая поверхность), в виде плоской поверхности с критерием Кулона-Мора [113] и Бартона-Бандиса [80].

И критерий Мора-Кулона, и критерий Бартона-Бандиса описывают механические свойства на контакте таким образом, чтобы идентифицировать блоки, склонные к обрушению, но значения при использовании критерия Мора-Кулона завышены. Модель Бартона-Бандиса показывает хорошую сходимость с моделированием шероховатости контакта в явном виде и натурными данными на месте (рисунок 3.7). В дальнейшем исследовании при моделировании используется нелинейный критерий прочности Бартона-Бандиса.

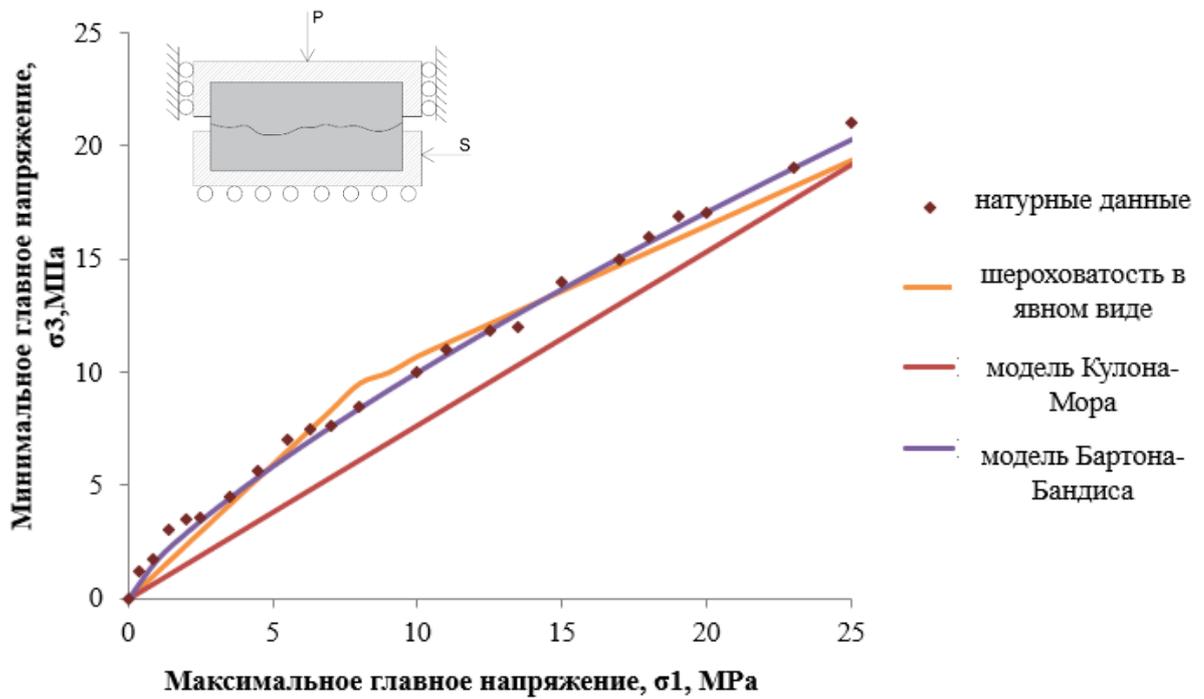


Рисунок 3.7 – Исследование достоверности моделей, описывающих механические свойства по контакту поверхностей ослабления

3.3 Прогноз напряженно-деформированного состояния массива в рамках теории сплошной и дискретной сред

Выбор характера представления среды производится с учетом конкретных задач расчета. Модель механического поведения горной породы необходима для достоверного прогноза механических процессов в породном блоке и на контактах блоков. В работе рассматриваются результаты моделирования в рамках двух подходов. Первый подход предусматривает представление массива сплошной средой; при втором подходе трещиноватость задается в явном виде, формируется блочный массив.

Модель, созданная в рамках механики сплошной среды, позволяет материалу деформироваться упругопластически, однако не учитывает нарушений сплошности в массиве. В рамках дискретной среды трещины и иные нарушения задаются в явном виде с учетом их геометрических параметров.

Моделирование проведено для выработки, расположенной на глубине 300 м в ризчорритах со свойствами, эквивалентными трещиноватому массиву, описанными в разделе 3.2.1.

На рисунках 3.8-3.13 представлены эпюры напряжений и смещений в окрестности выработки, расположенной в сплошном массиве и в дискретном массиве. Прочностные и деформационные характеристики массива в первом случае откорректированы с учетом данных о структурной нарушенности.

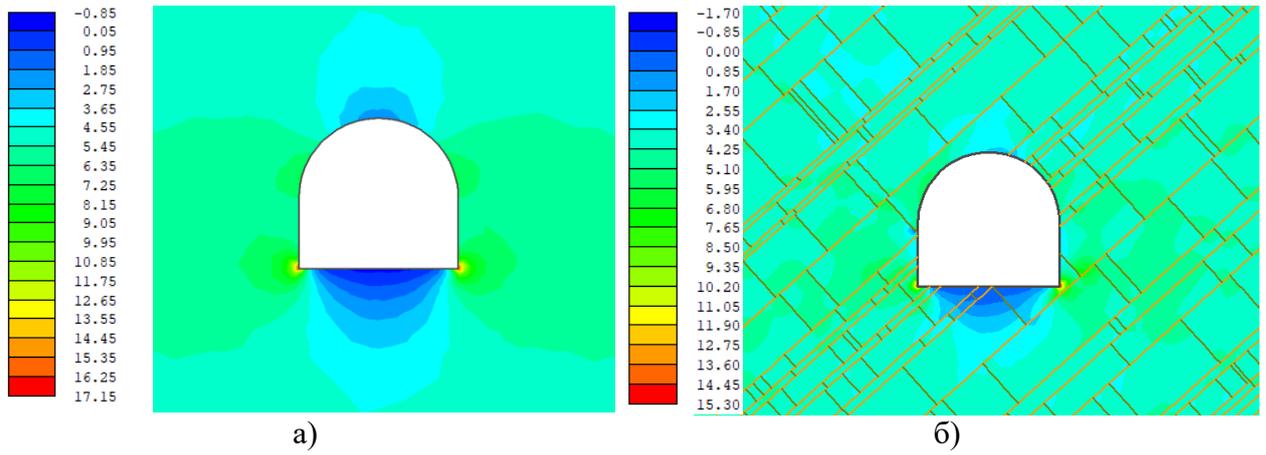


Рисунок 3.8 – Эпюры распределения напряжений, МПа: а – в гравитационном поле распределения напряжений, сплошной массив; б – в гравитационном поле распределения напряжений, дискретный массив

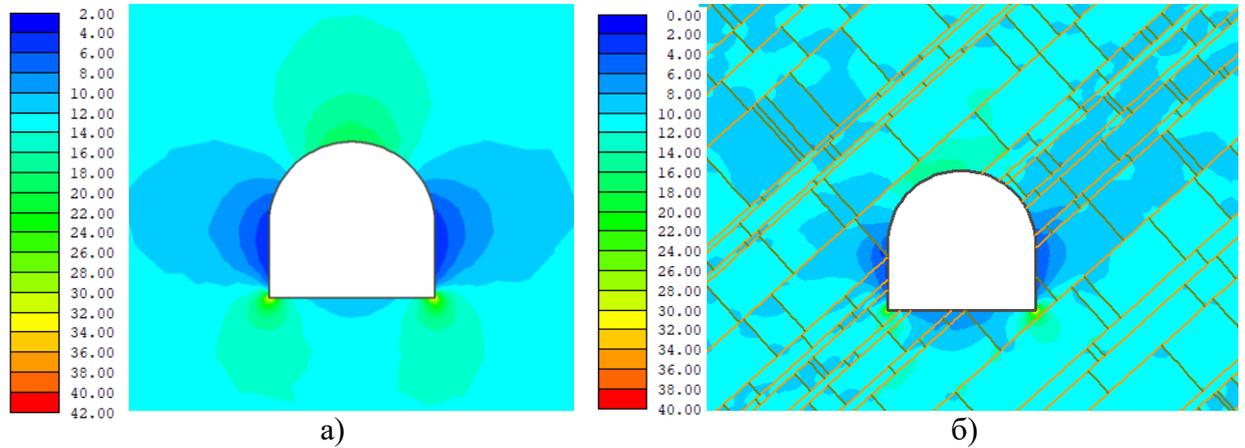


Рисунок 3.9 – Эпюры распределения напряжений, МПа: а – в тектоническом поле распределения напряжений с $\lambda=2$, сплошной массив; в - в тектоническом поле распределения напряжений с $\lambda=2$, дискретный массив

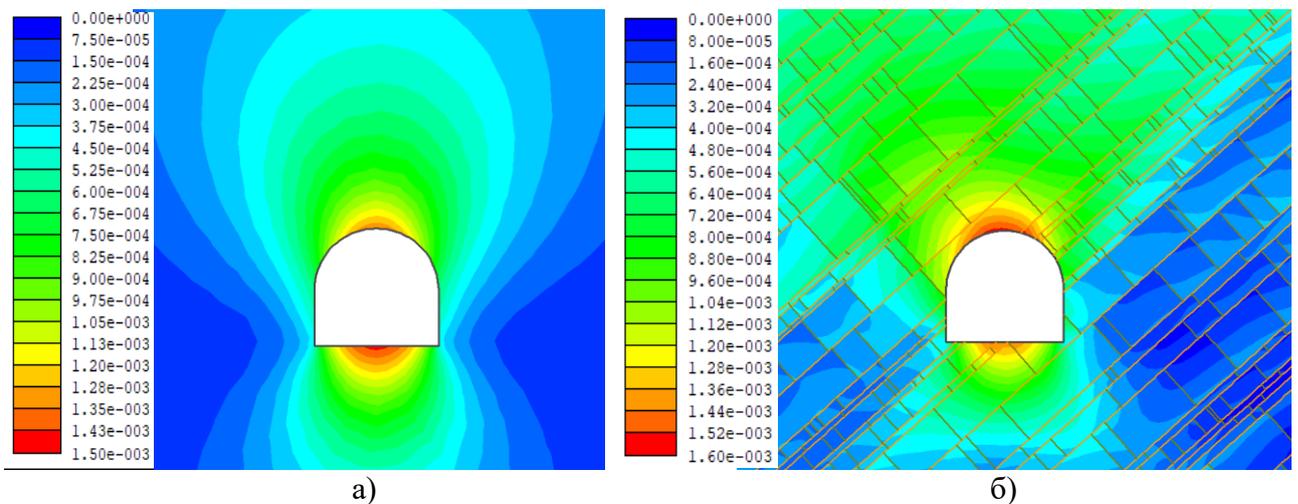


Рисунок 3.10 – Эпюры смещений, м: а – в гравитационном поле распределения напряжений, сплошной массив; б - в гравитационном поле распределения напряжений, дискретный массив

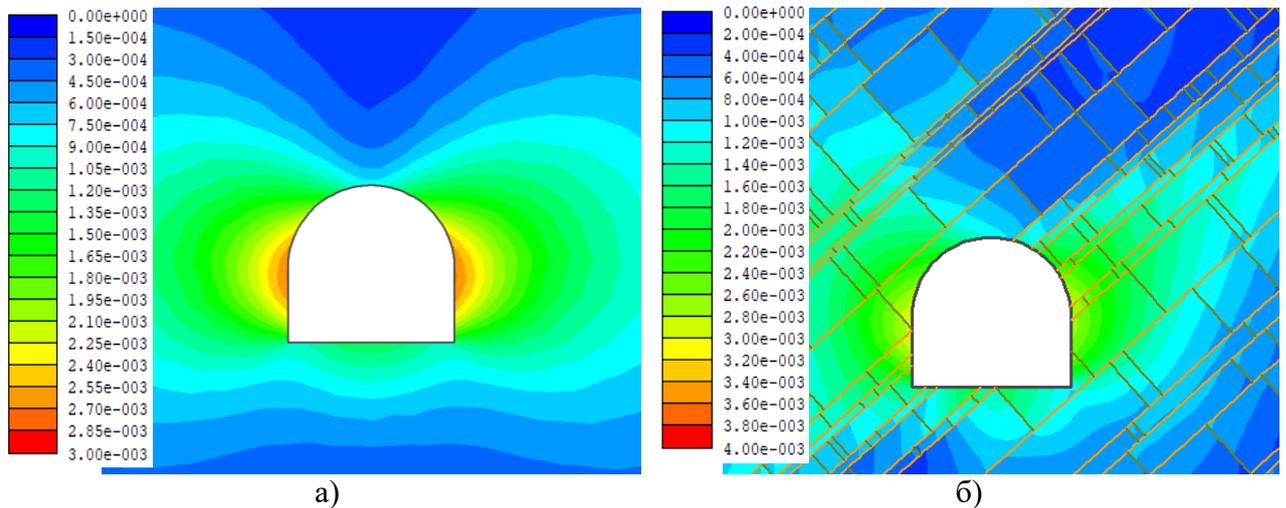


Рисунок 3.11 – Эпюры смещений, м: а– в тектоническом поле распределения напряжений с $\lambda=2$, сплошной массив; б - в тектоническом поле распределения напряжений с $\lambda=2$, дискретный массив

Характер распределения смещений по контуру выработки схож по результатам моделирования как сплошной среды, так и для нарушенной. Однако при необходимости оценки зоны возможного обрушения в окрестности выработки или сопряжения массив необходимо моделировать в виде дискретной среды. Модель дискретной среды представляет собой совокупность блоков, при этом допускаются перемещения каждого блока и их вращение, полный разрыв контактных связей, формирование новых контактов в процессе деформирования численной модели массива. Возможность свободного смещения блоков позволяет определить зону возможного обрушения, где перемещения достигают критических значений. Результатом моделирования трещиноватости в явном виде является область, в которой блоки неустойчивы при заданном напряженном состоянии. Напряжения, возникающие в блоках, возможно оценить, однако они не могут быть интерпретированы как разрушающие.

Таким образом, при известных параметрах трещиноватости при необходимости достоверного прогноза поведения массива в приконтурной области рекомендуется осуществлять моделирование с заданием структурных нарушений в явном виде. Однако при пространственной постановке задачи, например, при моделировании сопряжения выработок, объем данных может быть велик, что затрудняет расчет. В таком случае рекомендуется задавать трещины в явном виде только в приконтурной области массива. Размеры приконтурной области должны быть предварительно определены по результатам моделирования сопряжения в сплошном массиве с пониженными прочностными свойствами. Расчетная область пониженных напряжений в кровле сопряжения или боках сопряжения должна быть представлена в дальнейшем в качестве трещиноватого массива.

3.4 Исследование факторов, оказывающих влияние на формирование напряженно-деформированного состояния приконтурного массива в окрестности горной выработки

3.4.1 Описание факторов

В числе основных факторов, оказывающих влияние на устойчивость породных обнажений, выделяются следующие:

- напряженное состояние приконтурного массива выработки на различных стадиях его жизненного цикла (одиночная выработка, приближение выработки, рассечка сопряжения, подход очистных работ к сопряжению), а также сопутствующий фактор – глубина заложения;

- прочность пород и интенсивность структурной нарушенности породного массива (тектонические разрывные нарушения, зоны интенсивной трещиноватости и окисления, породные дайки);

- соотношение размера блока и пролета выработки;

- геометрические параметры (форма и размеры горных выработок, форма кровли сопряжений).

Для оценки влияния каждого из выделенных факторов проведен анализ чувствительности численных моделей к изменению их параметров. Изучено поведение модели при наличии одной системы трещин и нескольких систем трещин (блочный массив), при углах наклона от субгоризонтальных систем до крутопадающих; при различной интенсивности трещиноватости (варианты интенсивности выбраны в зависимости от пролета выработки). Всего проанализировано 288 моделей. Пределы изменения параметров представлены в таблице 3.4:

- глубина выемки: от 100 до 600 м;

- пролет выемки: от 2 до 6 м;

- конфигурация свода: арочная или плоская;

- угол наклона основной системы трещин: от 0 до 80 градусов;

- интенсивность трещиноватости в зависимости от пролета выемки: от 0,5 до 10 1/м.

На основании параметров, определенных в таблице 3.4, созданы трехмерные модели блочной среды с блоками усредненных размеров. Графическая интерпретация некоторых рассмотренных схем трещиноватости в плоскости представлена на рисунке 3.12.

Таблица 3.4 – Матрица параметров для анализа чувствительности моделей к изменению параметров

Сечение	Глубина, м	100			300			600			100			300			600		
	Пролет, м	2						4						6					
		α_n	I_T																
прямоугольное	0	5	0	5	0	5	0	2	0	2	0	2	0	0,5	0	0,5	0	0,5	
		10		10		10		5		5		5		1		1		1	
		30		30		30		10		10		10		2		2		2	
	30	5	30	5	30	5	30	2	30	2	30	2	30	0,5	30	0,5	30	0,5	
		10		10		10		5		5		5		1		1		1	
		30		30		30		10		10		10		2		2		2	
	60	5	60	5	60	5	60	2	60	2	60	2	60	0,5	60	0,5	60	0,5	
		10		10		10		5		5		5		1		1		1	
		30		30		30		10		10		10		2		2		2	
	80	5	80	5	80	5	80	2	80	2	80	2	80	0,5	80	0,5	80	0,5	
		10		10		10		5		5		5		1		1		1	
		30		30		30		10		10		10		2		2		2	
сводчатое	0	5	0	5	0	5	0	2	0	2	0	2	0	0,5	0	0,5	0	0,5	
		10		10		10		5		5		5		1		1		1	
		30		30		30		10		10		10		2		2		2	
	30	5	30	5	30	5	30	2	30	2	30	2	30	0,5	30	0,5	30	0,5	
		10		10		10		5		5		5		1		1		1	
		30		30		30		10		10		10		2		2		2	
	60	5	60	5	60	5	60	2	60	2	60	2	60	0,5	60	0,5	60	0,5	
		10		10		10		5		5		5		1		1		1	
		30		30		30		10		10		10		2		2		2	
	80	5	80	5	80	5	80	2	80	2	80	2	80	0,5	80	0,5	80	0,5	
		10		10		10		5		5		5		1		1		1	
		30		30		30		10		10		10		2		2		2	

Примечание: α_n – угол падения системы трещин, град; I_T – интенсивность трещиноватости, шт/м

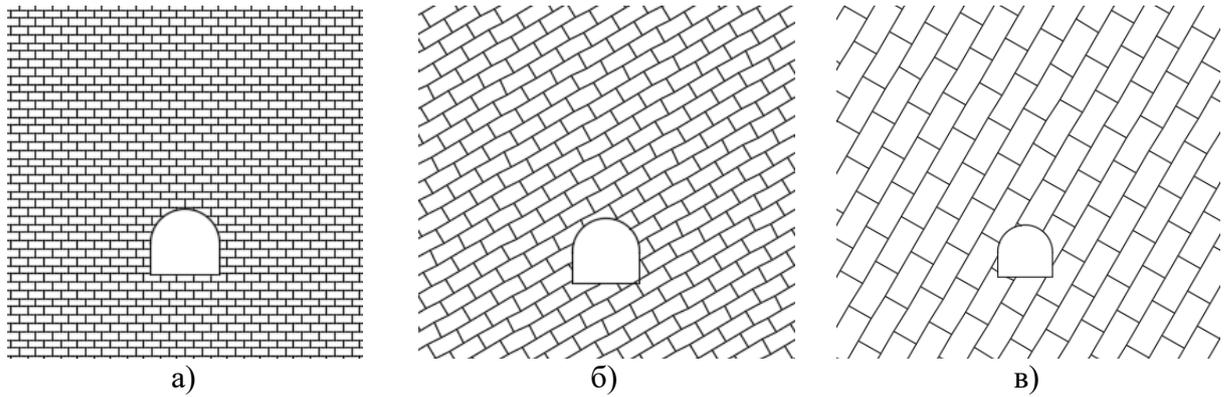


Рисунок 3.12 – Графическое представление некоторых систем трещин: а – система трещин, характеризующаяся $\alpha_n=0$, $I_T=2$ шт/м; б – система трещин, характеризующаяся $\alpha_n=30$, $I_T=1$ шт/м; в – система трещин, характеризующаяся $\alpha_n=60$, $I_T=0,5$ шт/м

К числу основных факторов, влияющих на устойчивость контура выработки, относятся: напряженное состояние массива горных пород на различных стадиях (одиночная выработка, подход к сопряжению, рассечка сопряжения, приближение фронта очистных работ), а также глубина; прочность горных пород и трещиноватость (наличие и характеристики тектонических разломов, зон повышенной трещиноватости и окисленных пород, мелких интрузий); отношение среднего размера блока к пролету выработки; геометрические параметры (форма и размеры выработки, конфигурация кровли сопряжения).

3.4.2 Напряженное состояние

Изучение влияния напряженного состояния на устойчивость приконтурного массива в рамках диссертационной работы подразумевает численное моделирование выработок, расположенных на различной глубине в условиях гравитационного или тектонического начальных полей распределения напряжений. И вертикальные, и горизонтальные компоненты напряжений находятся в линейной зависимости от глубины. В условиях рудников Хибинского массива установлено нелинейное изменение горизонтальных компонент по глубине, соответствующие условия рассмотрены в главе 4.

Прочностные параметры массива и контактные параметры трещин в данном разделе приняты для пород рихсчорритов, и остаются неизменными во всех моделях.

Результаты представлены в виде эпюр распределения напряжений; название системы трещин расшифровывается следующим образом: *БЛ_УП-60_ИТ-0,5_Г-100* – *блочный горный массив, угол падения основной системы трещин - 60°, интенсивность трещиноватости – 0,5 шт/м, глубина заложения выработки от поверхности – 100 м.*

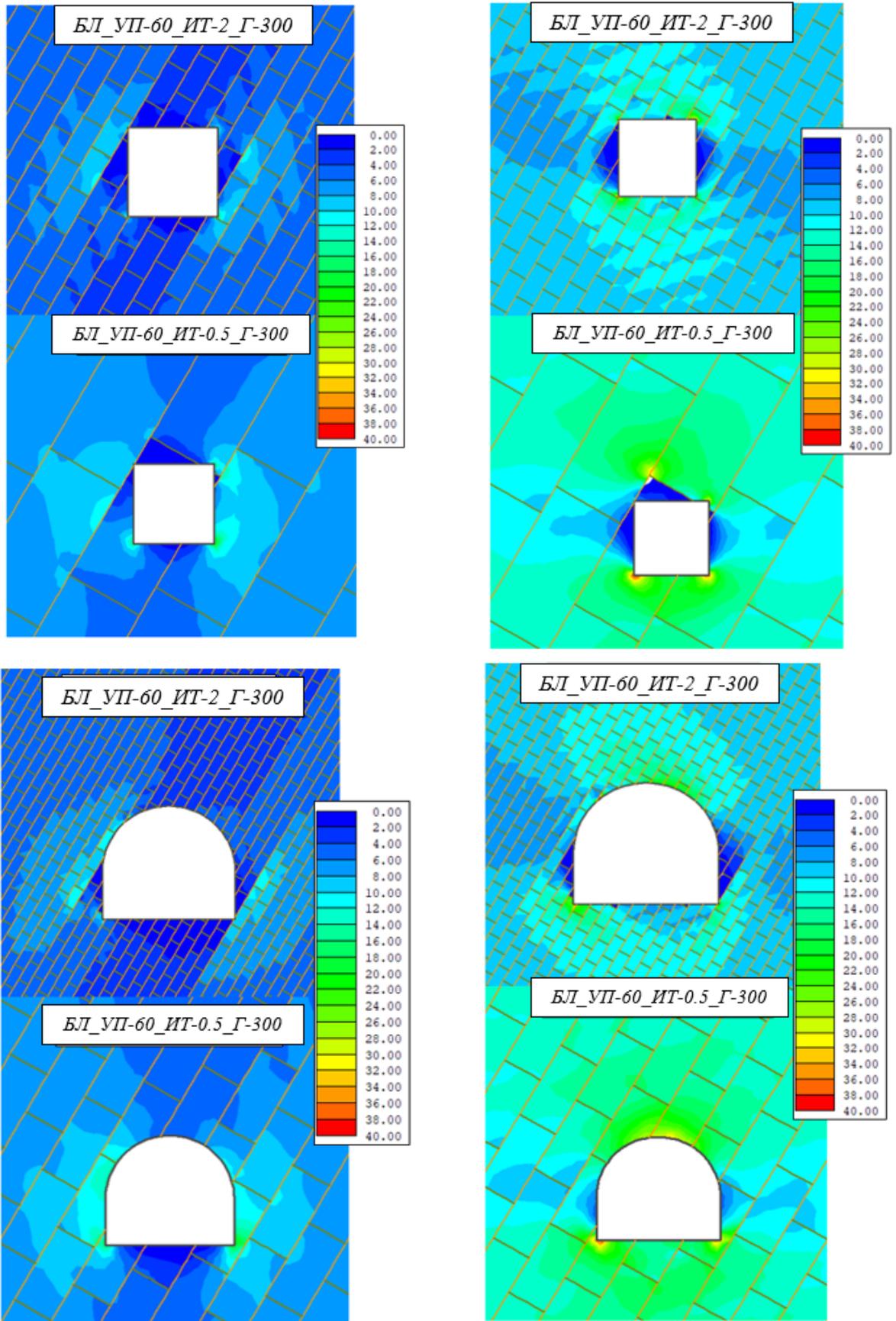
На рисунке 3.13 представлены эпюры распределения напряжений для выработки, расположенной в окрестности сопряжения в гравитационном поле распределения напряжений, при отношении горизонтальных и вертикальных напряжений – 0,5, а также в тектоническом поле распределения напряжений при соотношении горизонтальных и вертикальных напряжений – 2. На эпюрах показан недеформированный контур выработки.

Можно заметить, что характер распределения при одинаковом напряженном состоянии массива схож как для мелкоблоковой, так и для крупноблоковой трещиноватости. В гравитационном поле в зоне свода и почвы образуются зоны пониженных напряжений, в случае с плоской кровлей даже растягивающих. Образование этих зон влечет за собой формирование зон относительного смещения блоков и возможного обрушения.

При тектоническом распределении напряжений зоны пониженных напряжений образуются как в кровле, почве, так и в боках выработок. В данном случае более рациональной является сводчатая форма сечения, так как при такой форме зоны пониженных напряжений в своде незначительны, абсолютные значения смещений выше, однако смещения не приводят к обрушению, как в случае с плоской кровлей.

На рисунке 3.14 представлены графики относительных смещений вдоль траектории контура выработок. Для прямоугольного сечения за точку отсчета 0 принимается левый нижний угол выработки; для сводчатого сечения – пята свода; движение вдоль контура осуществляется по часовой стрелке. Графики построены для двух систем трещиноватости с интенсивностью IT , равной 0,5 и 2 шт/м (расстояние между трещинами 2 м и 0,5 м соответственно), в обоих случаях угол падения основной системы трещин составил 60° .

Величины смещений представлены в виде доли (процента) от максимального значения. Видно, что при всех видах напряженного состояния при плоской кровле выработки максимальные смещения наблюдаются в кровле выработки, в тектоническом поле напряжений большие смещения ожидаются и в боках выработок, так как в них наблюдаются зоны разгрузки.

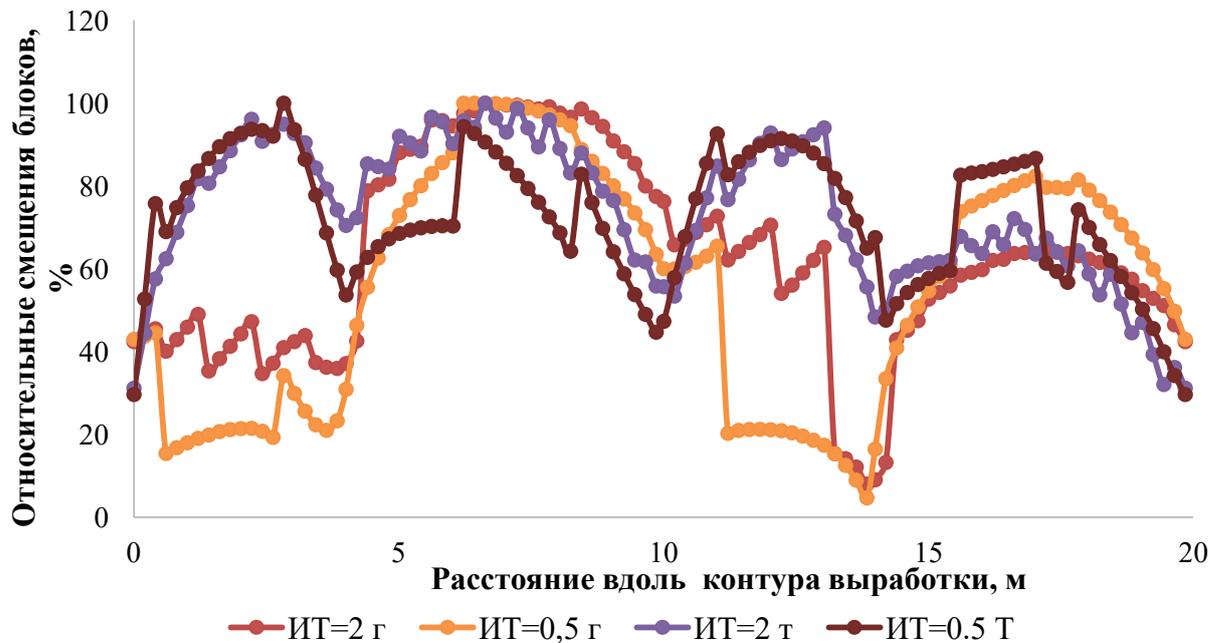


а)

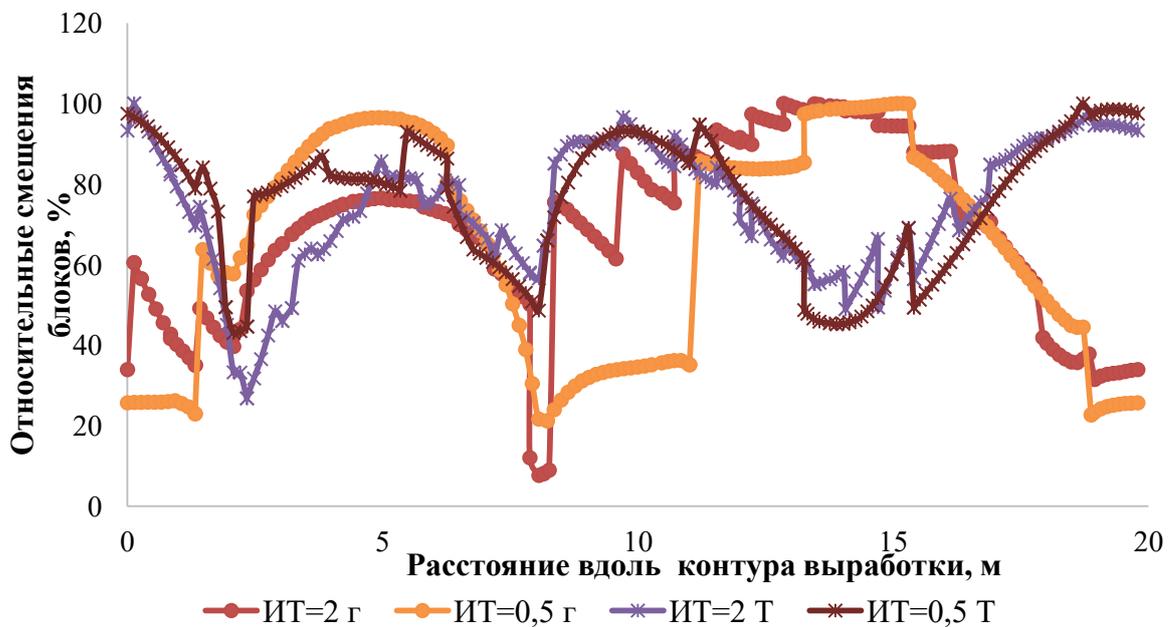
б)

Рисунок 3.13 – Эпюры распределения напряжений: а – гравитационное поле напряжений; б – тектоническое поле напряжений

При сводчатом сечении выработки характер поля напряжений оказывает более существенное влияние на распределение смещений. В гравитационном поле напряжений максимальные смещения наблюдаются в кровле и почве; в тектоническом поле напряжений – смещения больше в боках выработки. Эта закономерность свидетельствует о том, что в тектоническом поле напряжений более рациональной является сводчатое сечение.



а)



б)

Рисунок 3.14 – Графики относительных смещений породного контура выработок: а – для прямоугольного сечения выработки; б – для сводчатого сечения выработки, где «Г» - гравитационное поле распределения напряжений, «Т» - тектоническое поле распределения напряжений

Для количественного определения степени влияния напряженного состояния на деформирование породного контура на сопряжении горных выработок вводится понятие относительной напряженности массива, которая определяется согласно (3.3):

$$r = \sigma_1 / \sigma_z, \quad (3.3)$$

где σ_1 – максимальная горизонтальная компонента напряжений;

σ_z – вертикальная компонента напряжений в данной точке массива.

Влияние напряженного состояния на размеры зоны возможного обрушения в кровле сопряжений некорректно рассматривать отдельно от других факторов, поэтому все графики геометрических параметров и параметров трещиноватости построены в зависимости от напряженного состояния, выраженного параметром r .

3.4.3 Геометрические параметры выработок и пространственная конфигурация сопряжений

Геометрическими параметрами сопряжения, полностью описывающими его пространственную конфигурацию, являются расчетный пролет, угол между сопрягающимися выработками, форма кровли [11,16,44]. Изменение закономерностей распределения напряжений в окрестности сопряжения горных выработок связано с взаимным влиянием выработок и с увеличенным пролетом на их пересечении. Изучение закономерностей формирования нарушенной зоны производится для четырех основных видов сопряжений: четырехстороннее сопряжение (тип А), трехстороннее сопряжение (тип Б), боковое ответвление (тип В) и разветвление выработки под различными углами (тип Г). На рисунке 3.15 *а-г* представлены пространственные модели всех типов сопряжений.

В гравитационном поле распределения напряжений над одиночными выработками возникает зона пониженных напряжений. Такая же ситуация наблюдается и над сопряжением, что проиллюстрировано на рисунках 3.16, 3.17. Величина этой зоны возрастает до 2 раз в случае четырехстороннего сопряжения с плоской кровлей. Кроме того, в таком случае в острых углах возникают зоны отжима, напряжения в которых могут достигать значений, при которых возможно разрушение горной породы (рисунок 3.17). Прочность на одноосное сжатие горных пород на месторождении находится в пределах 130-240 МПа (таблица 3.1), однако минимальные значения могут достигать 50-60 МПа. В таком случае значения сжимающих напряжений более 40 МПа ($0,7\sigma_{сж}$) уже недопустимы. Этот факт обуславливает необходимость обеспечения скругления стенок сопрягаемых выработок между собой, даже если это не требуется технологически, что влечет за собой увеличение пролета.

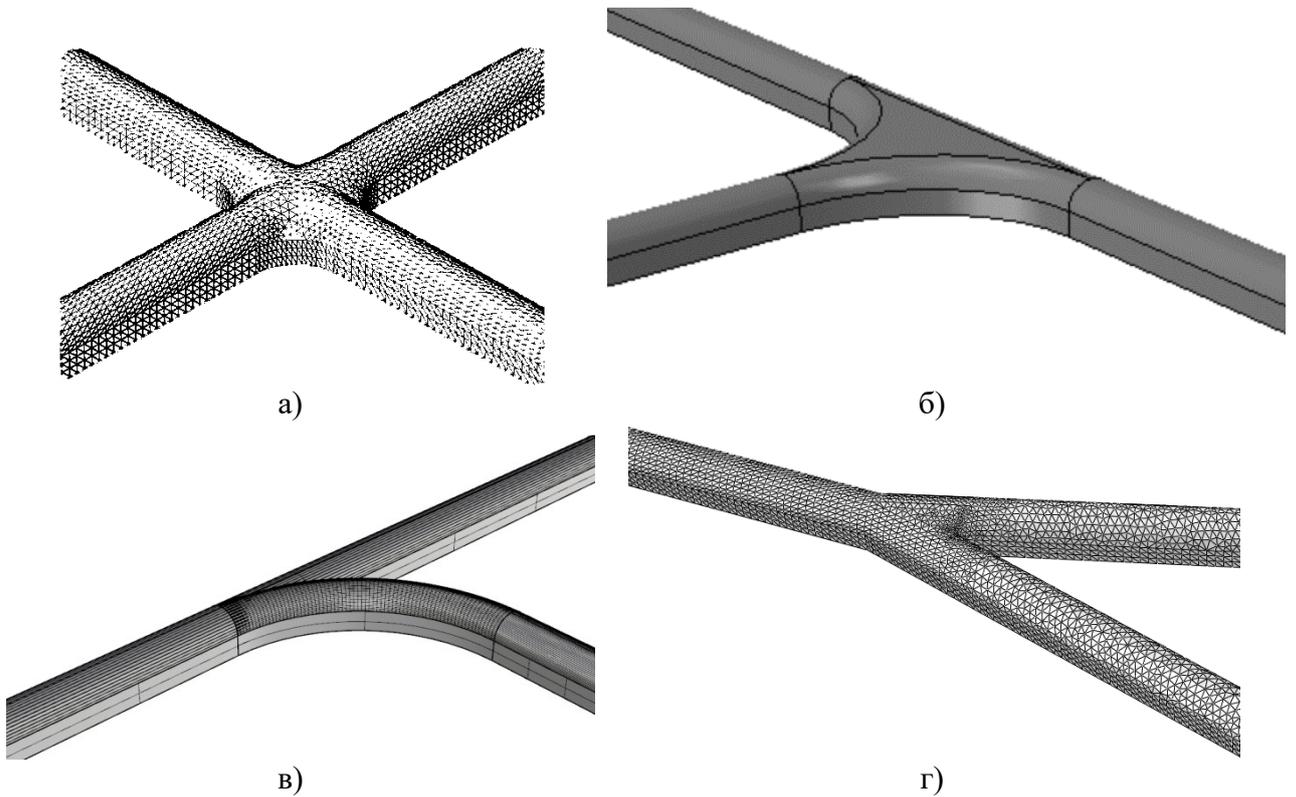


Рисунок 3.15 – Типы сопряжений: тип А (а); тип Б (б); тип В (в); тип Г (г)

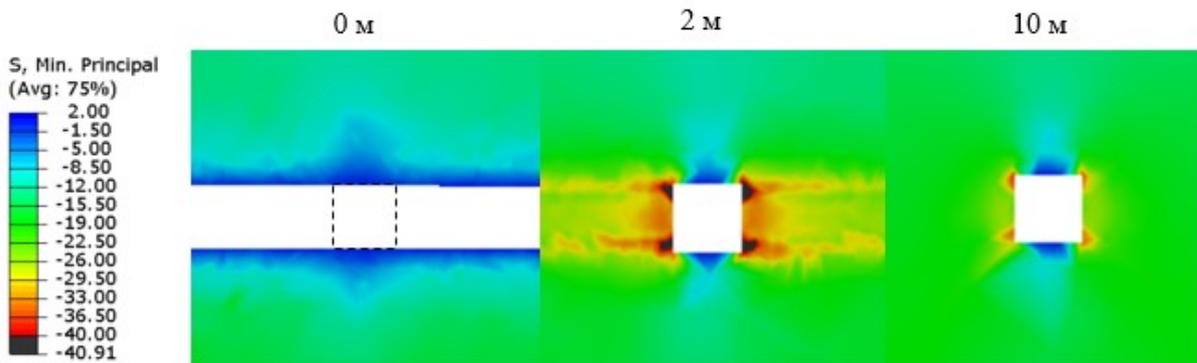


Рисунок 3.16 – Эпюры распределения максимальных главных напряжений в окрестности сопряжения выработок прямоугольного сечения

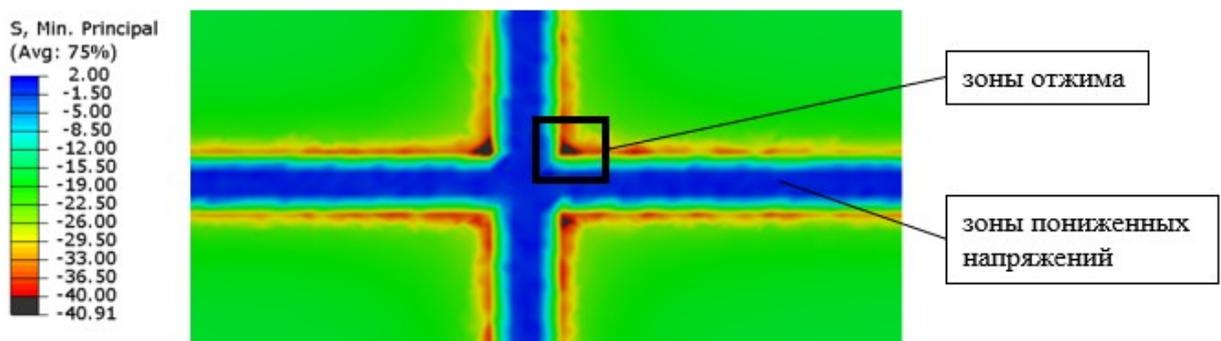


Рисунок 3.17 – Эпюра распределения максисмальных главных напряжений на плане четырехстороннего сопряжения выработок прямоугольного сечения в отметке потолочины выработок

На рисунке 3.18 приведены графики вертикальных смещений кровли выработки при плоской и при сводчатой конфигурации в зависимости от величины пролета пересекающихся выработок $V_{расч}$. Значения смещений приведены относительно величины смещения в одиночной выработке соответствующей формы поперечного сечения. Увеличение смещений в кровле выработок, расположенных в сплошном массиве, при приближении к оси сопряжения достигает 30-50 %, при этом меньшие значения наблюдаются в выработках, располагаемых перпендикулярно действию максимального главного напряжения в массиве при неравнокомпонентном поле напряжений.

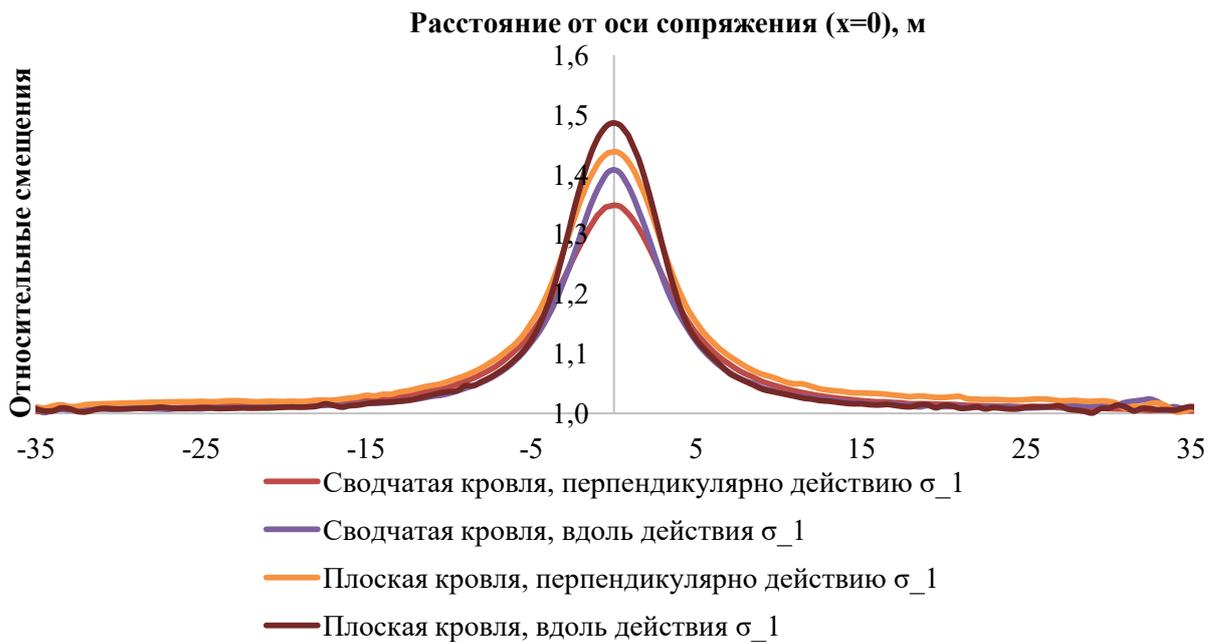


Рисунок 3.18 – График относительных вертикальных смещений в кровле выработки в зависимости от конфигурации сопряжения

Наглядно характер деформирования кровли в одиночных выработках и сопряжениях в зависимости от конфигурации кровли показан на рисунке 3.19.

Угол между сопрягающимися выработками определяет величину напряжения на контуре сопряжения, однако на размер зоны возможного обрушения влияет незначительно (рисунок 3.20). Угол между сопрягающимися выработками определяется в первую очередь технологическими требованиями, однако увеличение его способствует снижению значения сжимающих напряжений до величины, не ведущей к разрушению горной породы. Относительный размер зоны определяется как отношение максимального линейного размера (высоты) зоны возможного обрушения к величине пролета выработки или сопряжения.

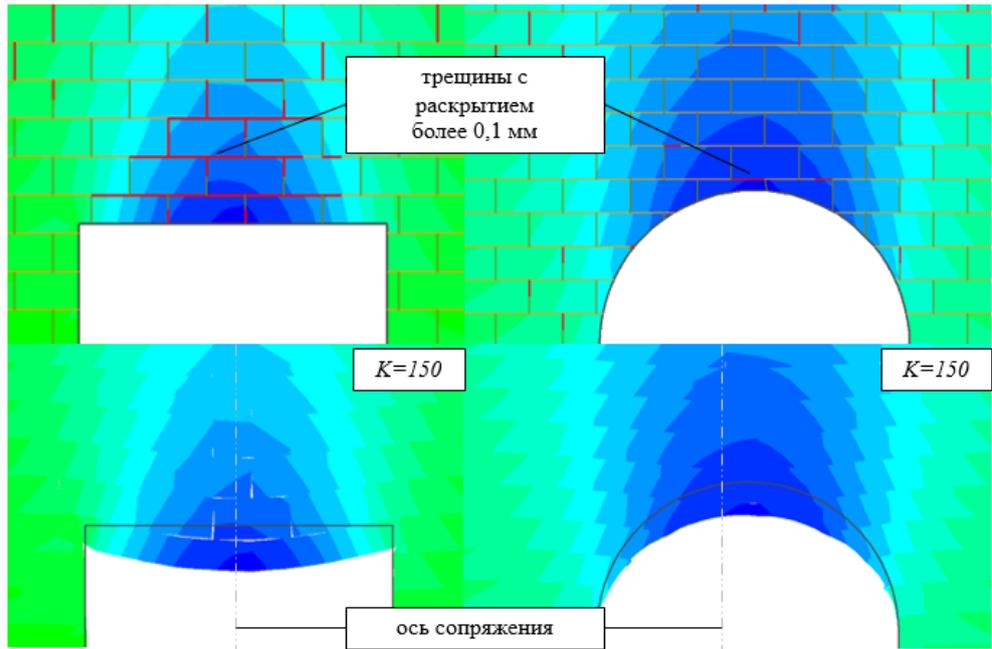


Рисунок 3.19 – Графическое изображение оседаний кровли в выработках различной конфигурации

Для определения количественного влияния угла сопрягающихся выработок α на напряженное состояние в кровле сопряжения, вводится поправочный коэффициент K_α . Значения коэффициента K_α приведены в главе 4.

Для выработок одинаковой площади поперечного сечения, напряжения по оси сопрягающейся выработки возвращаются к естественным на расстоянии $L_{изм}$ в зависимости от угла сопряжения, который определяет размеры зоны взаимного влияния выработок.

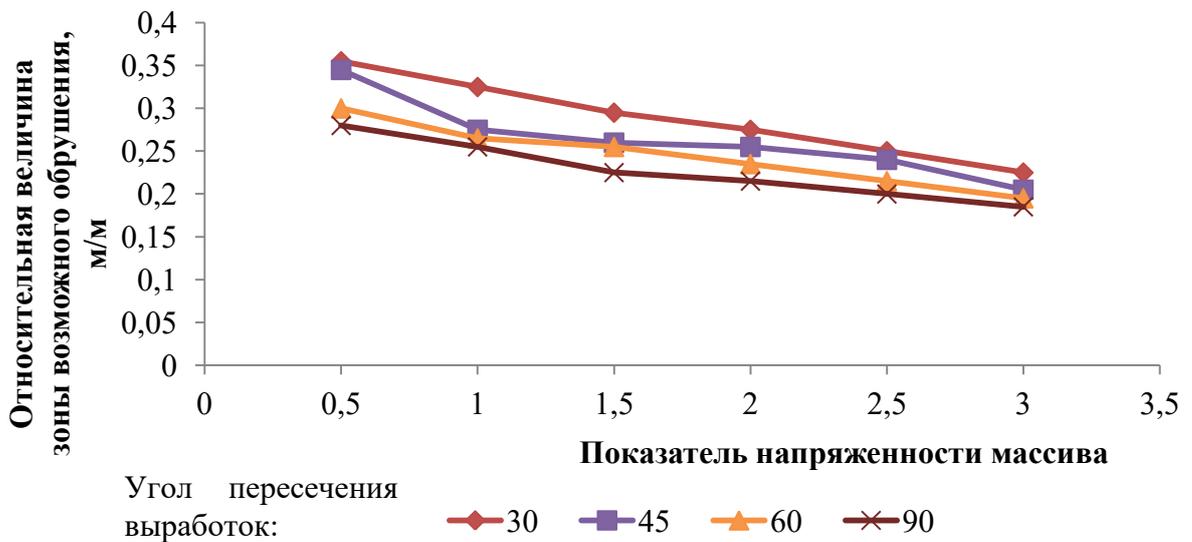


Рисунок 3.20 – Зависимость величины зоны возможного обрушения от показателя напряженности массива для различных углов пересечения выработок

Площадь сопряжения S_c можно считать всю площадь выработок, на которых наблюдается изменение напряженного и деформированного состояния. Расстояние вдоль оси выработки, на котором наблюдается изменение напряженно-деформированного состояния (рисунок 3.21), можно предварительно определять по зависимости (3.4):

$$S_c = \sum_{i=1}^n B_{\text{выр}} \cdot L_{\text{изм}} = \sum_{i=1}^n B_{\text{выр}} \cdot \frac{B_{\text{расч}}}{\alpha_{\text{сопр}}}, \quad (3.4)$$

где n – число сопрягающихся выработок;

$B_{\text{расч}}$ – расчетный пролет, определяемый геометрически, м;

$\alpha_{\text{сопр}}$ – угол между сопрягающимися выработками, рад.

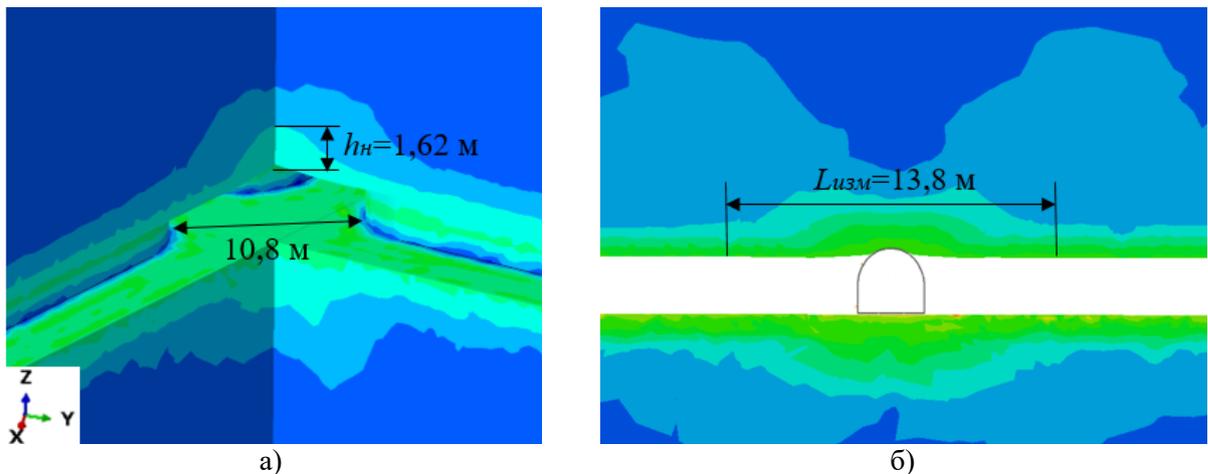


Рисунок 3.21 – Зоны измененного напряженно-деформированного состояния: общий вид (а) и продольное сечение по оси четырехстороннего сопряжения (б)

3.4.4 Характер трещиноватости

Трещиноватость в приконтурной зоне выработок и сопряжений горных выработок может носить различный характер (рисунок 1.5). В данной главе рассмотрено влияние типа трещиноватости на распределение напряжений на контуре выработки.

Слоистость. Под слоистостью подразумевается наличие одного преимущественного направления анизотропии в породном массиве. Слои пород в таком случае лежат согласно.

Направление анизотропии массива значительно влияет на распределение напряжений в окрестности выработки, при этом установлено, что средние значения углов наклона (30-60 градусов) влияют на распределение напряжений в отличие от сплошного массива больше, чем субгоризонтальная либо субвертикальная трещиноватость (рисунок 3.22). Данная закономерность распространяется и на массивы с несколькими системами трещин.

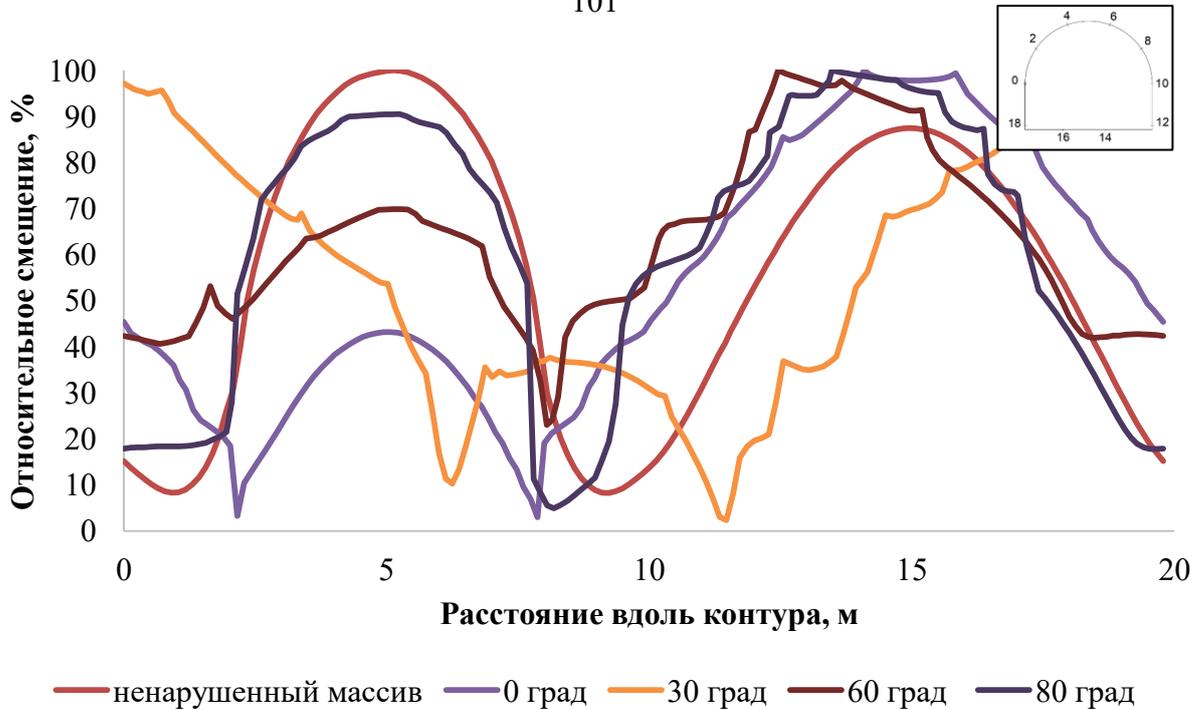


Рисунок 3.22 – График относительных смещений по контуру выработки сводчатого сечения в слоистом массиве, $ИТ=0.5$

Блочный массив. При наличии нескольких взаимно пересекающихся систем трещин формируются отдельные, или блоки, которые могут перемещаться относительно соседних, степень их свободы обуславливается действующими в массиве напряжениями и контактными свойствами. В настоящей работе рассматриваются случаи, когда одна из систем имеет преимущественное направление падения под углами 0, 30, 45, 60 и 80°.

Было изучено влияние интенсивности трещиноватости на размер нарушенной зона. В модели сопряжения интенсивность трещиноватости $ИТ$ последовательно менялась от 0 (ненарушенный массив) до 3 (3 шт/м). При измерении максимального линейного размера нарушенной зоны были выведены коэффициенты пропорциональности.

На рисунке 3.23 приведены зависимости относительного размера зоны возможного обрушения от интенсивности основной системы трещин в блочном массиве. Видно, что при расположении сопряжения в поле напряжений, близком к гравитационному, зависимость нарушенной зоны от интенсивности трещиноватости проявляется в большей степени. При значительном преобладании горизонтальных компонент напряжений вывалы в трещиноватых породах, вне зависимости от интенсивности трещиноватости, практически не образуются.

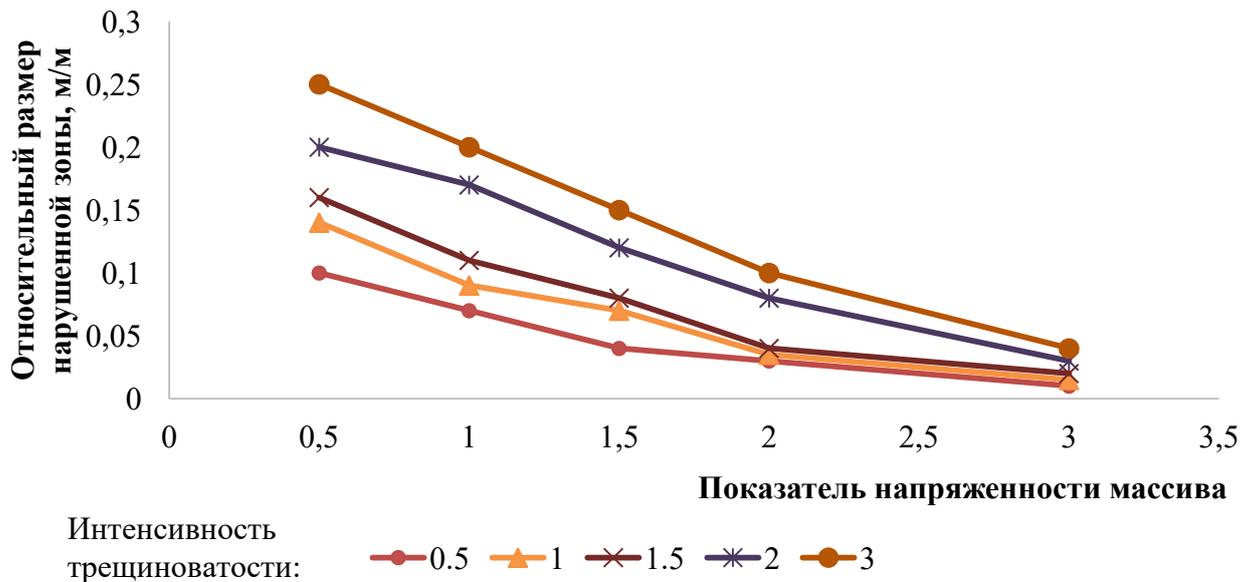


Рисунок 3.23 – Зависимость величины нарушенной зоны от соотношения σ_r/σ_B в блочном массиве

Исследования показали различие формы зон разрушения в зависимости от типа пересечения (рисунок 3.24). Формы зон разрушения, представленные на рисунке 3.24, получены путем аппроксимации возможных вариантов систем трещин при изменении угла падения от 0° до 80° и интенсивности трещин от 0,5 до 10 1/м. Геометрия стыка для каждого случая изменялась при постоянном среднем размере блока l , контуры потенциальной зоны разрушения определялись путем усреднения полученных результатов. Установлено, что положение точки максимального линейного размера зоны разрушения изменяется в зависимости от типа пересечения.

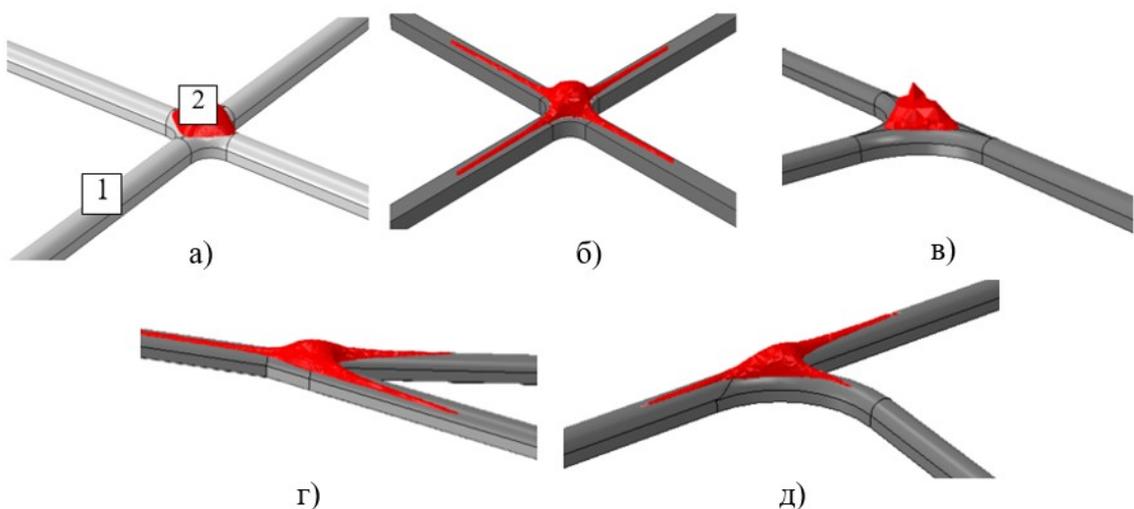


Рисунок 3.24 – Формы зон обрушения для четырехстороннего сопряжения арочного и прямоугольного сечения – тип А (а, б), трехстороннего сопряжения – тип Б; ответвление под углом α – тип С (г); боковая ветвь – тип D (д): 1 – котлован, 2 – зона провала

3.4.5 Контактные свойства трещин

Параметры взаимодействия между блоками являются одними из основополагающих факторов, определяющих устойчивость блочного массива. Скольжение по трещине происходит при достижении силой трения по контакту предельного значения согласно условию (3.5):

$$\tau_{\text{пр}} = \mu \cdot \sigma_n, \quad (3.5)$$

где μ – коэффициент трения, определяемый как функция от нормального напряжения на контакте σ_n .

Таким образом, важным этапом в прогнозировании смещений блоков является достоверное определение коэффициента трения μ . На рисунке 3.25 представлены графики смещений породного контура сводчатой выработки при задании трех различных критериев прочности по контакту в сравнении со смещениями по контуру при моделировании массива как сплошной среды. Применение линейного критерия для описания контактного взаимодействия между блоками приводит к занижению величин смещений. Критерии Мора-Кулона и Бартона-Бандиса дают схожие результаты, позволяющие прогнозировать смещения отдельных блоков. На рисунке 3.25 приведены графики относительных смещений по контуру выработки для сплошного массива и для нарушенного массива со средним размером блока 0,2x0,4 м и горизонтальным залеганием основной системы трещин.

На графике интервал с 3 до 5 является участком свода выработки. Моделирование массива в виде сплошной среды не позволяет установить характер деформирования массива в своде выработки. Кроме того, значения смещений могут отличаться в несколько раз, что обуславливается возможностью блоков перемещаться по контактам трещин.

На графике представлены зависимости, полученные для моделей с заданными свойствами по контакту в рамках критерия прочности Мора-Кулона, Бартона-Бандиса и линейного критерия прочности. Применение линейного критерия для описания контактного взаимодействия между блоками приводит к занижению величин смещений. Критерии Мора-Кулона и Бартона-Бандиса дают схожие результаты, позволяющие прогнозировать смещения отдельных блоков.

Изучение влияния геометрических параметров трещиноватости массива на напряженно-деформированное состояние приконтурного массива при выполнении численных расчетов в работе рассматривается с применением нелинейного критерия прочности по контакту Бартона-Бандиса.

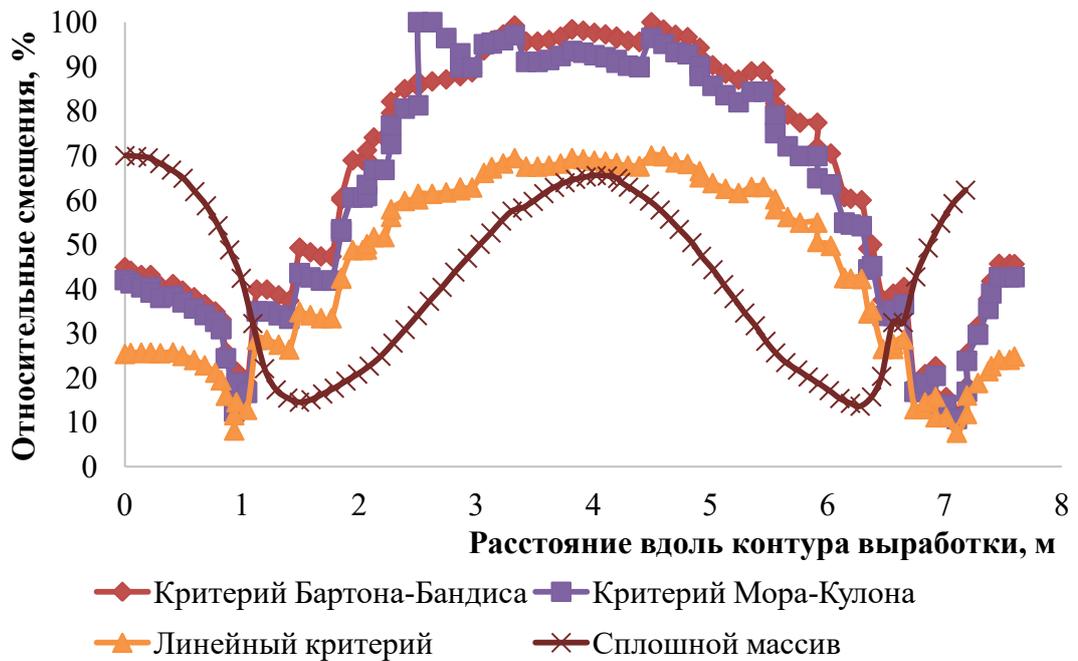


Рисунок 3.25 – График относительных смещений по контуру выработки для сплошного и нарушенного массива

На рисунке 3.26 представлен график относительного размера зоны возможного обрушения по мере удаления от сопряжения. На оси сопряжения размер области может достигать половины площади поперечного сечения одиночной выработки. Зависимость представлена для среднего удельного размера блоков 0,25 и угла падения системы трещин 45° . График показывает, что размер нарушенной зоны сильно зависит от контактных свойств трещин, и не так значительно – от конфигурации кровли самого сопряжения – плоской или сводчатой.

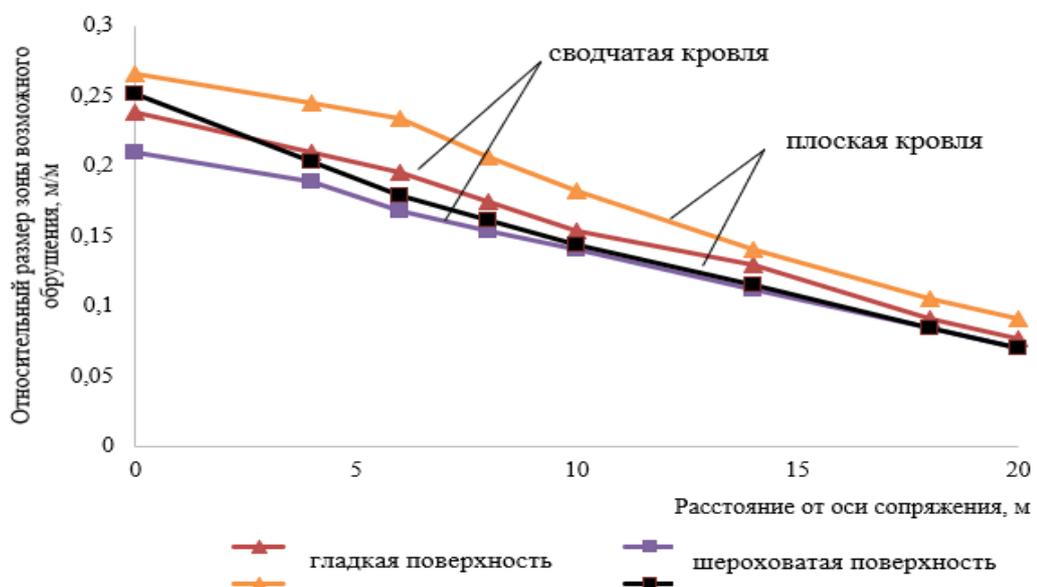


Рисунок 3.26 – Зависимость относительного размера зоны возможного обрушения от расстояния до оси сопряжения типа А

Величина удельной нарушенной зоны отличается практически в 1,5 раза при изменении значения JCS в 3 раза. Однако из-за комплексности показателя контактные свойства трещин будут учитываться в методике при определении размера нарушенной зоны через показатель Бартона Q.

На рисунке 3.27 представлены сводные эпюры с границами зон возможного обрушения на участках одиночных выработок и сопряжений.

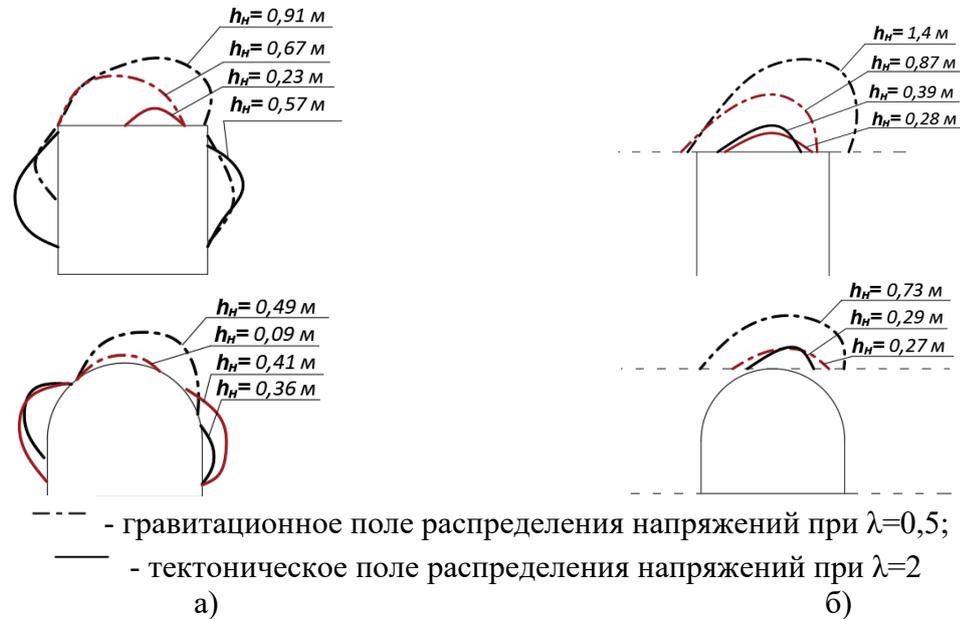


Рисунок 3.27 – Границы зон возможного обрушения для выработок в различных условиях: а – на участке одиночной выработки; б – на участке сопряжения; черным цветом обозначены зоны потенциального вывала при $IT=2$; бордовым – при $IT=0,5$.

Из результатов моделирования следует, что характер распределения смещений контура выработки при незначительных деформациях аналогичен для сплошного (рисунок 2, а) и нарушенного (рисунок 2, б) массивов. Однако в пределах зон пониженных напряжений, вследствие возможности перемещения блоков по контактам, значения могут отличаться в несколько раз, что предопределяет возможность формирования зоны обрушения (рисунок 2, в). Таким образом, моделирование массива в рамках механики сплошной среды не позволяет выявить механизм потери устойчивости при наличии структурной нарушенности и может использоваться только для оценки размеров зон пониженных напряжений.

Влияние выбора математической модели контактного взаимодействия на поведение блоков исследовано в плоской постановке без учета сцепления (рисунок 3, а). Сравнение с натурными данными, полученными в работах отечественных и зарубежных исследователей, а также с результатами моделирования шероховатости в явном виде

показало, что линейный критерий Мора-Кулона некорректно описывает прочность контакта между взаимодействующими блоками.

Форма и размеры зоны обрушения также зависят от принятой контактной модели. Закономерности получены для одиночной выработки сводчатой формы поперечного сечения, расположенной в блочном массиве. Расчетная схема задачи приведена на рисунке 3, б. Геометрия трещин для каждого случая менялась три раза с сохранением среднего размера блоков l , а контуры зоны возможного обрушения определялись усреднением полученных результатов. Критерием границы зоны принято раскрытие трещин, равное 0,1 мм, величина которого установлена на основании сравнения с результатами инструментальных измерений размеров зон обрушенных пород. Моделирование в рамках механики сплошной среды с заданием эквивалентных прочностных и деформационных свойств позволяет оценить размер зоны возможного обрушения (рисунок 4) и может использоваться для предварительных расчетов. Использование критериев Кулона-Мора и Бартона-Бандиса для описания свойств по контакту блоков позволяет определить блоки, склонные к обрушению, однако значения при использовании критерия Кулона-Мора завышены.

3.6 Выводы по Главе 3

В третьей главе выполнено обоснование параметров численных моделей блочной среды, обоснованы данные для их верификации. В частности, обосновано использование модели Кулона-Мора для моделирования поведения сплошного массива, ослабленного трещинами, или сплошных породных блоков в дискретном массиве. Для описания поведения на контактах блоков обосновано применение нелинейного критерия Бартона-Бандиса.

Выбор типа представления среды зависит от цели расчетов и требуемой достоверности полученных результатов. Моделирование массива в виде сплошной среды рекомендуется для оценочных расчетов. В случае высокой интенсивности трещиноватости также возможно моделирование участка массива в виде сплошной среды с эквивалентными прочностными и деформационными свойствами.

На основании численного моделирования сопряжений выработок нескольких типов, расположенных в трещиноватых массивах, получены зависимости относительных размеров зоны разрушения от указанных основных факторов. При моделировании изменялась форма выработки и свода сопряжения, глубина заложения – от 100 до 600 м; пролет выработки – от 2 до 6 м; угол падения основной системы трещин – от 0 до 80° и интенсивность трещиноватости (в зависимости от пролета выработки) – от 0,5 до 30 шт/м.

Установлены количественные зависимости влияния таких параметров, как угол пересечения сопрягающихся выработок, форма кровли сопряжения, напряженное состояние массива и параметры трещиноватости, на устойчивость пролета сопряжения, которая выражается в относительном размере зоны возможного обрушения.

Форма зон разрушения одинакова в массивах горных пород как с высокой, так и с малой интенсивностью трещиноватости, однако интенсивность трещиноватости существенно влияет на ее размеры, особенно в массивах горных пород, характеризующихся полями напряжений, близкими к гравитационным. Напряженное состояние и конфигурация сопряжений оказывает существенное влияние на форму зоны разрушения.

Предлагаемая методика оценки напряженно-деформированного состояния массива в окрестности сопряжений в структурно-нарушенном массиве основывается на следующих концепциях:

1. Для достоверного прогноза напряженно-деформированного состояния приконтурного массива необходима подробная информация о трещиноватости; для этого исследования необходимо проводить на конкретном участке массива при подходе к месту предполагаемого пересечения выработок.

2. Применение численных геомеханических моделей позволяет наиболее точно произвести расчет конкретной задачи с учетом большого количества факторов. Рассмотрение небольшой области массива позволяет сократить время и трудоемкость расчета за счет рассмотрения участков, не оказывающих влияние на формирование напряженно-деформированного состояния приконтурного массива. Структурную нарушенность в явном виде необходимо задавать на участке пониженных напряжений, размер которого может быть определен в каждом конкретном случае при моделировании сопряжения в пространственной постановке в рамках механики сплошной среды.

3. Выбор математической модели, описывающей поведение массива, должно выполняться отдельно для сплошных блоков и поверхностей ослабления между ними. Модель Кулона-Мора не требует большого количества исходных данных для описания поведения сплошных деформируемых блоков и дает приемлемый результат. Для описания поведения поверхностей ослабления обосновано применение модели Бартона-Бандиса.

4. Характер деформирования блочного массива зависит в большей степени от контактных свойств трещин, а не от свойств сплошного массива, поэтому необходимо тщательное изучение параметров трещин. Для описания их поведения рекомендуется использовать зависимости, предложенные Бартоном.

4. Метод оценки зоны потенциального вывалообразования основан на определении величины смещения блоков, образующих трещины разрыва по контактам плоскостей ослабления. На контуре выработки определяются участки максимальных смещений, происходящие по плоскостям ослабления. Затем исследование проводится вглубь массива, при этом определяются величины раскрытия трещин. При величине раскрытия трещин больше нуля как минимум с 3 сторон блока, данный блок попадает в потенциальную зону вывала.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА НАГРУЗОК НА КРЕПЬ НА УЧАСТКАХ СОПРЯЖЕНИЙ

4.1 Общие положения

Достоверный прогноз ожидаемых нагрузок на крепь горных выработок является одним из важнейших пунктов при проектировании и строительстве горного предприятия. В зависимости от условий расположения и характеристик вмещающего массива разработано большое количество методик для определения нагрузок на крепь одиночной выработки. Однако данные методики позволяют лишь приближенно оценить процессы, происходящие на сопряжениях. В них вводятся эмпирические коэффициенты, которые могут варьироваться от предприятия к предприятию или от участка к участку.

Это обуславливает необходимость обобщения полученных зависимостей в комплексную методику, позволяющую учесть факторы, оказывающие влияние на напряженно-деформированное состояние приконтурного массива сопряжения.

Как было описано ранее, основной целью при прогнозе нагрузок на крепь выработок в трещиноватых блочных массивах является оценка параметров нарушенной зоны, формирующейся при проходке одиночной выработки или при рассечке сопряжения.

Результаты, полученные в процессе численного моделирования сопряжений различной конфигурации и расположенных в различных условиях структурной нарушенности и напряженного состояния, позволили выделить зависимости размера нарушенной зоны от этих условий.

В данной главе рассмотрено практическое применение полученных результатов в виде дополнения к методике определения нагрузок на крепь одиночных выработок. Методика дополняется коэффициентами, позволяющими учесть изменение размера зоны возможного обрушения в зависимости от геометрии сопряжения, параметров структурной нарушенности и начального напряженного состояния массива.

4.2 Прогноз развития напряженно-деформированного состояния приконтурного массива на участках сопряжений горных выработок для условий апатит-нефелиновых месторождений

Горный массив в пределах Кировского рудника характеризуется сложными горно-геологическими условиями, в частности, наличием блочности и сложным напряженным состоянием. В результате изучения научной литературы и отчетов ВНИМИ и Научного центра геомеханики и проблем горного производства было выделено четыре основные системы трещин (таблица 3.2). Графическая интерпретация выделенных систем трещин представлена на рисунке 4.1.

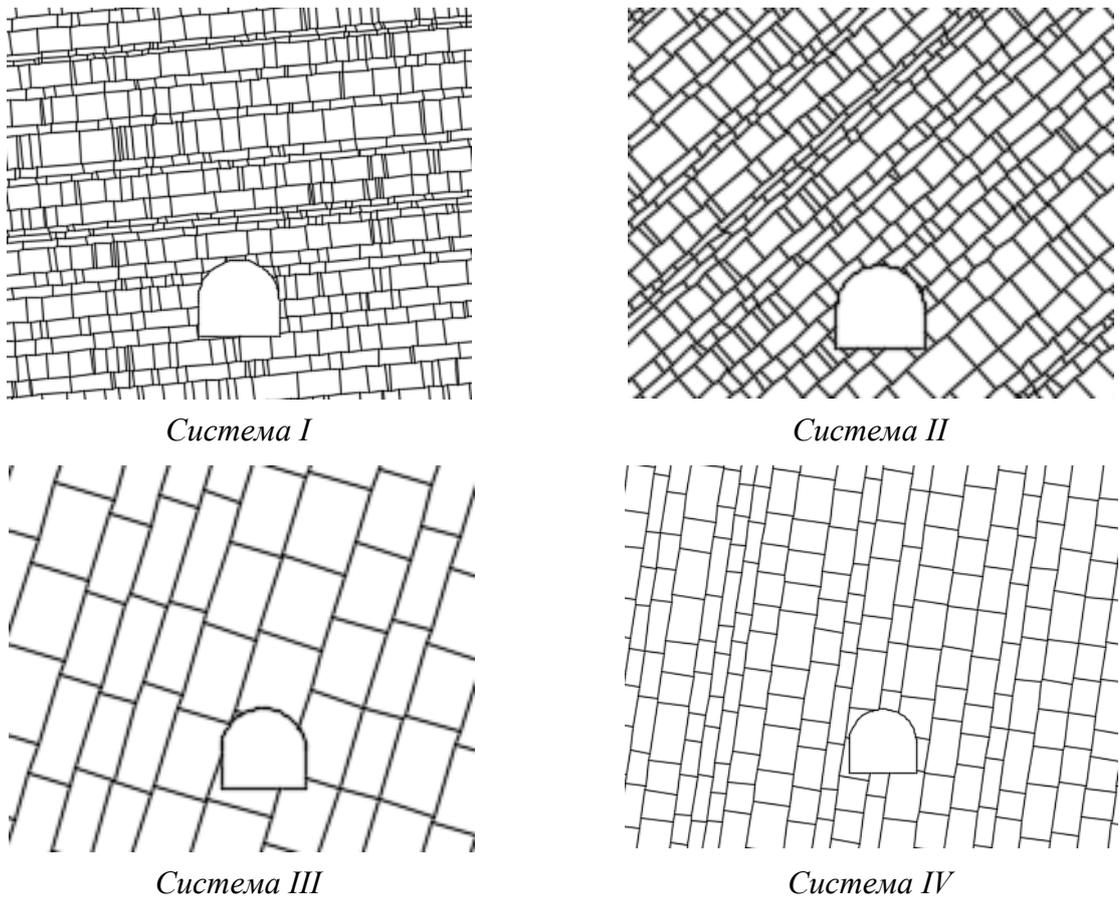


Рисунок 4.1 – Графическое представление систем трещин I, II, III, IV

Интерес для рассмотрения представляют системы I и II, так как относительный размер блока в них достаточно мал для формирования зоны возможного обрушения

На Хибинских апатитовых рудниках отмечены все формы динамических проявлений горного давления от внешних признаков удароопасности (шелушение, динамическое заколообразование, стреляние) до собственно горных ударов как локального, так и регионального происхождения. Это объясняется тем, что начальное поле распределения напряжений имеет тектонический характер с превышением горизонтальными компонентами вертикальных. Одной из особенностей поля напряженного состояния является отличие горизонтальных компонент напряжений по простиранию и вкрест простирания.

Таким образом, преимущественно массив склонен к хрупкому разрушению. Однако на участках с повышенной трещиноватостью (IV, V категорий) и при напряженном состоянии, характеризующемся как $\sigma_d \leq 0,3\sigma_{сж}$, могут наблюдаться обрушения. Поэтому одним из важных этапов при проведении расчетов является не только оценка структурной нарушенности, но и правильный учет напряженного состояния на контуре выработки.

Прогноз напряженно-деформированного состояния в описанных условиях выполнен для сопряжений типа А-Г, расположенных в массивах, характеризующихся системами трещиноватости I и II. На рисунке 4.2 приведены эпюры смещений для сопряжения типа А со сводчатой кровлей. Сопряжение располагается на глубине 300 м в массиве с неравнокомпонентным полем напряжений:

$$\lambda_x = 1,5; \lambda_y = 2.$$

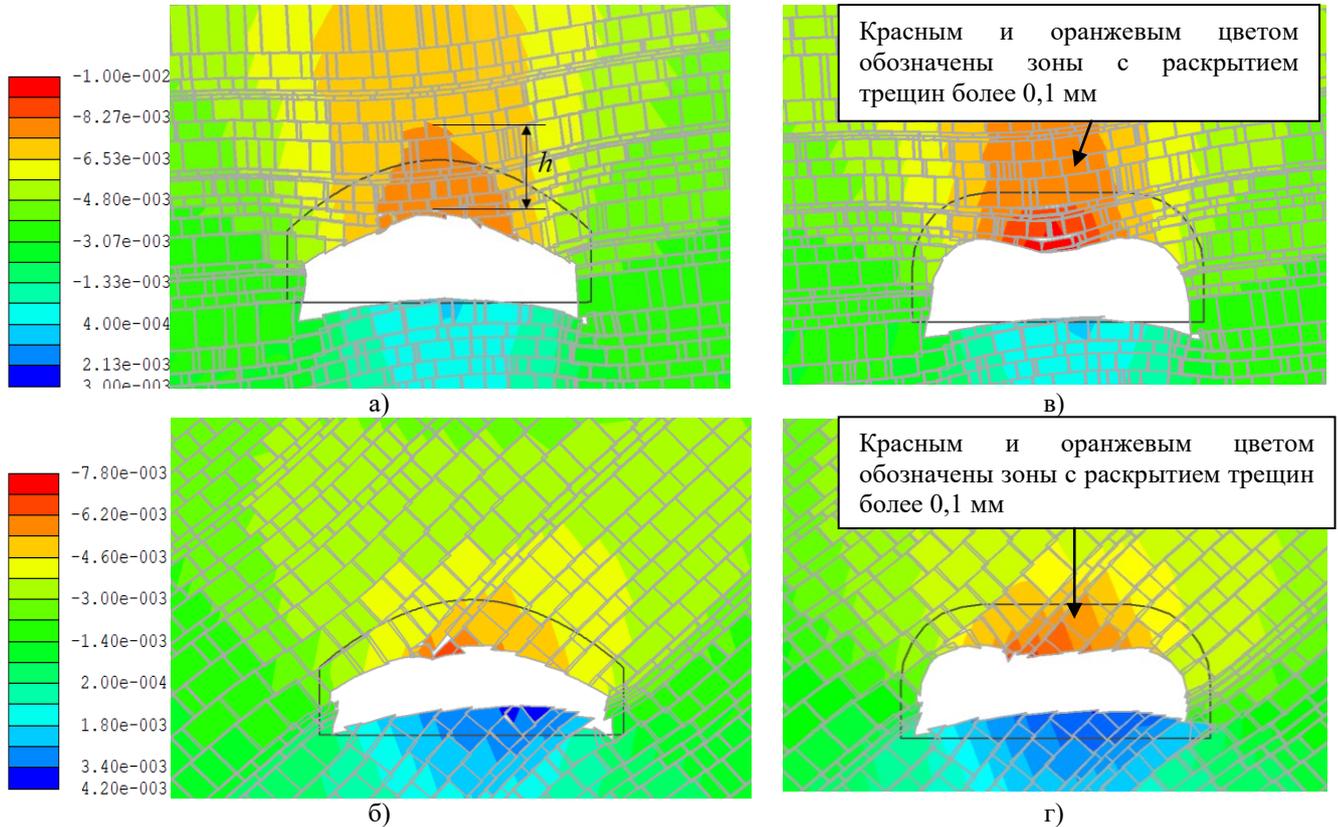


Рисунок 4.2 – Эпюры смещений массива в окрестности сопряжений в массивах, характеризующимися системами трещин I (а, б) и II (в, г), масштабный коэффициент 5

Контур зоны обрушения определяется блоками, не менее двух (в плоской постановке) или трех (в пространственной постановке) контактных поверхностей которых отделены от массива или раскрытие трещин составляет более 0,1 мм. Соответствующие зоны выделены красным и оранжевым цветами на рисунке. Диаграммы деформирования системы трещин I (рисунок 4.2а, б) и системы соединений II (рисунок 4.2, в, г) показывают различие характера деформаций в зависимости от среднего размера блоков. Можно констатировать, что форма кровли оказывает существенное влияние на размер потенциальной зоны разрушения: ее размер увеличивается до 4 раз.

Рекомендованной крепью [62] для сопряжений является набрызгбетон или армированный набрызгбетон в комбинации с анкерным креплением. Длина анкерной крепи должна подбираться с учетом размера зоны возможного обрушения. На данном этапе длина анкерной крепи определена геометрически в соответствии с размерами зоны,

полученной численным моделированием. На рисунке 4.3 представлен график смещений сопряжений, закрепленных комбинированной крепью из набрызгбетона и анкеров. Размеры зоны возможного обрушения уменьшаются практически до нуля, избежать выпадения блоков позволяет использование металлической сетки, натянутой между анкерами. Величины относительных смещений, представленные на графике (рисунок 4.3), являются модулем отношения величины абсолютного смещения на контуре к расчетному пролету сопряжения.

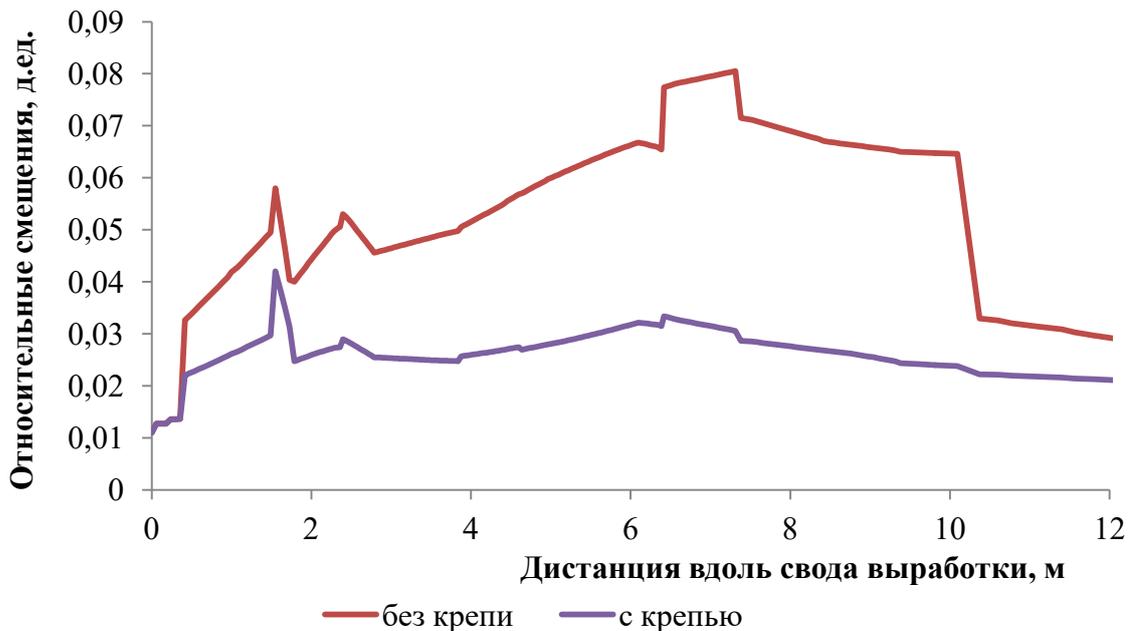


Рисунок 4.3 – График относительных смещений свода для сопряжения типа А, расположенного в массиве с I системой трещин

Установка крепи позволяет снизить размеры зоны возможного обрушения и свести смещения породного контура практически к нулю. Таким образом, необходимо тщательно подбирать параметры крепления в зависимости от размера нарушенной зоны в каждом конкретном случае.

4.3 Методика определения параметров зоны возможного обрушения на сопряжениях горных выработок

На рудниках КФ АО «Апатит» действует «Инструкция по креплению и управлению кровлей горных выработок (Положение по креплению и поддержанию горных выработок)», разработанная в 2019 г.

Определение параметров крепи в общем случае осуществляется на основании установленных параметров нарушенной зоны вокруг выработки. Размер нарушенной зоны для выработок и сопряжений всех выработок всех категорий в соответствии с Указаниями [62] определяется как (4.1):

$$h_n = 0,02(7,5 + I_T + 2K_c + 6,5B)K_y, \quad (4.1)$$

где I_T – интенсивность трещиноватости, шт/м;

K_c – показатель, характеризующий категорию состояния выработки («Б», «В», «Г» или «Д»);

B – пролет выработки вчерне, для сопряжений принимается ширина большей из выработок;

K_y – показатель, характеризующий условия эксплуатации выработки и геометрические особенности сопряжений выработок (таблица 4.1).

Таблица 4.1- Значения показателя K_y

Характеристика выработки	Категория состояния выработки	Значение показателя K_y		
		Вне зоны влияния очистных работ	В зоне влияния очистных работ	Для выпускных и доставочных выработок
Одиночные выработки	«Б»-«Д» и «опасно»	1	1,6	2
Вне сопряжения выработок	«Б»-«Г»			
Трехсторонние сопряжения выработок	«Д»	1,25	2	2,5
Четырехсторонние сопряжения выработок	«Д»	2	3,2	4
Все виды сопряжений	«опасно»			

Данная формула эмпирически учитывает пространственную конфигурацию сопряжений, но не учитывает форму кровли, а также угол между сопрягающимися выработками, в определенных условиях, оказывающих большое влияние на напряженное состояние приконтурного массива.

Нагрузка на крепь сопряжений горных выработок также может рассчитываться как для большепролетных выработок. В методике также могут быть учтены две конфигурации сопряжений (трехстороннее и четырехстороннее). В формулу добавлен показатель Q , определяющий состояние пород и контактных поверхностей трещин согласно классификации Бартона [76]. Данный показатель учитывает RQD , шероховатость контакта по трещинам, интенсивность трещин, обводненность и фактор снижения прочности SRF (4.2).

$$h_n = \frac{0,2B}{J_r \sqrt[3]{\frac{Q}{s}}}, \quad (4.2)$$

где B – пролет (ширина) выработки вчрне, м, для сопряжений принимается пролет наибольшей из сопрягаемых выработок;

J_r – показатель, характеризующий качество контакта стенок трещин;

Q – модифицированный индекс Бартона, при проведении разгрузочных мероприятий уменьшается в 5 раз при категории «Г», в 20 раз – при «Д»;

s – коэффициент формы горной выработки, для одиночной выработки, $s = 1$ для одиночной выработки, $s = 2,5$ для трехстороннего сопряжения, $s = 3$ для четырехстороннего сопряжения.

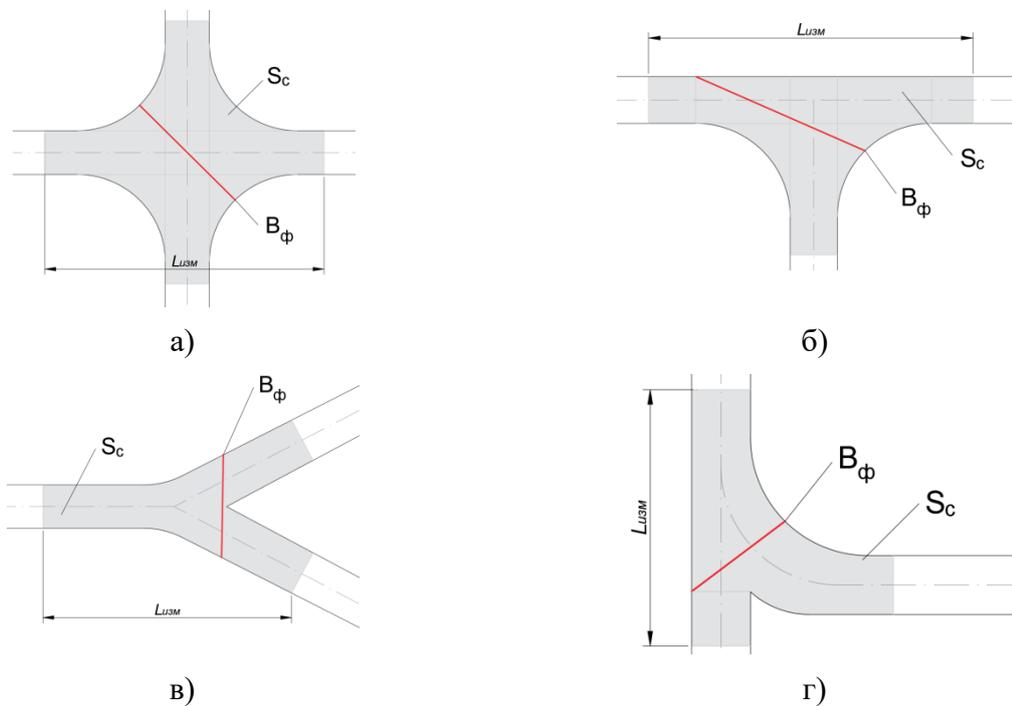


Рисунок 4.4 – Схемы к определению расчетного пролета для четырехстороннего (а), трехстороннего (б) сопряжения, разветвления под углом α (в), бокового ответвления (г)

Согласно проведенным исследованиям, помимо вышперечисленных показателей, необходимо в расчет нарушенной зоны над сопряжением включать следующие:

- вместо ширины наибольшей из выработок, необходимо учитывать эквивалентный пролет сопряжения, определенный геометрически как наибольшее расстояние между соседними стенками согласно рисунку 4.4;

- необходимо ввести коэффициент конфигурации сопряжения, учитывающий форму кровли, угол сопряжения выработок;

- необходимо учитывать напряженное состояние вмещающего массива;

- при расчете анкерной крепи необходимо учитывать толщину набрызгбетонной крепи.

На основании полученных зависимостей размера зоны возможного обрушения от влияющих факторов выполнено обоснование величин поправочных коэффициентов пропорциональности, которые позволяют отдельно учесть форму сечения, начальное поле напряжений в массиве и геометрические параметры структурной нарушенности массива:

Методика разработана на основе существующей с учетом полученных зависимостей размера зоны возможного обрушения от влияющих факторов: формы поперечного сечения, начального поля напряжений в массиве и параметров структурной нарушенности массива. Размер зоны возможного обрушения предлагается определять по зависимости (4.3):

$$h_n = \frac{B_{\phi}}{a \cdot f} \cdot \frac{K_{\text{бл}}}{Q} \cdot K_{\text{ф.кр.}} \cdot K^H \cdot K_{\alpha}, \quad (4.3)$$

где B_{ϕ} – фактический пролет сопряжения, м;

a – полупролет большей из сопрягающихся выработок;

f – коэффициент крепости пород по шкале М.М. Протоdjeяконова;

Q – критерий Бартона;

$K_{\text{бл}}$ – коэффициент относительного размера блока (рисунок 11, а);

$K_{\text{ф.кр.}}$ – коэффициент формы кровли, $K_{\text{ф.кр.}} = 1$ для сводчатой кровли, $K_{\text{ф.кр.}} = 1,2$ для плоской кровли;

K^H – коэффициент напряженного состояния (рисунок 11, б);

K_{α} – коэффициент влияния угла сопряжения выработок α (рисунок 11, в).

Численные значения коэффициентов определены на основании обработки результатов численных исследований и представлены в таблицах 4.2-4.4. Промежуточные значения рассчитываются методом интерполяции. Графическое представление зависимостей отображено на рисунке 4.5.

Таблица 4.2- Значения коэффициентов относительного размера блока

<i>ИТ</i> , шт/м	0	0,5	1	1,5	2	3
$K_{\text{бл}}$	1	1,1	1,25	1,45	1,6	1,65

Таблица 4.3- Значения коэффициентов напряженного состояния

r	0,5	1	1,5	2	2,5	3
K^H	1,4	1	0,95	0,8	0,75	0,6

Таблица 4.4- Значения поправочного коэффициента K_α

α , град	30	45	60	90
K_α	1,4	1,35	1,3	1

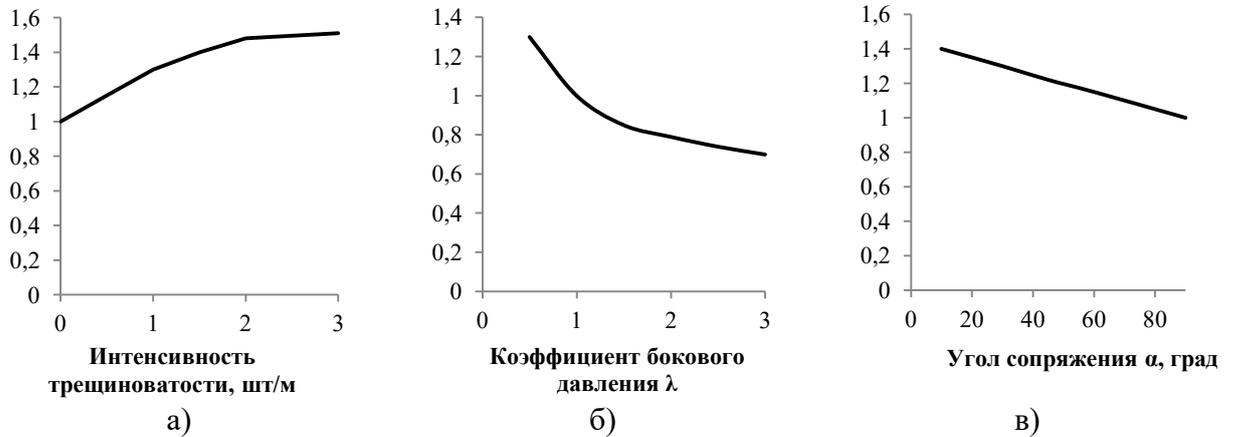


Рисунок 4.5 – Значения поправочных коэффициентов: относительного размера блока – $K_{\delta l}$ (а), напряженного состояния – K^H (б), влияния угла сопряжения выработок α – K_α (в)

После определения величины h_n выполняется расчет толщины крепи в соответствии с нагрузкой от прогнозного объема пород в нарушенной зоне. Крепление сопряжений предусмотрено комбинированной крепью из набрызгбетона или армированного набрызгбетона и анкеров.

Толщина набрызгбетонной крепи в выработках в слабоустойчивых породах определяется как (4.4):

$$t = h_n \frac{k_b \cdot k_a}{\sqrt{k_y}}, \quad (4.4)$$

где h_n – размер нарушенной зоны, м;

k_b – коэффициент прочности бетона;

k_a – коэффициент типа бетона, $k_a = 1$ для набрызгбетона и $k_a = 0,8$ для армированного набрызгбетона;

k_y – коэффициент условий работы крепи.

Толщина крепи на сопряжениях $t_{\text{сопр}}$ определяется для наибольшего из сечений выработок при ширине наибольшей из выработок менее 4,3 м равной t ; при ширине наибольшей из выработок более 4,3 м – по формуле (4.5):

$$t_{\text{сопр}} = 0,24Bt, \quad (4.5)$$

где B – ширина выработки, м;

t – толщина крепи одиночной выработки для наибольшей из выработок, м.

Длина анкерной крепи определяется как (4.6):

$$l_a = h_n + l_3 + l_b + t_{\text{сопр}}, \quad (4.6)$$

где h_n – размер нарушенной зоны, м;

l_3 – длина заделки анкера, м;

l_b – длина выступающей из шпура части анкера, м;

$t_{\text{сопр}}$ – толщина крепи на сопряжении, м.

Предлагаемая методика применима для массивов с соотношением величин действующих сжимающих напряжений на контуре выработок и предела прочности на сжатие горных пород $\sigma_d/\sigma_c \leq 0,3$, что подразумевает отсутствие хрупкого разрушения.

4.4 Рекомендации по обеспечению устойчивости участков сопряжений в структурно нарушенных массивах

В сложных горно-геологических условиях разработки рудных месторождений при рассмотрении горных выработок, обладающих пространственной конфигурацией некорректно применять существующие эмпирические методики и сводить задачу к плоской. Такой подход может привести к потере устойчивости и образованию зон обрушения при недооценке размеров зон пониженных напряжений в кровле и боках выработок, или к значительному перерасходу материалов для крепления выработок при их переоценке. Таким образом, применение методик с эмпирическими коэффициентами ограничено небольшим участком ведения работ с определенными условиями.

В наилучшем случае решение геомеханических задач должно осуществляться методами численного моделирования с учетом всего многообразия факторов. Исследования показали, что поведение трещиноватого массива значительно зависит от точности задания геометрии нарушений и их контактных параметров. Даже с учетом того, что при представлении массива дискретной средой массив идеализируется, результаты получаются более приближенными к реальности, чем при представлении массива сплошной средой.

Однако такой подход требует больших трудозатрат, обоснованных только при строительстве капитальных объектов. В иных случаях возможно использовать разработанную методику, которая основана на последовательном введении поправочных коэффициентов в зависимости от существующих условий. Коэффициенты получены в результате обобщения данных моделирования при изменении каждого фактора в отдельности и установлении его количественного влияния на напряженно-

деформированное состояние приконтурного массива. Результаты, получаемые на разработанных численных моделях, имеют хорошую сходимость с натурными данными.

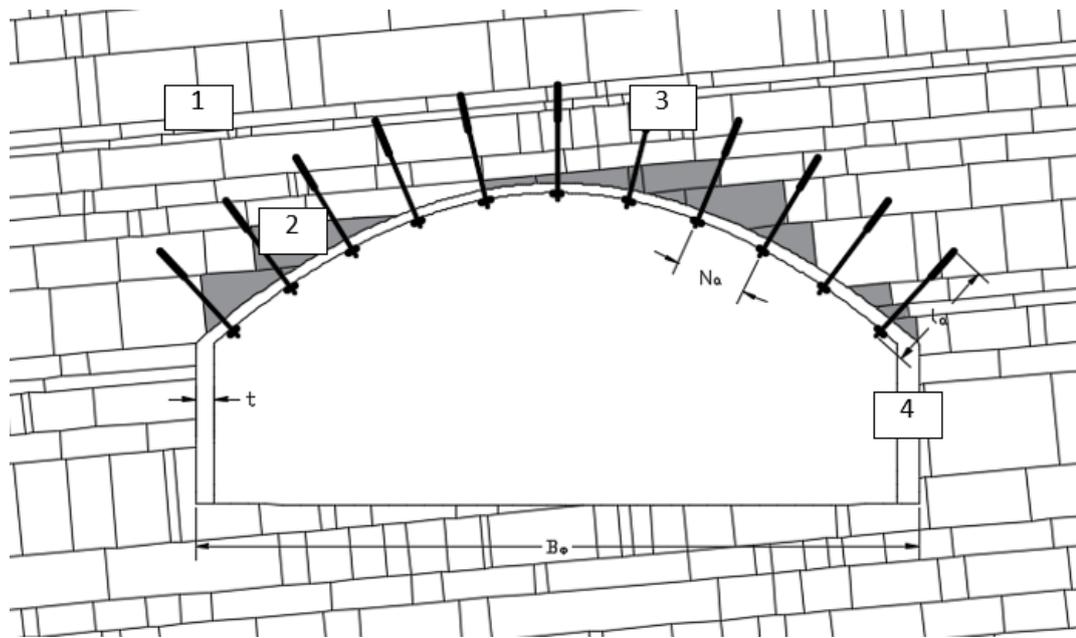
В таблице 4.5 представлены результаты расчета размера зоны по методике, принятой на горных предприятиях КФ АО «Апатит», по предлагаемой методике и на основании численного моделирования. Результаты расчетов, представленные в таблице 4.5, показывают, что размеры зон по действующей методике могут быть как завышены, так и занижены в некоторых случаях на величину до 1,5 раза.

Таблица 4.5 – Сводная таблица результатов расчетов по эмпирической методике и результатов численного моделирования

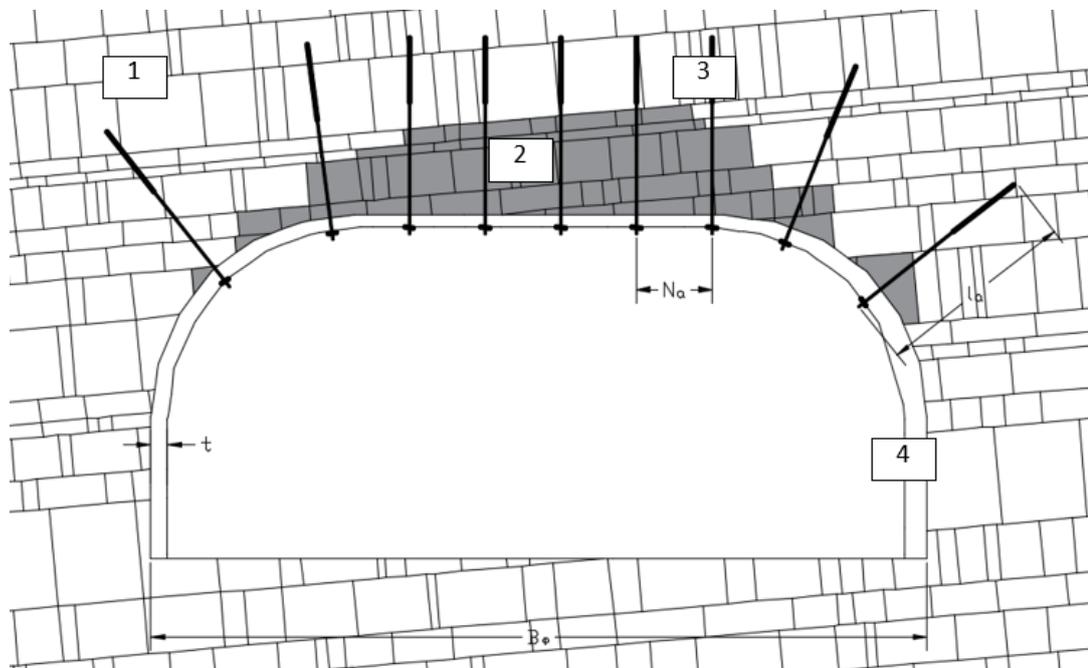
Тип сопряжения	Система трещин I			Система трещин II		
	Размер зоны обрушения h_f , м		Ч/Э, %	Размер зоны обрушения h_f , м		Ч/Э, %
	Эмпирич.	Численная		Эмпирич.	Численная	
Тип А, сводчатая кровля	0.85	1.2	41.2	0.85	1.15	35.3
Тип А, плоская кровля	0.85	1.8	111.8	0.85	1.34	57.6
Тип Б	0.8	1.5	87.5	0.8	1.18	47.5
Тип В, $\alpha = 30^\circ$	0.8	1.1	37.5	0.8	1.0	25.0
Тип В, $\alpha = 45^\circ$	0.8	1.0	25.0	0.8	0.95	18.8
Тип В, $\alpha = 60^\circ$	0.8	0.93	16.3	0.8	0.78	-2.5
Тип Г	0.8	0.9	12.5	0.8	0.55	-31.3

На рисунке 4.6 представлена схема расчетного пролета сопряжения типа А, серым выделены блоки, находящиеся в зоне возможного обрушения. Анкерная железобетонная крепь длиной 1,3 м позволяет избежать обрушения блоков. Вместо железобетонных анкеров могут использоваться другие типы с закреплением забойной части. Расчет приведен для четырехстороннего прямоугольного сопряжения сводчатых выработок шириной 4,6 м, расположенных на глубине 300 м в массиве, характеризуемом I системой трещиноватости и для разветвления выработок аналогичного сечения под углом 30° .

В таблице 4.6 представлены данные натурных замеров по нескольким сопряжениям, приведенные в главе 2. Произведено сравнение результатов расчета по существующей методике, по разработанной методике и натурных данных. Так как в данном случае нет данных по трещиноватости массива, для расчетов было принято, что выработки находятся в массиве, характеризуемом системой трещиноватости II. Анализ данных показывает, что предложенная методика дает более близкие результаты.



а)



б)

Рисунок 4.6 – Параметры зоны обрушения и крепи для сопряжения по сечению расчетного пролета для типа А, сводчатая кровля (а) и для типа А, плоская кровля (б): 1 – вмещающий массив; 2 – зона обрушения; 3 – железобетонный анкер; 4 – набрызгбетонная крепь

Результаты расчетов показали, что предлагаемая методика не вступает в противоречие с нормативной, однако позволяет уточнить размеры зон возможного обрушения, что делает возможным обоснованную корректировку параметров крепей сопряжений горных выработок.

Таблица 4.6 – Сравнение расчетных параметров нарушенной зоны

Наименование выработки	Тип сопряжения	Пролет выработки, м		Фактическая высота зоны обрушения, м	Высота зоны обрушения по существующей методике, м	Высота зоны обрушения по разработанной методике, м
		№1	№2			
Дренажный орт №4	Четырехстороннее прямоугольное	4,2	4	2,4	2,1	2,5
Орт №3	Четырехстороннее прямоугольное	4,2	4,2	3	2,5	2,8
Вентиляционно-закладочный штрек лежащего бока и панельный орт №2	Четырехстороннее прямоугольное	5,2	4,2	4	3,8	3,95
Дренажный орт №4 и буровая камера №3	Примыкание под прямым углом	4,2	4	1	0,85	0,9
30 линейный орт и погрузо-доставочный штрек №4	Примыкание под прямым углом	4,2	5	1,5	1,35	1,4
30 линейный орт и погрузо-доставочный штрек №4	Примыкание под прямым углом	4,2	5	1	0,8	1,2
Западный вентиляционно-закладочный орт и технологический штрек №2	Примыкание под прямым углом	4,2	4,2	2,5	2,2	2,4
Восточный вентиляционно-закладочный орт и технологический штрек №1	Примыкание под прямым углом	4,7	4,2	1,5	1,45	1,7
Западный вентиляционно-закладочный орт и технологический штрек №2	Примыкание под прямым углом	4,2	4,2	1,5	1,2	1,6

4.5 Выводы по Главе 4

Четвертая глава посвящена разработке методики прогноза нагрузок на крепь и уточнению параметров крепей сопряжений горных выработок, расположенных в блочных массивах.

На основании зависимостей, установленных в третьей главе, внесены дополнения в существующую методику, принятую в рамках действующей «Инструкции по креплению и управлению кровлей горных», 2019 г. Дополнения внесены в виде поправочных коэффициентов, учитывающих влияние всех рассмотренных ранее факторов: напряженного состояния, структурной нарушенности массива, в частности, механических свойств контактов между блоками, пространственной конфигурации сопряжения. Предложено эквивалентный пролет сопряжения заменить на фактический, максимальный, определяемый геометрически на плане, так как обрушение наиболее вероятно произойдет в сечении максимального пролета.

Методика основывается на предположении, что в блочном массиве потеря устойчивости происходит в виде обрушения породных блоков и формирует нагрузку на крепь. Таким образом, необходимо корректно оценивать размер нарушенной зоны для предотвращения выпадения блоков горной породы. Сравнительный анализ показал, что существующая методика дает заниженные либо завышенные результаты.

Таким образом, выявленные зависимости и принятые на основании них коэффициенты повышают достоверность прогноза напряженно-деформированного состояния приконтурного массива и могут быть рекомендованы к использованию при расчете размера нарушенной зоны на сопряжениях горных выработок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – выявления закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния структурно-нарушенного массива горных пород для условий месторождений апатит-нефелиновых руд и повышения достоверности прогноза нагрузок на крепь сопряжений горных выработок, расположенных в таких условиях.

В диссертационной работе представлены результаты пространственного численного моделирования нескольких типов сопряжений горных выработок для условий блочных массивов апатит-нефелиновых месторождений.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Выполненные исследования подтвердили, что в блочных горных массивах наиболее вероятной формой потери устойчивости на контуре горной выработки является обрушение пород в зоне, качественно совпадающей с зоной пониженных напряжений.

2. Для повышения достоверности прогноза напряженно-деформированного состояния приконтурного массива сопряжений необходимо выполнять оценку структурной нарушенности и параметров зоны возможного обрушения в каждом конкретном случае.

3. Форма и размеры зоны возможного обрушения на сопряжении горных выработок зависят от геометрических параметров выработок и физико-механических свойств массива горных пород, наибольшее влияние оказывает напряженное состояние массива и пространственная геометрия структурных нарушений.

4. В рамках работы представлен алгоритм выбора параметров численных моделей для моделирования геомеханических процессов в окрестности сопряжений горных выработок, а также обоснование применения нелинейного критерия прочности Бартона-Бандиса для описания взаимодействия контакта стенок трещин.

5. Прогноз формирования зоны возможного обрушения должен выполняться в пространственной постановке методами численного моделирования в рамках механики дискретной среды для возможности моделирования взаимного перемещения блоков по контактными поверхностям. Критерием границы зоны принято раскрытие трещин, равное 0,1 мм, величина которого установлена на основании сравнения с результатами инструментальных измерений размеров зон обрушенных пород.

6. На основании полученных данных выполнено обоснование поправочных коэффициентов для систем трещин с изменением угла падения от 0° до 80° и интенсивностью трещиноватости от 0,5 до 10 шт/м, определяющих отличие формы зон возможного обрушения для сопряжений горных выработок разных типов.

7. В рамках диссертационной работы разработаны методические положения построения численных моделей для оценки размера зоны возможного обрушения для участков сопряжений с учетом всех рассмотренных факторов, что позволяет повысить точность прогноза параметров зоны возможного обрушения до 98 %.

Разработанные рекомендации позволят повысить геомеханическую безопасность при строительстве и эксплуатации сопряжений горных выработок в структурно-нарушенных массивах горных пород при разработке апатит-нефелиновых месторождений.

Перспективным направлением развития научных исследований по тематике диссертации является развитие теоретических основ построения структурно нарушенных породных массивов на основании данных инструментальных замеров, геофизических данных, а также применение статических и вероятностных моделей, совмещение которых с разработанной методикой прогноза напряженно-деформированного состояния массива как дискретной среды позволит в значительной степени повысить достоверность прогноза геомеханических процессов в окрестности породных обнажений и, в частности, сопряжений горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов, А.Г. Геомеханические аспекты сдвижения горных пород при подземной разработке угольных и рудных месторождений / А.Г.Акимов, В.В.Громов, Е.В.Бошнятов // ВНИМИ. СПб. – 2003.
2. 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.
3. Белгородцев, О.В. Обоснование систем разработки и их конструктивных параметров в условиях интенсификации добычи при отработке запасов глубоких горизонтов мощных рудных месторождений / Белгородцев, О.В., Громов, Е.В., Мельник, В.Б. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 4. С. 122–130. – URL https://www.giab-online.ru/files/Data/2016/4/122_130_4_2016.pdf
4. Беляков, Н.А. Механика сплошной среды / Беляков, Н.А., Карасев М.А., Трушко В.Л. // Учебное пособие. СПб. – 2019. – 114 с.
5. Беляков, Н.А. Разработка численной модели прогноза предельного состояния массива с использованием критерия прочности Ставрогина / Н.А. Беляков, М.А. Карасев, А.Г. Протосеня // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. №1. С. 3-11
6. Борщ-Компониец, В.И. Практическая механика горных пород / Борщ-Компониец, В.И. // М.: Горная книга, 2013. – 322 с.
7. Введение в механику скальных пород / Х. Бок. – М.: Мир. – 1983. – 277 с.
8. Вербило, П.Э. Оценка прочности и деформирования междукамерных целиков в блочном горном массиве / автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб. – 2018.
9. Вербило, П.Э. Моделирование трещиноватого горного массива. Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть II / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2016 г., с. 200.
- 10. Вильнер, М.А. Геомеханический прогноз напряженно- деформированного состояния на сопряжениях в трещиноватых слабонапряжённых массивах // Сборник докладов XVIII Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов. - 2020. - С. 183.**
- 11. 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**
12. Геомеханика: Учебник для вузов. В 2 т. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – Т.1. Основы геомеханики. – 208 с.: ил. URL <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-geomehanika-tom-1-baklashov-iv-2004.pdf>

13. Глушко, В.Т. Механика горных пород и охрана выработок / Глушко В.Т., Широков А.З. // Наукова думка. – Киев. – 1967. – 153 с.
14. Господариков, А.П. Разработка нелинейных математических моделей и численное моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Записки Горного института. 2016. Т.219. С.382-386
15. Господариков, А.П. Численное моделирование на основе метода конечных разностей некоторых прикладных задач геомеханики / Зацепин М.А., Мелешко А.В. // Записки Горного института. 2009. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-na-osnove-metoda-konechnyh-raznostey-nekotoryh-prikladnyh-zadach-geomehaniki>
16. Данилкин, М. С. Подходы к расчету геометрических параметров сопряжений горных выработок // ГИАБ. 2002. №9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhody-k-raschetu-geometricheskih-parametrov-sopryazheniy-gornyh-vyrobotok>
17. Джегер, Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения / Ч. Джегер. – М.: Мир, 1975
18. 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.
19. Жуков, Е.М. Оценка влияния трещин на устойчивость пород в кровле подготовительных выработок угольных шахт / Жуков Е.М., Лугинин И.А., Кропотов Ю.И., Зырянов К.А., Басов В. В. // Вестник СибГИУ. 2015. №4 (14). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-treschin-na-ustoychivost-porod-v-krovle-podgotovitelnyh-vyrobotok-ugolnyh-shaht>
20. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. М.: Мир. – 1975. – 271 с.
21. Инструкция по креплению и управлению кровлей выработок на рудниках КФ АО «Апатит» (Положение по креплению и поддержанию горных выработок). Кировск, 2019 г.
22. Карасев, М. А. Эффективное применение численных методов анализа для решения задач геомеханики. Записки Горного института, 185, 161. - 2010.
23. Карасев, М. А. Теоретические предпосылки к созданию модели поведения грунтов, учитывающей анизотропию механических свойств. Записки Горного института, 204, 226. (2013).
24. 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.
25. Корсакова, О. Р. Блочное 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
26. 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-pri-provedenii-gornyh-vyrobotok-ugolnyh-shaht> (дата обращения: 02.03.2022).

27. Корчак, П.А. Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // ГИАБ. 2021. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geomechanicheskiy-prognoz-razvitiya-zon-hrupkogo-razrusheniya-v-okrestnosti-sopryazheniya-gornyh-vyработок-v-perenapryazhennom> (дата обращения: 02.03.2022).
28. Кузнецов, Г.Н., Ардашев К.А., Филатов Н.А. и др. Методы и средства решения задач горной геомеханики. М.: Недра, 1987. 248 с.
29. 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.
30. Литвинский, Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов
31. 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 URL <http://journals.tsu.ru/uploads/import/874/files/361-171.pdf>
32. Лысенко, М.В. Поддержание широкопролетных сопряжений горных выработок при помощи анкеров глубокого заложения / М.В. Лысенко, А.С. Позолотин, А.В. Айкин, П.Ю. Ковешников // Горный журнал Казахстана №9' 2018
33. Мазуров, Б.Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики // Сибпринт, Новосибирск, 2019 г., 360 с
34. Маринин, А. Структурные парагенезы и тектонические напряжения южной части Хибинского массива / Маринин А., Сим Л., Жиров Д., Бондарь И. // Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2018. - 15. - 239-241. 10.31241/FNS.2018.15.059.
35. Мерзляков, В.П. Особенности анизотропии трещиноватых скальных пород. – Основания, фундаменты и механика грунтов. № 3, 1984.
36. Методика расчета и выбора параметров крепи на сопряжениях горных выработок при одинарной и парной подготовке выемочных столбов. - СПб., 2004. - 84 с. (М-во пром-сти и энергетики РФ. РАН. ФГУП "Гос. науч.-исслед. ин-т горн, геомех. и маркшейд. дела - Межотраслевой научный центр ВНИМИ).
37. Методические рекомендации по расчету крепи горных выработок в упрочненном массиве Донецк – 1989
38. 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. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uchet-vliyaniya-treschinovatosti-skalnyh-i-poluskalnyh-porod-na-prochnost-massiva-pri-otsenke-ustoychivosti-bortov-karierov-po-dannym>
39. Немова, Н. А. Геомеханическая оценка параметров устойчивости откосов бортов и уступов при отработке месторождения апатит-нефелиновых руд "Олений ручей" / Немова Н.А., Бельш Т.А. // Известия ТПУ. 2019. №11. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/geomechanicheskaya-otsenka-](https://cyberleninka.ru/article/n/geomechanicheskaya-otsenka)

parametrov-ustoychivosti-otkosov-bortov-i-ustupov-pri-otrabotke-mestorozhdeniya-apatit-nefelinovyh-rud

40. Особенности структуры Хибинского массива и апатито-нефелиновых месторождений. Онохин Ф.М. «Наука», Л., 1975, 106 с.
41. Отчет о НИР «Разработка классификации руд и пород эксплуатируемых апатито-нефелиновых месторождений по крепости и буримости на основе изучения их физико-технологических свойств в лабораторных условиях». Полярная ассоциация исследователей «Грумант», Апатиты, 1993 г.
42. Оценка влияния трещиноватости на устойчивость массивов горных пород / В.И. Борщ-Компаниец и др. // Горный журнал. – 1980. – № 10
43. Патент № 2760451 Российская Федерация, МПК E21D 1/16 (2006.01), E21D 11/10 (2006.01), E21B 33/13 (2006.01). Способ упрочнения трещиноватых пород при строительстве сопряжений горизонтальных горных выработок: № 2021114701 : заявл. 25.05.2021 : опубл. 25.11.2021 / А.Г. Протосеня, М.А. Карасев, В.Ю. Синегубов, М.А. Вильнер ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU). – 5 с. : ил.
44. Петров, Д.Н. Шахтные наблюдения за состоянием крепи сопряжений горизонтальных выработок, пройденных в слабых рудах // Записки Горного института, 2007. – Т. 172. – с. 66-68
45. Протосеня, А.Г. Прогноз напряженно-деформированного состояния дисперсно-армированной 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.
46. 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.
47. Протосеня, А.Г. Определение масштабного эффекта прочностных свойств трещиноватого горного массива / А. Г. Протосеня, П.Э. Вербило // Известия тульского государственного университета, Тула, 2016 г., № 1, с. 167-177.
48. Протосеня, А.Г. Изучение прочности на сжатие трещиноватого горного массива / А. Г. Протосеня, П.Э. Вербило // Записки горного института, СПб, 2017 г., № 223, с. 51-58.
49. Рац, М.В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород / Рац, М.В., Чернышев С.Н // М.: Недра – 1970 г. - 160 с.
50. Савченко, С.Н. Напряженное состояние пород блочного строения / Савченко С. Н., Козырев А. А., Мальцев В. А. // ФТПРПИ. - №5. - 1994. - С. 38-47.

51. 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
52. Сим, Л.А. Реконструкция напряженно-деформированного состояния восточной части Балтийского щита / Сим Л.А., Жиров Д.В., Маринин А.В. // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 3. С. 219-243.
- 53. 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.**
54. 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. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-chislennogo-i-blochnogo-geomexanicheskogo-modelirovaniya-dlya-opredeleniya-parametrov-krepleniya-kamernyh-vyrabotok>
- 55. 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.**
56. СП 69.13330.2016 Подземные горные выработки
57. Ставрогин, А.Н. Механика деформирования и разрушения горных пород / Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. М.: Недра, 1992.— 224 с.: ил.— ISBN 5-247-00752-2 . URL <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-mehnika-deformirovaniya-i-razrusheniya-gornyh-porod.pdf>
58. 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.
59. Трушко, В.Л. Инструкция по креплению полевых горизонтальных и наклонных выработок шахт Североуральского бокситового бассейна / В.Л. Трушко, О.В. Тимофеев, В.И. Очкуров // - СПб: СПГГИ, 1996. – 57 с.
60. Трушко, В.Л. К вопросу оценки взаимовлияния выработок в расчетах сдвижений и деформаций массива горных пород и земной поверхности над сооружаемыми тоннелями / В.Л. Трушко, Е.М. Волохов // Записки Горного института. Т.180
61. Трушко, В.Л. Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада / Трушко В.Л., Протосеня А.Г // Записки Горного института. 2019. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-geomexaniki-v-usloviyah-novogo-tehnologicheskogo-uklada>

62. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. Кировск, 2021.
63. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987 221 с.
64. Фисенко, Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 378 с.
65. Фоменко, И.К. Оценка устойчивости бортов карьеров в скальных грунтах / Фоменко И.К., Пендин В.В., Горобцов Д.Н. // Горные науки и технологии, Т.3. – 2016. – с. 10-21
66. Черников, А.К. Теоретические основы геомеханики. СПб. – 1994. – 185 с.
67. Abaqus 6.14 documentation. Режим доступа: <http://wufengyun.com:888/>
68. Abhishek, B. Study of zone of influence for intersecting tunnels / B. Abhishek, M. Santhosh // INDOROCK 2019: Eighth Indian Rock Conference. – 2019.
69. Alejano, L. Drucker–Prager Criterion. Rock Mechanics and Rock Engineering / L. Alejano, A. Bobet // 2012 45. 995-999. 10.1007/s00603-012-0278-2.
70. Agharazi, A. Development of a 3D Equivalent Continuum Model for Deformation Analysis of Systematically Jointed Rock Masses // PhD thesis. – 2013.
71. 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
72. ANG Xiao-Li Stability analysis of rock slopes with a modified Hoek-Brown failure criterion / Ang Xiao-Li ; Liang LI ; Yin Jian-Hua // International journal for numerical and analytical methods in geomechanics. ISSN 0363-9061, 2004, vol. 28, no2, pp. 181-190.
73. 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.
74. 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.
75. Barla, G. Continuum and discontinuum modelling in tunnel engineering / Barla, G., Barla, M. // Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik. – 2000. 52(12), 45-57.
76. 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
77. Barton, N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design // Int. J. Rock Mech. Min Sci. & Geomech. Abstr. – 2000. 39. 185-216.
78. Barton, N. The shear strength of rock joints in theory and practice / Nick Barton, V.Choubey // Rock Mechanics. – 1977. 10. 1-54.
79. 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.
80. Barton, N. Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. Proceedings - Symposium on Rock Mechanics. – 1982. 739-760.

81. Barton, N. The shear strength of rock joints in theory and practice / Barton, N., Choubey, V. // *Rock Mechanics*. – 1977. 10, 1-54. DOI: 10.1007/BF01261801.
82. Belyakov, N. Numerical simulation of the mechanical behaviour of fiber-reinforced cement composites subjected dynamic loading / Belyakov, N., Smirnova, O., Alekseev, A., Tan, H. // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2021. 11(3), 1-15. DOI:10.3390/app11031112
83. 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.
84. 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
85. Bieniawski, Z.T. *Engineering rock mass classifications* / Z.T. Bieniawski. – John Wiley and sons, 1989. –252 p.
86. Bieniawski, Z.T. The significance of in situ tests on large rock specimens / Z.T. Bieniawski, W.L. Van Heerden // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Volume 12, Issue 4, 1975, P. 101-113.
87. Bobet, A. Numerical models in discontinuous media: review of advances for rock mechanics applications / Bobet, A., Fakhimi, A., Johnson, S., Morris, J., Tonon, F. and Yeung, M.R. // *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. – 2009. 135, 1547-1561. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000133.
88. Bucky, P.B. Effect of approximately vertical cracks on the behaviour of horizontally lying roof strata. *Trans. A.I.M.E.*. 109. 212-229.
89. Cała, M. Stability analysis of underground mining openings with complex geometry. / Cała, M., Stopkowicz, A., Kowalski, M., Blajer, M., Cyran, K., d'Obyrn, K. // *Studia Geotechnica et Mechanica*. – 2016. 38. 10.1515/sgem-2016-0003.
90. Cai M. Visualization of the Rock Mass Classification Systems / Cai M., Kaiser P.K. // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2006. DOI: 10.1007/s10706-005-7464-x
91. Cantartella, V. JCR estimation with 3D laser scanner image / Cantartella, V. Monticelli, J.P. Cacciari, P.P and Futai, M.M. // *VII Brazilian Symposium of Rock Mechanics*. – 2016.
92. Cundall, P.A. Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks // *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. Vo; 25, №3.-1988. p. 107-116
93. Dershowitz W. S. Advances in discrete fracture network modeling / Dershowitz W. S., La Pointe P. R., Doe T. W. // *Proc. US EPA/NGWA Fractured Rock Conf.* – 2004. Portland, 2004/ P. 882-894
94. Diederichs, M.S. Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations / Diederichs, M.S. and Kaiser, P.K. // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 1999. 36, 69-96. DOI:10.1016/S0148-9062(98)00179-X.
95. Elmo, D. Applications of Finite/Discrete Element Modeling to Rock Engineering Problems / D.Elmo; D.Stead; E. Eberhardt; A. Vyazmensky // *International Journal of Geomechanics*, Vol. 13, No. 5, October 1, 2013 DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000238.

96. Grimstad, E. Updating the Q system for NMT / Grimstad, E., Barton, N. // *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. Rock Mech. – 1993. 189-239.
97. Gerçek, H. Stability considerations for underground excavation intersections. *Mining Science and Technology*. -1986. 4, 49-57. DOI:10.1016/S0167-9031(86)90194-5.
98. Garza-Cruz, T. Use of 3DEC to study spalling and deformation associated with tunnelling at depth / Garza-Cruz, T., Pierce, M. Kaiser, P. // *Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining*. – 2014. 421-434. DOI:10.36487/ACG_rep/1410_28_Garza-Cruz.
99. Goodman, R.E. *Introduction to Rock Mechanics*. 2nd ed., John Wiley & Sons – Chapter 6. *Deformability of Rocks/* - 1989 p.179-220
100. Gospodarikov, A. P. Mathematical modelling of boundary problems in geomechanics / Gospodarikov, A. P. Zatsëpin, M. A. // *Gornyi Zhurnal*. – 2019. 2019(12), 16-20. DOI:10.17580/gzh.2019.12.03
101. Hajiabdolmajid, V. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling / Hajiabdolmajid, V., Kaiser, P. // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2003. 18, 35-48.
102. Hatzor, Y.H. (2008). *Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Applications // Developments in Geotechnical Engineering*. – 2008. 85. 1536-1537. 10.1016/j.ijrmms.2008.04.003.
103. Hoek E., Caranza-Torres C.T., Corcum B. HoekBrown failure criterion-2002 edition//*Proc. of the North American Rock Mechanics Society (NARMSTAC'2002)*. – Toronto: Mining Innovation and Technology, 2002. – v. 1. – pp. 267-273
104. Hoek E. Strength of rock and rock masses // *ISRM News Journal*. – 1994. 2. 4–16.
105. 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>
106. Hutchinson, D.J. *Cablebolting in Underground Mines*, Vancouver: 1996.
107. Jaeger, J. *Fundamental of Rock Mechanics / Jaeger J., Cook N.G.W.*// 3rd edn. Chapman&Hall, London. – 1979.
108. Jinkui, L. The Effects of Different Excavation Angle on Intersecting Tunnel Surrounding Rock Stability / Jinkui, L., Xianke, W. and Wenjing, L. // *Proceedings of 2nd International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2015)*. – 2015. 247-251. DOI:10.2991/MIC-15.2015.57.
109. Jing, L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003. 40 (3), 283-353. DOI:10.1016/S1365-1609(03)00013-3.
110. John A. Hudson. *Rock Engineering Risk*. – London, UK: Taylor & Francis Group, 2015. – 596 p. Palmarium Academic Publishing, 2013. – 397 c.

111. **Karasev, M.A. Method for predicting the stress-strain state of the vertical shaft lining at the drift landing section in saliferous rocks / M.A. Karasev, M.A. Bouslova, M.A. Vilner, T.T. Nguen// Journal of Mining Institute. - 2019. - №240. - C. 628-637.**
112. Kulatilake, P.H.S.W. Estimation of mean trace length of discontinuities / Kulatilake P.H.S.W. and Wu T.H. // *Rock Mech Rock Eng.* – 1984. 17, 215–232.
113. Labuz, J. Mohr–Coulomb Failure Criterion / Labuz, J. and Zang, A. // *Rock Mechanics and Rock Engineering.* 2012. 45, 975-979. DOI:10.1007/s00603-012-0281-7.
114. Laghaei, M. Comparison of Equivalent Continuum and Discontinuum Methods in Stability Analysis of a Natural Underground Karst / Laghaei, M., Baghbanan, A., Torkan, M., Norouzi, S. and Lak, M. // *Journal of geotechnical geology.* – 2019. 14 (1), 158-166.
115. 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.
116. Martin, C. D. Observations of brittle failure around a circular test tunnel / Martin C. D., Read R. S., Martino J. B. // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* – 1997, vol. 34, no. 7, pp. 1065-1073.
117. Marinos, P. The Geological Strength Index (GSI): A characterization tool for assessing engineering properties of rock masses / Marinos, P., Marinos, V. and Hoek, E. // *Underground works under special conditions.* - 2007. 87-94. DOI:10.1201/NOE0415450287.ch2.
118. Martin, C.D. Stress, instability and design of underground excavations / Martin, C.D, Kaiser, P.K. and Christiansson, R. // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* – 2003. 40(7-8):1027-1047. DOI:10.1016/S1365-1609(03)00110-2
119. Massao Futai, M. Study of an old railway rock tunnel: site investigation, laboratory tests, weathering effects and computational analysis / M. Massao Futai; P. P. Cacciari, J. P. Monticeli, V. P. Cantarella // *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017* URL <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/45/06-technical-committee-10-tc204jtc2-12.pdf>
120. Meyer, L.H.I. Numerical Modelling Of Ground Deformation Around Underground Development Roadways, With Particular Emphasis On Three- Dimensional Modelling of The Effects of High Horizontal Stress // *Camborne School of Mines. University of Exeter.* 2002. p. 324.
121. Murrell, S. The Effect of Triaxial Stress Systems on the Strength of Rocks at Atmospheric Temperatures // *Geophysical Journal International*, 1965. DOI:10.1111/J.1365-246X.1965.TB03155.X
122. Nickson, S.D. Cable support guidelines for hard rock underground mine operations. In M.A.Sc. thesis, Dept. Mining and Minerals Processing, University of British Columbia. – 1992.
123. 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.

124. Nukala, Ph. Crack roughness in the two-dimensional random threshold beam model. *Physical review* / Nukala, Ph., Zapperi, S., Alava, M., Simunovic, S. // *E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*. – 2008. 78. 046105. 10.1103/PhysRevE.78.046105.
125. Ogorodnikov, Yu.N. Designing support unilateral rectangular interfase of horizontal developments / Ogorodnikov, Yu.N, Ochkurov, V.I., Petrov, D.N. // *Journal of Mining Institute*. – 2011. 172. 197-201.
126. Palmström, A. RMI – A rock mass characterisation system for rock engineering purposes. PhD thesis. University of Oslo, Norway. 1995.
127. Palmstrøm, A. Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass index (RMI), *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)
128. Pierotti A. 3D FEM and DEM Analyses of Underground Openings in Competent Rock Masses / Pierotti A, Leoni M, Lo Presti D. // *Adv Civil Eng Tech*. 4(3). ACET.000588. 2020. DOI: 10.31031/ACET.2020.04.000588
129. Potvin, Y. Empirical cable bolt support design / Potvin, Y., Milne, D. // *Rock Support*, (eds. Kaiser and McCreath), Rotterdam: A.A. Balkema. – 1992. 269 - 275.
130. Potyondy, D.O. A bonded-particle model for rock / Potyondy, D.O., Cundall, P.A. // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2004. 41. 1329–1364. doi:10.1016/j.ijrmms.2004.09.011
131. Protosenia, A. G. Research of the mechanical characteristics' anisotropy of apatite-nepheline ores block rock mass / Protosenia A. G., Karasev M. A., Verbilo P. E. // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, no. 11, pp. 1962-1972.
132. Ramamurthy, T. Strength predictions for jointed rocks in confined and unconfined states / Ramamurthy, T., Arora, V.K. // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1994. 13:1: 9-22
133. Read, R.S. Minimizing excavation damage through tunnel design in adverse stress conditions / Read, R.S., Chandler, N.A. // *Proceedings of the International Tunnelling Association World Tunnel Congress*. – 1997. 1. 23-28.
134. Rozenbaum, M. A. Investigation of exfoliation height of roof rocks in mine workings within the zone of bearing pressure / Rozenbaum, M. A., Chernyakhovskii, S. M., Savchenko, E. S. // *Journal of Mining Institute*. – 2011. 190, 210-213.
135. Shabarov, A. Geodynamic risks of mining in highly stressed rock mass / Shabarov, A., Kuranov, A., Popov, A., Tsirel, S. // *E3S Web of Conferences*. – 2019. 129:01011. DOI: 10.1051/e3sconf/201912901011
136. Sherpa, M. The Effect of Joint Properties on a Discontinuous Rock Mass / Sherpa, M., Hagan, P. // *MEA Research Projects Review*. – 2013. 2. 75-81.
137. Shah, S. A Study of the Behaviour of Jointed Rock Masses // PhD Thesis. – 1992.

138. Shi, Q. DEM Analysis of the Effect of Lamination Properties on the Stability of an Underground Coal Mine Entry with Laminated Shale Roof / Shi, Q., Mishra, B., Yun, Zh. // Mining Metallurgy & Exploration. – 2022.
139. Singh, M. Laboratory and Numerical Modelling of a Jointed Rock Mass / Singh, M., Singh, B. // The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG). – 2008. 2. 1373-1380.
- 140. 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.**
- 141. Vilner, M. Assessment of the stability of mines during development of mineral deposits in overpressed rock masses // Ksiazka abstraktow 59 KSKNPG AGH. - 2018. - C. 63.**
142. Wasantha, P.L.P. Energy monitoring and analysis during deformation of bedded-sandstone: use of acoustic emission / Wasantha P.L.P, Ranjith P.G., Shao S.S. // Ultrasonics 54 (1), 217-226
143. Wawersik, W. R. A study of brittle rock fracture in a laboratory compression experiments / Wawersik W. R., Fairhurst C. // Int. J. Rock Mech. Min. Ser. – 1979. 7. 561-575.
144. Wickens, E.H. The application of photogrammetry to the stability of excavated rock slopes / Wickens, E.H., Barton, N.R. // The Photogrammetric Record. – 1971. 7(37): 46-5.
145. Xiang, T. Failure mode classification and control for surrounding rock of large-scale cavern group / Xiang, T., Feng, Xia-Ting, Jiang, Quan, Chen, J. // Rock Mechanics: Achievements and Ambitions. – 2011. 527-533. 10.1201/b11438-104.
146. Интернет-ресурс. Режим доступа: URL: <https://caemate.com/blog/fea-driven-tunnel-structural-design/>
147. Интернет-ресурс. Режим доступа: URL:<https://www.itascacg.com/software/3dec-options>