

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

На правах рукописи

Басалаева Полина Вячеславовна



ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК В ТЕКТЕНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННОМ
МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД СЛОЖНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Деменков П.А.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОХОДКЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ТЕКТЕНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ МАССИВАХ	11
1.1 Характеристика объекта исследований.....	14
1.2 Формы проявления горного давления	15
1.3 Анализ методов оценки устойчивости горных выработок	18
1.3.1 Натурные методы оценки устойчивости.....	19
1.3.2 Аналитические методы оценки устойчивости	21
1.3.3 Эмпирические методы оценки устойчивости	23
1.4 Классификации нарушенности массива	25
1.5 Особенности проявления горного давления при проходке выработок вблизи геологических неоднородностей	30
1.6 Анализ методов определения размеров зон хрупкого разрушения.....	33
1.6.1 Аналитические методы определения размеров зон хрупкого разрушения	34
1.6.2 Численные методы определения размеров зон хрупкого разрушения	36
1.7 Выводы по Главе 1	39
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИКОНТУРНОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК	41
2.1 Горно-геологические условия	41
2.2 Натурные исследования механизма формирования горного давления на участках пересечения выработкой геологических неоднородностей	44
2.3 Результаты определения физико-механических свойств массива.....	47
2.4 Результаты исследования форм потери устойчивости горных выработок....	49
2.5 Разработка методики построения численных моделей прогноза геомеханических процессов на участках горизонтальных горных выработок сложного геологического строения	59
2.6 Выводы по Главе 2	59

ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ УЧАСТКОВ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ДАЕК	62
3.1 Обоснование параметров численных моделей для прогноза развития зоны хрупкого разрушения	62
3.3 Исследование влияния мощности дайки на формирование зоны хрупкого разрушения.....	71
3.4 Исследование влияния напряженного состояния на формирование зоны хрупкого разрушения	75
3.5 Выводы по Главе 3	76
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЧЕТУ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ ПРОХОДКЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ТЕКТОНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ.....	78
4.1 Прогноз развития зон хрупкого разрушения в приконтурном массиве горных пород сложного геологического строения	78
4.2 Описание и условия применения динамических крепей	85
4.3 Рекомендации для определения зоны влияния дайки при пересечении горной выработкой	91
4.4 Выводы по Главе 4	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	96
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	110
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ В Результаты исследования зоны влияния дайки на рудниках Хибинского массива.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Результаты исследования формирования зоны хрупкого разрушения в висячем и лежащем боках при различных мощностях дайки	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Актуальность темы обусловлена увеличением объемов добычи сырья для агропромышленного комплекса, что сопровождается развитием горнодобывающих предприятий, и, как следствие, возникает острая необходимость оперативного решения проблем обеспечения геомеханической и геодинамической безопасности.

Значительный объем добычи апатит-нефелиновой руды приходится на Кольский полуостров, в частности на Хибинский массив. Месторождения в данном массиве горных пород разрабатываются комбинированным способом, при этом с каждым годом увеличивается глубина разработки. Геодинамическая обстановка района, обусловленная особенностями его геологического формирования, характеризуется наличием естественного тектонического поля напряжений и распространением пород, склонных к хрупкому разрушению. В связи с данными условиями и увеличением глубины разработки данные месторождения принято относить к удароопасным.

Проведение горных выработок в тектонически напряженном массиве сложного геологического строения приводит к формированию перераспределения напряжений в приконтурном массиве. Проблемы с обеспечением устойчивости происходят и в зонах влияния дайкового комплекса. Прогноз проявлений горного давления позволяет повысить безопасность ведения горных работ, а также уменьшить экономические затраты на поддержание горных выработок.

В этой связи возникает необходимость в разработке методики прогноза геомеханических процессов на участках горизонтальных горных выработок в зоне влияния геологических неоднородностей.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами особенности геомеханических процессов в тектонически напряженных массивах, склонных к хрупкому разрушению, занимались многие ученые, среди которых стоит упомянуть как отечественных Н.С. Булычев, М.В. Гзовский, А.А. Козырев, Э.В. Каспарян, И.Э. Семенова, Ф.М. Онохин, А.Г. Протосеня, В.Л. Трушко, В.В. Зубков, О.В. Ковалев, А.Н. Шабаров, так и

зарубежных исследователей C.D. Martin, P.K. Kaiser, A. Lisjak, W.R. Wawersik, I. Varog и другие.

Решению проблем устойчивости горных выработок, пересекаемых геологическими неоднородностями, посвящены работы отечественных и зарубежных ученых. Анализом менее прочных прослоек занимались М.Г. Попов, А.И. Калашник, J. Zhang, Ngoc Anh Do, W. Jingyuan и другие. Вопросы влияния более прочных прослоек посвящены работы X. Sun, M.A. Nunes, M.A. Meguid, N.C. Gay.

Анализ отечественной и зарубежной практики разработки рудных месторождений показывает, что проблема обеспечения устойчивости горизонтальных горных выработок является достаточно исследованной темой, однако сохраняется ряд нерешенных аспектов. К настоящему времени не существует комплексного подхода, который учитывал бы влияние механических свойств и геометрических параметров геологических неоднородностей на состояние выработок. Существующие на данный момент решения, зачастую сформулированные в упрощённой постановке, опираются преимущественно на практический опыт ведения горных работ и не имеют достаточной расчётно-теоретической базы для их обоснования.

Объект исследования – тектонически напряженный массив горных пород, имеющий участки сложного геологического строения, – дайки.

Предмет исследования – геомеханические процессы, влияющие на устойчивость горных выработок, в тектонически напряжённом массиве горных пород сложного геологического строения.

Цель работы – разработка способа обеспечения устойчивости выработок в тектонически напряженном массиве горных пород сложного геологического строения.

Идея работы – повышение достоверности прогноза геомеханических процессов в зоне влияния даек в окрестности горизонтальных горных выработок, расположенных в тектонически напряженном массиве горных пород, склонном к хрупкому разрушению, обеспечивается за счет учета изменения напряженно-

деформированного состояния массива, связанного с сложным геологическим строением и проходкой горной выработки, а обеспечение устойчивости выработок в зоне влияния даек должно вестись не только методами поддержания, но и управлением горным давлением.

Задачи исследования:

1. Проведение натурных наблюдений за формированием и развитием геомеханических процессов в породном массиве в окрестности горных выработок, расположенных в зоне влияния даек.

2. Определение условий, при которых пересечение выработкой дайки является фактором, определяющим устойчивость выработок.

3. Проведение численных экспериментов, направленных на установление количественных зависимостей между параметрами геологического строения участков массива и параметрами устойчивости выработок.

4. Разработка рекомендаций по корректировке методик установления категорий устойчивости выработок в условиях сложного геологического строения и мероприятий по обеспечению устойчивости выработок.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является реализация комплексного подхода разработка метода прогноза устойчивости горной выработки, пересекающей дайку.

Научная новизна:

1. Разработан алгоритм обоснования параметров численных моделей для прогноза геомеханических процессов в приконтурном массиве горизонтальных горных выработок, расположенном в зоне влияния даек.

2. Предложен подход к оценке размера зоны хрупкого разрушения и зоны влияния горизонтальных горных выработок, расположенных в тектонически напряженном массиве сложного геологического строения, основанный на условии пластичности Кулона-Мора, предельная стадия в которой задается в виде функциональной зависимости параметров пластичности от достигнутой величины деформаций.

3. Установлена закономерность развития зон хрупкого разрушения горизонтальной горной выработки, расположенной в зоне влияния даек различных геометрических и механических характеристик, в тектонически напряженном массиве.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пунктам:

1. Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород и грунтов в естественных условиях и его изменение во времени, в том числе в связи с проведением горных выработок, строительством сооружений, газовых и нефтяных скважин, эксплуатацией месторождений.

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

6. Теоретические основы прогнозирования геомеханических процессов в массивах горных пород и грунтов, в том числе антропогенных, служащих средой и материалом различных горнотехнических конструкций

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Выявлены закономерности распределения зон хрупкого разрушения в зоне влияния даек с учетом их параметрических и механических параметров.

2. Разработана численная модель прогноза напряженно-деформированного состояния горизонтальной горной выработки, пересекающей геологическую неоднородность в тектонически напряженном массиве.

3. Результаты диссертационной работы отражены в свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ № 2023688148 «Программа для прогнозирования проявлений горного давления, вызванных сложным литологическим строением» (Приложение А).

4. Разработана методика прогноза развития геомеханических процессов в окрестности горизонтальной горной выработки, пересекающей дайки в тектонически напряженном массиве, позволяющая повысить точность расчета учета мощности, угла наклона, прочностных характеристик, напряженного состояния и различных геометрических и механических характеристик дайки.

5. Разработаны рекомендации по обеспечению устойчивости приконтурного массива горных выработок в зоне влияния дайки. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению в АО «Гипроцветмет» – получен акт об использовании результатов кандидатской диссертации от 28.11.2024 г. (Приложение Б).

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось с помощью комплексного подхода, включающего в себя теоретические исследования (анализ существующих исследований), натурные исследования развития геомеханических процессов в массиве горных пород; визуальное обследование горных выработок; проведение лабораторных испытаний для определения параметров модели; численное моделирование геомеханических процессов, а также статистические методы анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Дайки в массиве горных пород сложного геологического строения являются концентратором напряжений, за счет чего происходит значительное изменение напряженно-деформированного состояния массива вокруг них, проходка горных выработок оказывает дополнительное изменение напряженного поля, которое характеризуется наличием зон разгрузки со стороны лежащего и пригрузки со стороны висячего боков, параметры которых необходимо определять численным моделированием с заданием неоднородности в явном виде.

2. Размер зоны влияния дайки на напряженно-деформированное состояние массива на участке её пересечения горной выработкой зависит от геометрических параметров дайки: выявлена параболическая зависимость от углов падения дайки и ее простирания, а изменение мощности дайки с 0.1 м до 0.5 м приводит к

снижению размера этой зоны не более чем на 5 % и может не учитываться при определении параметров этой зоны.

3. Устойчивость горных выработок, проводимых при пересечении даек и в зоне их влияния, должна обеспечиваться мерами охраны и поддержания, а именно: выбором оптимального угла пересечения нарушения трассой горной выработки; выполнением разгрузочных мероприятий при проходке в зоне концентрации напряжений; креплением горных выработок динамическими упрочняющими видами крепи, параметры разгрузочных строчек и динамических анкеров должны определяться с учетом формируемой зоны хрупкого разрушения массива.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического моделирования, сопоставлением полученных результатов с данными натурных наблюдений на участках пересечения выработкой дайки.

Апробация результатов проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 3 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных:

1. Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов «Прогноз и предупреждение удароопасности при ведении горных работ» (27-30 сентября 2022 г., Апатиты).

2. XVI Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (6-7 апреля 2023 г., Москва)

3. XXXIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2025» (3-7 февраля 2025 г., Москва).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной, а также нормативной литературы по теме исследования; обосновании и подборе параметров численной модели; обработке натурных, лабораторных и численных результатов; выявлении закономерностей формирования зоны влияния дайки на устойчивость горизонтальных горных выработок.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункты списка литературы № 3,4,20,59), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (пункт списка литературы № 33).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 110 наименований, и 4 приложений. Диссертация изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 19 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность коллективу кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, научному центру геомеханики и проблем горного производства, а также своей семье за поддержку и понимание во время написания диссертации.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОХОДКЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ТЕКТОНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ МАССИВАХ

Напряженное состояние массива горных пород определяется воздействием различных природных (геологические процессы [67, 88]) и техногенных факторов [22] (проходка горных выработок). К геологическим процессам в первую очередь можно отнести тектонические и неотектонические процессы [78,107]. В результате данных явлений в массивах горных пород происходят перераспределения напряжений, приводящие к смещению и деформации горных пород [30,54,80]. В случаях, если напряжения в приконтурном массиве превышают допустимые, происходят проявления горного давления, вызывающие потерю устойчивости [5,32,93].

При прогнозе устойчивости горных выработок отдельное внимание требуется уделить тектонически напряженным массивам [83,95], а также геологическому строению участков неоднородных массивов [81,97]. В данных условиях необходимо учитывать не только механическое поведение пород, но и взаимодействие геологических структур [91,106].

Неоднородности, такие как дайки, жилы, зоны ослабленных пород, тектонические неоднородности, зоны дробления, существенно влияют на формирование напряженного состояния массива и на устойчивость горных выработок [55,61,91]. Они могут приводить к изменению механического поведения горных пород в зависимости от расположения, а также физико-механических свойств пород.

Особенно опасными являются зоны с высокой трещиноватостью и различием в физических свойствах пород, которые могут создавать условия для возникновения локальных зон повышенных напряжений, способных вызвать обвалы и другие аварийные ситуации [79,66,50]. Влияние неоднородностей на устойчивость выработок особенно выражено в случае, когда выработки проходят через разломы или зоны дробления, где напряжения в массиве могут резко

изменяться на коротких расстояниях, что затрудняет прогнозирование и расчет устойчивости горных конструкций [102].

Тектонически напряжённые массивы – это структурные блоки земной коры, в которых горные породы испытывают воздействие значительных напряжений, генерируемых общепланетарными геодинамическими процессами, в первую очередь – движением литосферных плит. Накопление и последующая релаксация этих напряжений являются причиной формирования широкого спектра геологических неоднородностей. К их числу относятся (дайки), складчатые формы, разрывные нарушения (разломы), а также зоны тектонического дробления. В таких областях могут возникать как концентрации напряжений, так и зоны разгрузки, что делает их распределение более сложным и трудным для точного прогнозирования [42,98].

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на поведение таких массивов, является преобладание горизонтальных напряжений над вертикальными. Вертикальные напряжения можно достаточно точно рассчитать, исходя из глубины залегания пород и их плотности, однако в тектонически напряженных массивах эти значения могут существенно отклоняться от расчетных, что требует применения более сложных методов анализа [36, 51]. Горизонтальные напряжения, возникающие в таких условиях, могут значительно изменяться в зависимости от геоморфологических и тектонических факторов, что требует детальной проработки подходов к прогнозированию напряженно-деформированного состояния (НДС) пород с учетом геологических неоднородностей.

Для эффективного прогнозирования поведения горных выработок в таких условиях необходимо разработать методы, которые будут учитывать не только глобальные тектонические процессы, но и локальные геодинамические особенности, такие как характеристики нарушений, ориентированных в пространстве и влияющих на взаимодействие пород.

На данный момент существует значительный пробел в унифицированных методиках расчета устойчивости выработок в тектонически напряженных и геологически неоднородных массивах. Несмотря на множество разработанных

подходов, существующие методы не всегда позволяют точно оценить влияние геологических нарушений, таких как зоны дробления или разломы, на поведение горных выработок. Это создает риск ошибок при проектировании и расчете крепей, а также приводит к дополнительным расходам на усиление конструкций, которые не всегда оказываются эффективными.

Для обеспечения точности прогноза необходимо дополнить существующую нормативную базу с учетом новых научных данных и методик, ориентированных на более детальную оценку влияния геологических нарушений на НДС горных пород. Применение численных методов, таких как метод конечных элементов, позволит значительно повысить точность расчетов и учитывать сложную геологическую структуру массива, включая пространственные вариации напряжений, вызванные неоднородностями.

Кроме того, неоднородности массива могут вызывать локальные изменения в распределении напряжений, создавая ситуации, при которых части выработки оказываются под дополнительной нагрузкой, что приводит к ускоренному разрушению крепи и снижению ее эффективности. В таких условиях важно учитывать не только общее напряженное состояние массива, но и локальные вариации, обусловленные геологическими нарушениями. Таким образом, для успешного проектирования и эксплуатации горных выработок в тектонически напряженных и геологически неоднородных массивах необходимо разработать новые подходы, которые обеспечат более точную оценку НДС горных пород. Важным шагом в решении этой задачи является развитие численных методов, таких как метод конечных элементов, для моделирования геомеханических процессов в условиях тектонических нарушений и геологических неоднородностей. Эти методы позволят улучшить точность прогнозов, учесть влияние локальных нарушений на напряжения и повысить безопасность горных работ, а также оптимизировать расходы на проектирование и эксплуатацию горных выработок в сложных горно-геологических условиях.

1.1 Характеристика объекта исследований

Диссертация посвящена исследованию НДС породного массива в окрестности пересечения горизонтальной горной выработкой участка массива, осложненного наличием прослоек более прочных пород (даек), расположенных в условиях характерных для рудников Хибинского массива апатит-нефелиновых руд [25,16,23].

На рудниках апатит-нефелиновых месторождений чаще всего предусматривается подэтажное обрушение. Участок плана горных работ представлен на рисунке 1.1.

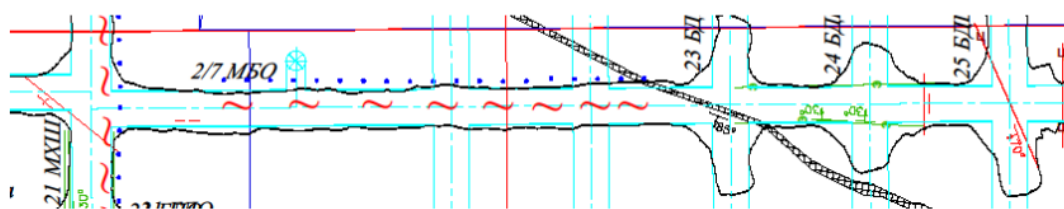


Рисунок 1.1 – Участок горных выработок, находящихся на пересечении с контактом геологических разностей [20]

Анализ планов горных работ выявил, что наиболее распространенными являются крутопадающие контакты с наличием даек, а также без них.

Основными геометрическими параметрами, характеризующими контакт типа залегания литологической разности и выработки, являются площадь и форма выработки, угол падения дайки относительно выработки и мощность контакта. Кроме этого, большое влияние имеют физико-механические свойства контактов.

Углы α , β и γ на рисунке 1.2 характеризуют направление угла залегания зоны контакта. Чаще всего в практике литологические неоднородности являются кососекущими и комбинируют в себе 2 или 3 направления залегания.

Технологические параметры разработки месторождения являются исходными данными, которые принимаются для исследований.

Устойчивость горных выработок определяется в зависимости от напряженного состояния и представлена в таблице 1.1. Категории устойчивости определяют удароопасность горных выработок и, как следствие, возможность возникновения зон хрупкого разрушения.

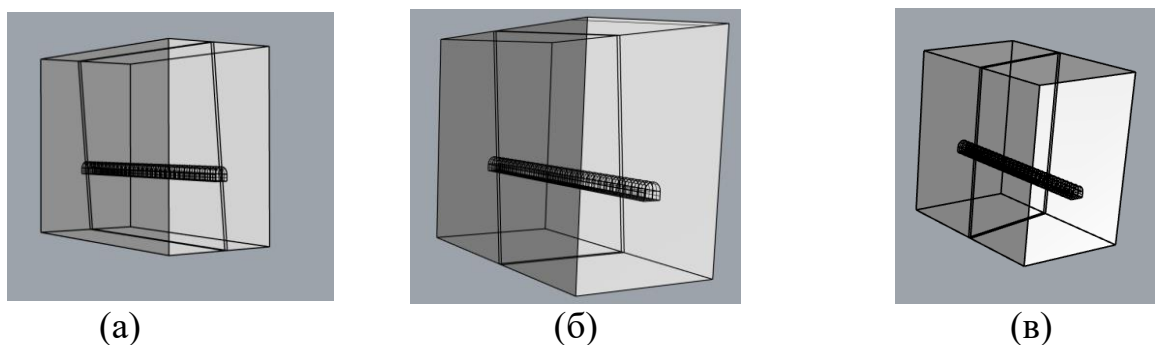


Рисунок 1.2 – Типовые схемы залегания даек

а – угол залегания α ; б - угол залегания β ; в – угол залегания γ

(составлено автором)

Таблица 1.1 - Характеристика внешних признаков динамического проявления горного давления в выработках различных категорий состояний [18]

Категория состояния выработки	Действующие напряжения	Описание возможных внешних признаков динамического проявления горного давления
В	$(0.3-0.5)\sigma_c$	Шелушение, незначительное динамическое заколообразование с затуханием через 4-6 ч после отпала
Г	$(0.5-0.7)\sigma_c$	Интенсивное шелушение, динамическое заколообразование пород в течение 6-12 ч после отпала, эллипсовидная форма «стаканов» от взрывных скважин.
Д	$>0.7\sigma_c$	Интенсивное динамическое заколообразование, не затухающее несколько суток стрельание, эллипсовидная форма «стаканов» от взрывных скважин, образование «дорожек» на стенках шпуров и скважин. Длительность процесса до 2-х и более суток.

1.2 Формы проявления горного давления

Увеличение глубины разработки месторождений полезных ископаемых приводит к усложнению горно-геологической ситуации, а также к повышению действующих напряжений. Данные факторы, в свою очередь, приводят к разрушению приконтурного массива горных пород в динамической форме или в форме вывалов.

Анализ существующих исследований [9,48] показал, что существуют различные факторы проявления горного давления, однако основными являются

сложное геологическое строение, напряженное состояние, а также технологические факторы.

Проявления горного давления в динамической форме являются наиболее опасными и характеризуются быстрым развитием деформаций [53,77], что усложняет прогноз их возникновения. Они возникают в связи с перераспределением напряжений в массиве, которые в свою очередь приводят к выбросам различного объема породы в выработанное пространство. Данные проявления могут приводить к прерыванию работы как участков выработок, так и полностью горного предприятия. Данный тип проявлений горного давления можно разделить на несколько стадий, отраженных на рисунке 1.3: накопление упругой энергии (I), предельное НДС (II-III), разгрузка массива (IV), стабилизация напряженного состояния (V). Наибольший пик напряжений (А) соответствует моменту горного удара, а локальные максимумы (1-2) – стремлениям, толчкам и микроударам.

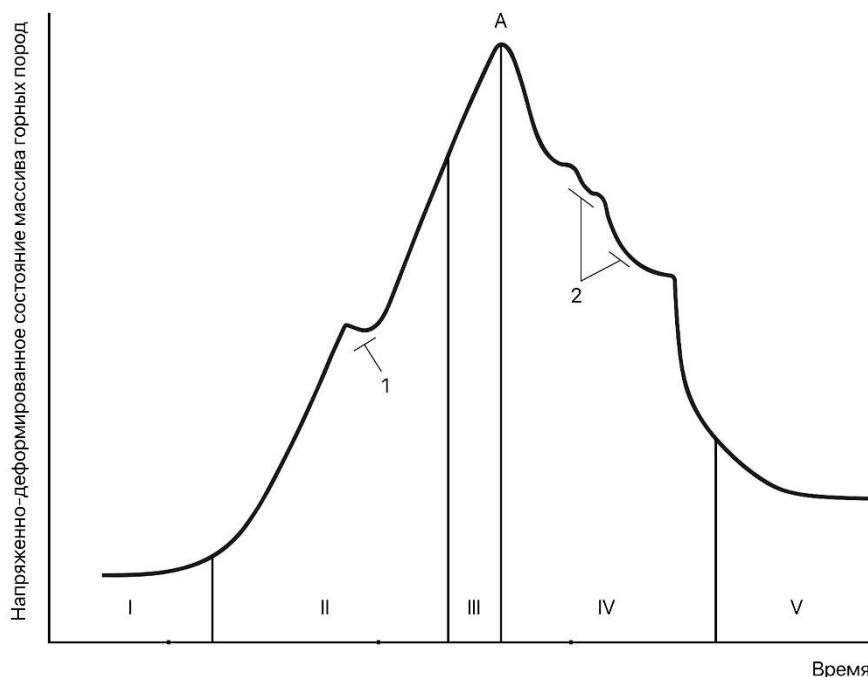


Рисунок 1.3 - Стадии состояний массива горных пород и типы проявлений горного давления в динамической форме [21]

Динамическое разрушение характеризуется также лавинообразным течением, которое происходит на различных уровнях разрушения, начиная от

возникновения трещин на микроструктурном уровне и заканчивая потерей сплошности горных пород.

Условия и причины возникновения опасных геодинамических событий характеризуются определенным кругом показателей, на каждый из которых оказывает влияние множество факторов. Фактором возникновения опасных геодинамических событий принято считать условия, необходимые для возникновения опасных геодинамических событий, и причины, оказывающие влияние на возникновение опасных геодинамических событий.

Наиболее распространенными событиями являются микроудары и горные удары, отличающиеся сейсмической энергией воздействия, однако обе эти формы проявления характеризуются хрупким разрушением пород в приконтурном массиве вблизи горных выработок, нарушением целостности крепления и вывалами породы, что приводит к дополнительной энергозатратности производства.

Основными факторами возникновения динамических проявлений горного давления являются:

- особенности природного напряженного состояния массива;
- физико-механические свойства пород;
- геологические нарушения;
- литологические особенности массива (наличие даек, прожилков);
- повышенные остаточные напряжения в горных породах;
- неотектонические процессы;
- порядок выемки (близость выработок, неравномерное подвигание забоев, оставление целиков и др.);
- применяемые системы разработки;
- температурные воздействия, газоносность пластов и др.

Проявления горного давления в статической форме происходят при формировании зоны растягивающих напряжений, либо при возникновении концентраций напряжений при перераспределении НДС [85,75,103]. Оно может проявляться как в форме вывалов, так и разрушением стенок выработок или

целиков. Данный вид проявления горного давления может быть последствием динамического проявления горного давления.

Проявления горного давления также переходить из одной формы в другую, в связи с изменением геомеханической и геодинамической ситуации. В связи с перераспределением НДС при разработке месторождений полезных ископаемых прогноз проявлений горного давления является непосредственным методом обеспечения безопасности ведения горных работ.

1.3 Анализ методов оценки устойчивости горных выработок

Устойчивость горной выработки определяется способностью сохранять равновесное состояние в течение проектного срока эксплуатации, что является критерием безопасности и экономической эффективности горных работ. Формирование устойчивости обусловлено взаимодействием геомеханических, геологических и технологических факторов. В зависимости от условий строительства выделяются три основных типа потери устойчивости: заколообразование, связанное с высокими напряжениями; изменение формы и размеров выработки с незначительными разрушениями, но значительными деформациями; вывалообразование — локальные обрушения массива (рисунок 1.4).

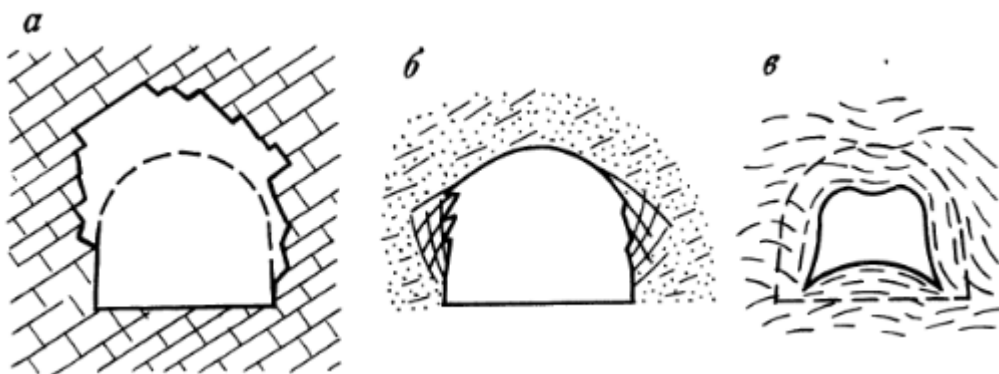


Рисунок 1.4 - Формы потери устойчивости горных выработок [8]

В условиях Хибинского массива апатит-нефелиновых месторождений тектоническое напряжённое состояние и склонность пород к хрупкому разрушению способствуют формированию преимущественно вывалообразований и заколообразований в кровле и целиках.

В общем методы оценки устойчивости выработок можно разделить на 3 группы: натурные, аналитические и эмпирические.

1.3.1 Натурные методы оценки устойчивости

Полевые исследования при оценке устойчивости горизонтальных выработок направлены на изучение физико-механических характеристик массива, степени трещиноватости, а также выявление зон повышенного тектонического напряжения. Эти исследования требуют внедрения современных инструментов и методик натурального наблюдения, что обеспечивает получение достоверных исходных данных для дальнейших расчетов.

К основным методам полевых исследований можно отнести:

- керноотбор. В рамках оценки кернов можно оценить дискование керна [24,13] с целью определения категории удароопасности участка выработки (рисунок 1.5а), а также структурную нарушенность массива (рисунок 1.5б).

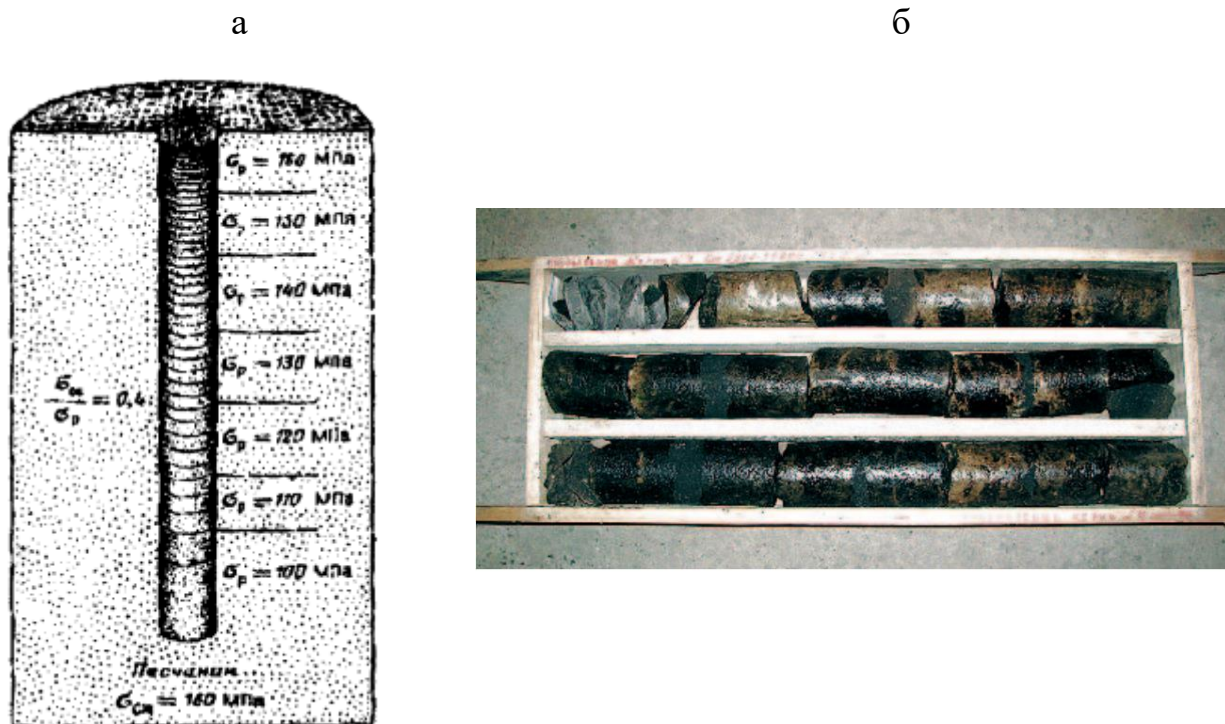


Рисунок 1.5 - Общий вид дискования керна [22] (а) и ящик с полноразмерным керном [8] (б)

- геофизические исследования [34,35], включающие в себя системы акустической эмиссии и георадиолокации, позволяющие регистрировать

напряжённно-деформированные состояния, а также определять степень удароопасности выработок (рисунок 1.6).

- лазерное сканирование породных обнажений обеспечивает детализированную картину состояния горных выработок, формирование вывалом и нарушений устойчивости горных выработок [6,73]. Пример лазерного сканирования выработки представлен на рисунке 1.7.

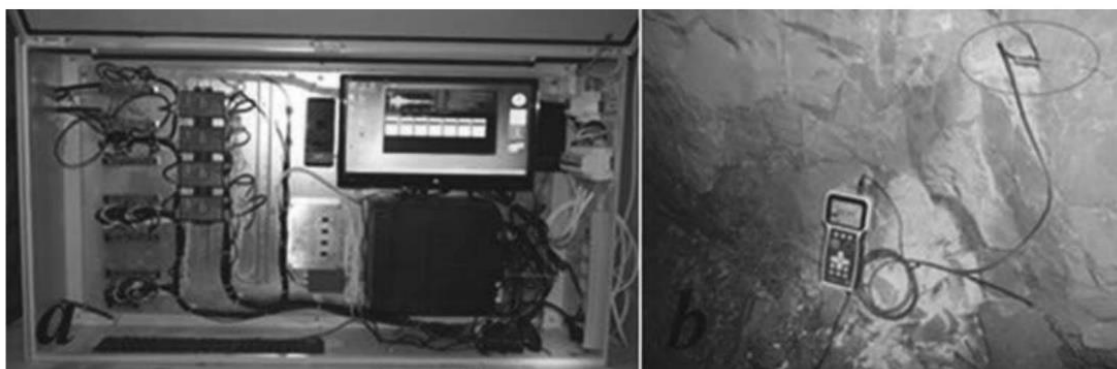


Рисунок 1.6 - Средства для проведения сейсмоакустического контроля горного давления [31]

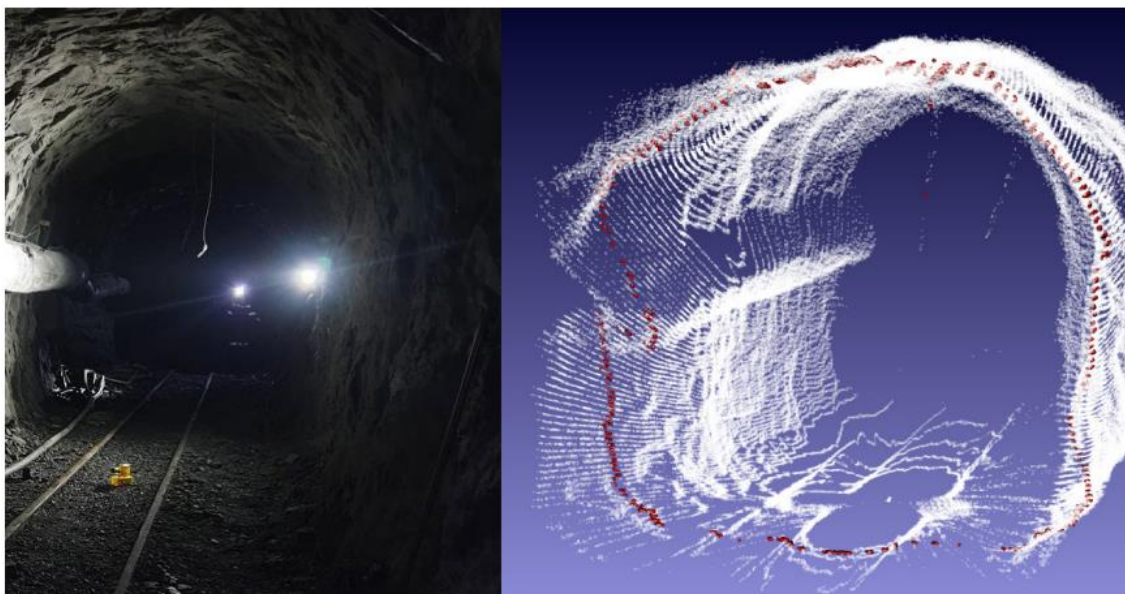


Рисунок 1.7 - Пример лазерного сканирования подземной горной выработки [10]

Важной составляющей является применение тензометрических датчиков, систем акустической эмиссии и геофизических комплексов, позволяющих фиксировать процессы развития концентрации напряжений и их релаксацию в реальном времени. Учет этих показателей позволяет своевременно выявлять зоны перераспределения напряжений, возникновения трещин, растущих очагов

возможных аварийных ситуаций. В исследовании [41] подчёркивается необходимость детального анализа распределения напряжений на контуре выработок, а мониторинг деформаций проводится с целью своевременного выявления опасных смещений и прогрессивного разрушения массива.

Инструментальные методы автоматически регистрируют параметры деформаций и внутренних напряжений, обеспечивая высокую частотность и полноту наблюдений в реальном времени. Большое значение придаётся их интеграции с геоинформационными системами для пространственного анализа и прогнозирования поведения массива. Данный комплекс методов остаётся основой для надёжной оценки устойчивости и формирования исходных данных для аналитического моделирования.

1.3.2 Аналитические методы оценки устойчивости

Аналитические методы оценки устойчивости горизонтальных горных выработок представляют собой сложный комплекс математико-физических инструментов, направленных на количественное описание напряжённо-деформированного состояния горного массива и прогнозирование предельных условий устойчивости. Современные исследования [75,79,86] отражают развитие этих моделей, характеризующие интеграцию классических теорий механики сплошной среды и новейших представлений о дискретной структуре массива.

В основе традиционных аналитических подходов лежит механика сплошной среды, где горная порода рассматривается как гомогенная, хотя и анизотропная, упругая или пластичная среда. В этой связи модели предельного равновесия и решения уравнений равновесия позволяют выявить возможные поверхности скольжения и определить коэффициенты запаса устойчивости. Однако данные математические модели часто сталкиваются с ограничениями в условиях неоднородных и трещиноватых массивов, характерных для месторождений полезных ископаемых.

Одним из основных методов оценки устойчивости является метод предельных состояний, который используется для оценки устойчивости при достижении критических напряжений, сопряженных с началом разрушения

породы. Данный метод основывается на предположении, что горные породы начинают разрушаться, когда напряжения достигают предела прочности [39] и может определяться по формуле 1.1.

$$\sigma_1 = \frac{P}{S}, \quad (1.1)$$

где P – сила, действующая на контур выработки, Н;

S – сечение выработки, м².

Однако в условиях эксплуатации, когда массив не является однородной средой, аналитические методы становятся не так просты и должны учитывать изменение строения массива. Для этого используются различные критерии прочности такие как критерий Кулона-Мора [74], представленный в формуле 1.2:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad (1.2)$$

где τ – касательное напряжение, МПа;

c – сцепление, МПа;

σ_n – нормальное напряжение МПа;

φ – угол внутреннего трения, °.

Данный критерий позволяет учитывать структуру горных пород, в зависимости от их физико-механических свойств.

Существенное расширение возможностей аналитического анализа обеспечил критерий прочности Хока-Брауна [68] и сопутствующий ему геологический индекс качества массива (GSI), которые вводят количественные параметры, отражающие реальный уровень разрушения и степень взаимосвязи блочных структур (формула 1.3).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1.3)$$

где σ_1 – главное максимальное напряжение, МПа;

σ_3 – главное минимальное напряжение, МПа;

σ_{ci} – прочность породы на одноосное сжатие, МПа;

m_b, a, s – безразмерные параметры, которые не имеют физического смысла, но влияют на форму и степень нелинейности предельной огибающей Хока.

Этот критерий позволил выйти за рамки сплошных сред, эффективно моделируя переход к дискретной механике, где свойства массива зависят не только от физико-механических свойств, но и от структурно-тектонических особенностей, заложенных в массиве.

1.3.3 Эмпирические методы оценки устойчивости

Практическая оценка устойчивости базируется на критериях превышения напряжений на контуре выработки предельных значений, а также на параметрах смещений, скорости роста напряжений, размерах вывалообразований и остаточной прочности. Основные классификации, используемые в геомеханике представлены ниже и систематизированы в таблице 1.4.

Рейтинговая система Rock Mass Rating (RMR), разработанная Бениявски [46,47] в начале 1970-х годов, является одной из наиболее широко применяемых и признанных систем оценки качества горного массива в инженерной геологии и горной механике. Она представляет собой интегральный индекс (формула 1.4), объединяющий шесть ключевых параметров, влияющих на устойчивость и поведение массива: прочность горной породы при одноосном сжатии, индекс качества керна (RQD), расстояние между трещинами, состояние поверхностей трещин, гидрогеологические условия и ориентацию трещиноватости относительно выработки.

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B + J_T \quad (1.4)$$

где J_{A1} – коэффициент, зависящий от прочности породы на одноосное сжатие;

J_{A2} – коэффициент, характеризующий состояние породы в керне по индексу RQD;

J_{A3} – коэффициент, зависящий от расстояния между трещинами (отдельностями);

J_{A4} – коэффициент, оценивающий состояние поверхностей трещин (шероховатость и заполнение);

J_{A5} – коэффициент, учитывающий влияние водонасыщенности на сопротивление сдвигу по трещинам;

J_B – коэффициент, корректирующий оценку в зависимости от ориентации систем трещин относительно выработки;

J_T – коэффициент, учитывающий снижение устойчивости во времени.

Каждый из этих параметров оценивается по определённой шкале, а их сумма формирует итоговый рейтинг от 0 до 100, который классифицирует массив по качеству — от «очень плохого» до «очень хорошего». Такая комплексная оценка позволяет количественно оценить качество массива осадочных пород, связывая форму потери устойчивости с коэффициентом напряжённого состояния — отношением действующих напряжений к пределу прочности породы — и степенью трещиноватости.

Значения RMR варьируются от 0 до 100 (таблица 1.2), при этом с ростом рейтинга увеличивается устойчивость массива, а породы классифицируются на пять категорий качества (рисунок 1.8).

Основным условием потери устойчивости является превышение напряжения на контуре предела предельных значений. Так же на сегодняшний день разработаны критерии, основанные на значениях смещений, скорости увеличения напряжений на контуре выработки, размер вывалообразования, остаточную прочность.

Существующие критерии не универсальны, поскольку учитывают ограниченный набор факторов и не отражают полной картины процессов в массиве, однако выделение пяти категорий устойчивости служит основой для инженерных решений (таблица 1.3).

Таблица 1.2 - Классификация RMR [47]

Категория устойчивости	RMR	Оценка устойчивости	Время устойчивости
I	100-81	Весьма устойчивые	20 лет при пролете 15 м
II	80-61	Устойчивые	1 год при пролете 10 м
III	60-41	Средней устойчивости	1 неделя при пролете 5 м
IV	40-21	Неустойчивые	10 часов при пролете 2.5 м
V	<20	Весьма неустойчивые	30 минут при пролете 1 м

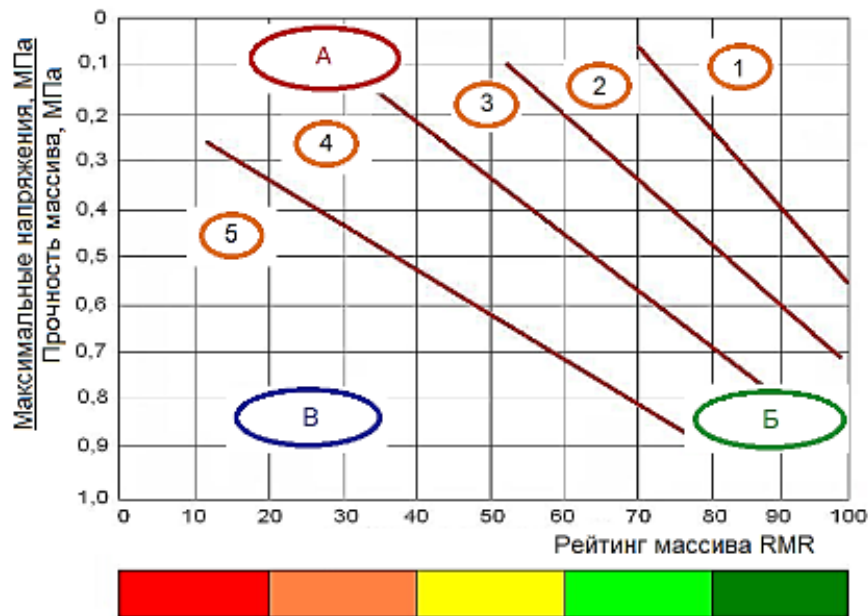


Рисунок 1.8 – Определение категории устойчивости горных выработок в зависимости от рейтинга массива и коэффициента напряженного состояния [26]

Таблица 1.3 - Категории устойчивости горных пород [47]

Категория	Степень устойчивости	Поведение приконтурного массива
I	Вполне устойчивые	Массив сохраняет свою сплошность
II	Устойчивые	Обрушение отдельных блоков породы
III	Средней устойчивости	Локальное разрушение глубиной до 1 м
IV	Неустойчивые	Разрушение большей части приконтурного массива горной выработки, может достигать глубины больше 1 м
V	Весьма неустойчивые	Интенсивное разрушение происходит по всему контуру выработки

1.4 Классификации нарушенности массива

Хибинский массив апатит-нефелиновых горных пород относится к трещиноватым массивам. Для оценки трещиноватости и нарушенности массивов существуют различные классификации, представленные в таблице 1.4.

Индекс определения качества породы RQD был разработан для определения качества массива в натурных условиях по результатам бурения керна [57].

Для оценки качества массива принимаются отношение суммарной длины керна без трещин длиной более 10 см к общей длине керна, определяемый по формуле 1.5:

$$RQD = \frac{\sum L_i}{L_{\text{керна}}} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

где L_i – длина участка керна без трещин, см;

$L_{\text{керна}}$ – общая длина керна, см.

Участки трещин, полученные в ходе технологических операций по бурению и транспортировке керна в данном расчете, не учитываются. Соответственно при анализе примера на рисунке 1.9 можно рассчитать RQD для предложенного участка керна.

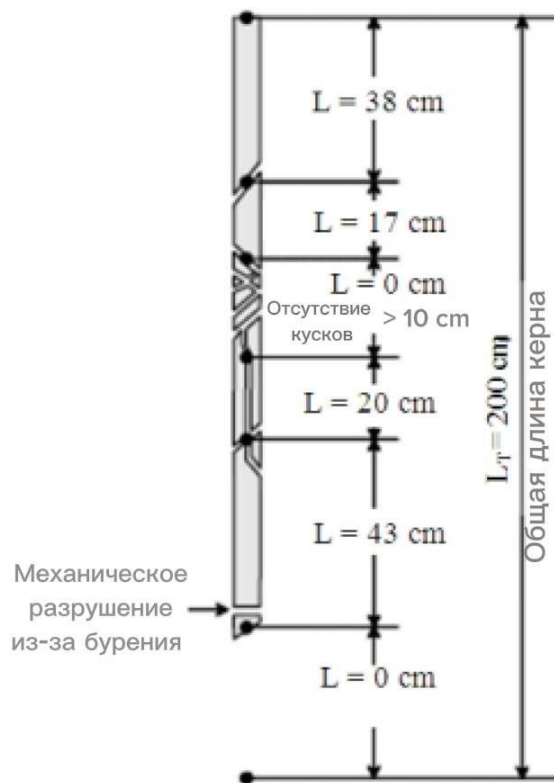


Рисунок 1.9 - Определение качества породы по керну и классификация RQD [22]

В данном случае мы имеем участки, удовлетворяющие условиям, длиной 38 см, 17 см, 20 см и 43 см, поэтому расчет имеет следующий вид:

$$RQD = \frac{38 + 17 + 20 + 43}{200} \cdot 100\% = 59\%$$

Таблица 1.4 - Основные рейтинговые классификации горных пород (составлено автором)

Название классификации	Автор	Описание	Применение	Преимущества	Особенности
Rock load	Терцаги (1946) [98]	Геологические и геомеханические характеристики для оценки нагрузок на крепь	Проектирование крепления в тоннелях	Простота, ориентирована на нагрузку	Упрощённая
Stand-up time	Лоффер (1958) [89]	Время устойчивости выработки без крепления	Планирование проходческих работ, NATM	Практическая значимость для проходки	Не количественная, зависит от опыта
NATM [101]	Пачер (1964)	Метод проходки с учётом времени устойчивости без крепления и адаптивным креплением	Тоннелестроение	Гибкость, безопасность	Требуется мониторинга и опыта
RQD [57]	Дир (1967)	Процент длины керна без трещин >10 см к общей длине керна	Основной параметр для RMR, Q	Простота измерения	Не учитывает ориентацию и гидрогеологию
RSR [100]	Викхам (1972)	Суммарный рейтинг геологии, геометрии трещин и гидрогеологических условий	Ранние оценки качества массива	Комплексный подход	Сложность, субъективность
RMR	Бенявски (1973) [47]	Сумма баллов за прочность, RQD, расстояние и состояние трещин, воду и ориентацию	Тоннели, шахты, откосы, фундаменты	Универсальность, простота	Субъективность, ограничена в сложных условиях
MRMR [76]	Лобшир и Тейлор	Модификация RMR с поправочными коэффициентами, учитывающими методы проходки и геологию	Горные условия, прогноз поведения массива	Учет специфики горных работ	Требуется дополнительной калибровки

Продолжение таблицы 1.4

Название классификации	Автор	Описание	Применение	Преимущества	Особенности
Q	Бартон (1974)	Индекс качества массива с учётом RQD, количества и качества трещин, воды и напряжений	Тоннели, камеры	Чувствительность к гидрогеологии и трещинам	Требуется большого объёма данных
Srtength-size	Франклин (1975)	Зависимость прочности массива от размера образца и структуры	Оценка прочности массивов	Учет масштабного эффекта	Не универсальна, специфична для определённых условий
Основное геотехническое описание	ISRM (1981)	Качественное описание структуры, трещиноватости, водонасыщенности и напряжённого состояния массива	Предварительная оценка массива	Простота, доступность	Субъективность, отсутствие количественных данных
Унифицированная классификация	Уильямсон (1984)	Систематизация различных параметров массива в единую шкалу с целью стандартизации оценки	Различные инженерные задачи	Стандартизация, универсальность	Требуется адаптации под конкретные условия

Для оценки качества породы, необходимо воспользоваться классификацией, предложенной в таблице 1.5. В таком случае данную породу можно отнести к средним породам.

Таблица 1.5 - Индекс качества породы RQD [58]

RQD, %	Качество породы
<25	Очень слабое
25-50	Слабое
50-75	Среднее
75-90	Крепкое
90-100	Очень крепкое

Q-система, разработанная Н. Бартоном и коллегами [43] в 1974 году, предлагает альтернативный подход к классификации, учитывая не только RQD и количество систем трещин, но и качество трещин, степень водонасыщенности и напряжённое состояние массива [65].

Формула Q-системы выражается как произведение нескольких факторов (формула 1.6):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1.6)$$

где *RQD* – параметр, характеризующий качество массива;

J_n – индекс нарушенности, характеризующий количество и ориентированность систем трещин;

J_r – показатель шероховатости, описывающий механическое состояние поверхностей трещин;

J_a – параметр состояния трещин, учитывающий степень их выветрелости и характер заполнителя;

J_w – гидрологический фактор, определяющий снижение прочности под влиянием фильтрационных процессов;

SRF – коэффициент напряженного состояния.

GSI – индекс геологической прочности массива, основанный Хоком и Брауном [69] на натурных данных, позволяет определять механическое поведение конкретного массива (рисунок 1.10).

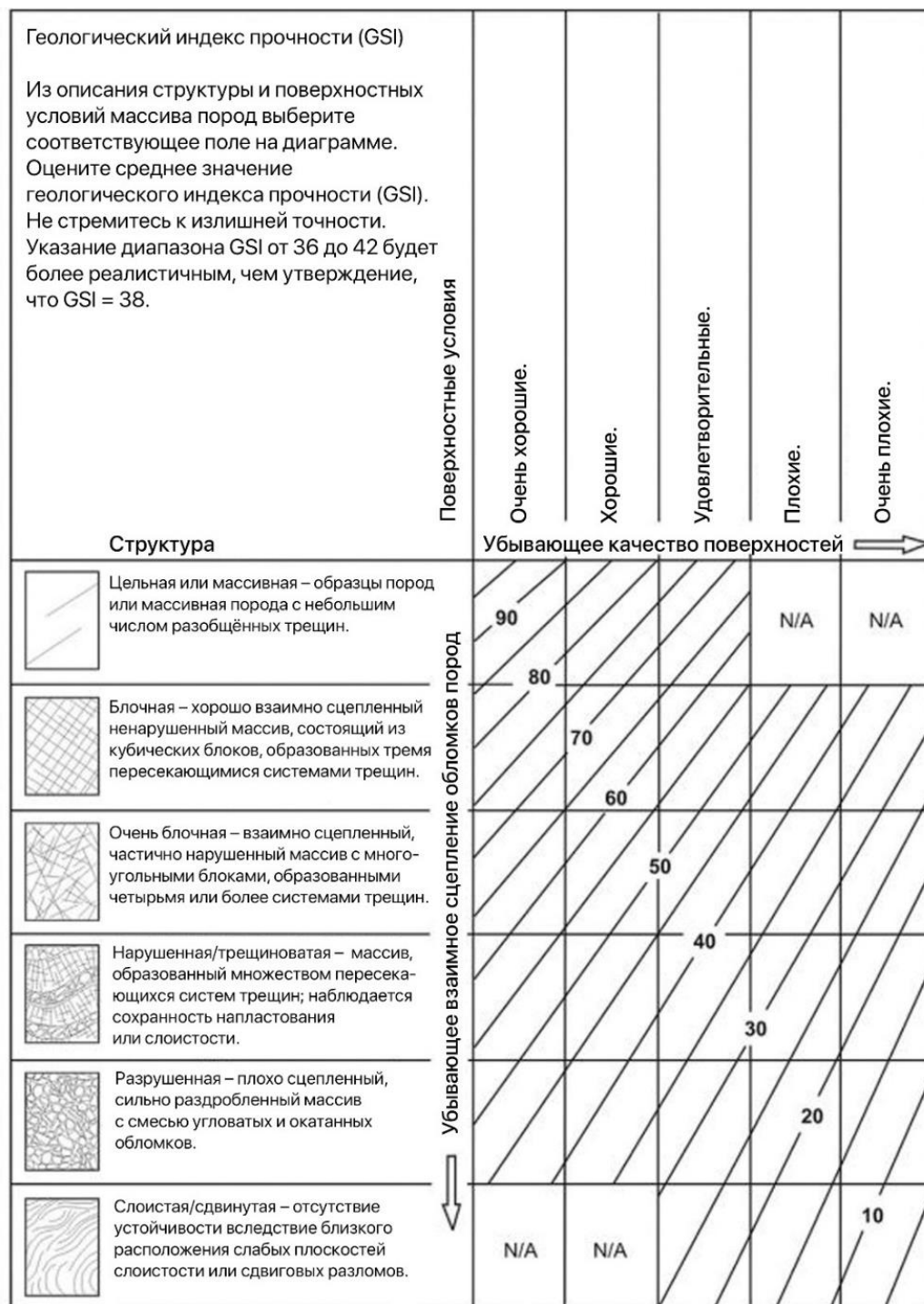


Рисунок 1.10 – Оценка индекса GSI на основе визуального осмотра геологических условий [70]

1.5 Особенности проявления горного давления при проходке выработок вблизи геологических неоднородностей

Вопрос проявления горного давления при проходке горных выработок вблизи геологических неоднородностей остаётся одной из наиболее актуальных и сложных проблем современной горной геомеханики. Геологические неоднородности,

включая тектонические нарушения, зоны интенсивной трещиноватости, жесткие и пластичные включения, оказывают определяющее влияние на НДС массива, формируя в его пределах локальные аномалии напряжений и деформаций. В отличие от однородных пород, где распределение нагрузок относительно предсказуемо, в присутствии неоднородностей наблюдается сложное взаимодействие между различными структурными элементами массива, что приводит к возникновению зон концентрации напряжений, способных инициировать хрупкое разрушение, интенсивное развитие трещин и сдвигов, а также масштабные динамические явления.

Проходка выработок в таких условиях сопровождается не только изменением характера деформаций в приконтурной зоне, но и существенным повышением вероятности внезапных проявлений горного давления, включая выбросы газа и угля, обрушения кровли и боковых пород, а также пучение почвы. Эти явления обусловлены не только физико-механическими свойствами пород, но и их структурной неоднородностью, а также морфологией самих геологических включений. Особое значение придается ориентации выработки относительно простирания неоднородности: при пересечении тектонических разломов или жестких включений под углом отмечается максимальная концентрация напряжений, что существенно повышает риск развития аварийных ситуаций.

Современные исследования указывают на необходимость комплексного подхода к оценке НДС массива вблизи неоднородностей. Использование многоуровневого мониторинга, включающего геофизические методы, инструментальные наблюдения и численное моделирование, позволяет выявлять зоны потенциальной неустойчивости и своевременно корректировать параметры крепления и технологии ведения горных работ. Особое внимание уделяется анализу масштабов и морфологии зон хрупкого разрушения, которые могут значительно превышать размеры самих неоднородностей и распространяться на десятки метров от их границ.

В условиях увеличения глубины горных работ и усложнения горно-геологических условий традиционные расчетные схемы часто оказываются

недостаточными для точного прогнозирования поведения массива. Это требует внедрения адаптивных моделей, способных учитывать не только геометрию и физико-механические параметры пород, но и динамику развития трещиноватости, а также особенности взаимодействия между различными структурными элементами массива. Применение таких подходов позволяет существенно повысить надежность прогноза и минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций.

Влияние литологически неоднородного массива горных пород на НДС в окрестности горной выработки учитывается при решении прикладных задач геомеханики. Оценка устойчивости незакрепленной выработки сводчатой формы, расположенной в неоднородном трещиноватом массиве, рассматривалась в [63]. Дженком и Диасом выполнена оценка смещений поверхности оценка смещений над незакрепленной выработкой в слоистом массиве вблизи расположенного на поверхности объекта [62].

Так же существуют исследования, связанные с более жесткими и слабыми прослойками пород и их влиянием на НДС как на закрепленных выработках различного сечения [105], так и на незакрепленных [59]. В работе [94] было проведено исследование по обеспечению устойчивости незакрепленной горной выработки, расположенной в слое песчаника, лежащим и висячим боком которого являются мощные слои аргиллита. В исследовании Нунеса и Мегуда [84] было исследовано влияние тонкого слоя прочных пород, залегающих над тоннелем, на НДС обделки с помощью численного моделирования с верификацией на эквивалентных материалах, так же в работе [104] исследован случай, когда раздел пород пересекает поперечное сечение выработки.

В настоящее время численное геомеханическое моделирование является одним из наиболее распространенных инструментов, использующихся для решения данной задачи. Для задач, связанных с изменением НДС массива на контуре выработки, используются различные программные комплексы, реализующие метод конечных элементов, метод дискретных элементов, метод конечных разностей, а также их комбинации [14].

В статье [29] было исследовано влияние ослабленного типа руд на устойчивость незакрепленной горной выработки. В работе была рассмотрена численная модель массива, состоящего из двух типов пород. С помощью численного моделирования методом конечных элементов были выявлены закономерности изменения напряжений и деформаций при пересечении незакрепленной выработкой сводчатой формы.

В [40] проведено исследование геомеханического состояния массива осадочных пород, вмещающего выработку и дизъюнктивное нарушение. В данной работе трасса выработки и простираание нарушения параллельны. Модель была реализована с помощью двух методов: метода фиктивных нагрузок и разрывных смещений, описывающих граничные условия модели. В результате было выявлено, что зоны нарушения сплошности зависят от углов конфигурации нарушения.

В [28] рассмотрено формирование естественного НДС в массиве, сложенном различными слоями пород и его изменение в результате проведения горной выработки. В результате методом конечных элементов были выявлены закономерности формирования напряженного состояния неоднородного массива при различных углах залегания контакта пород.

Таким образом, изучение особенностей проявления горного давления вблизи геологических неоднородностей выходит за рамки классических представлений о поведении породного массива и требует интеграции современных методов анализа, моделирования и инженерных решений, направленных на обеспечение устойчивости и безопасности горных выработок в сложных геологических условиях.

1.6 Анализ методов определения размеров зон хрупкого разрушения

Зона хрупкого разрушения – область массива горных пород вблизи горной выработки, в которой происходит разрушение пород за счет распространения микро и макротрещин, вызванных повышенными сжимающими напряжениями, при практически полном отсутствии макропластической деформации. Формирование данных зон характерно для прочных пород, расположенных в тектонически напряженных массивах горных пород. Характерной формой данных

геомеханических процессов является формирование V-образного свода, расположенном в направлении минимальных напряжений. Стадии развития хрупкого разрушения отражены на рисунке 1.11.

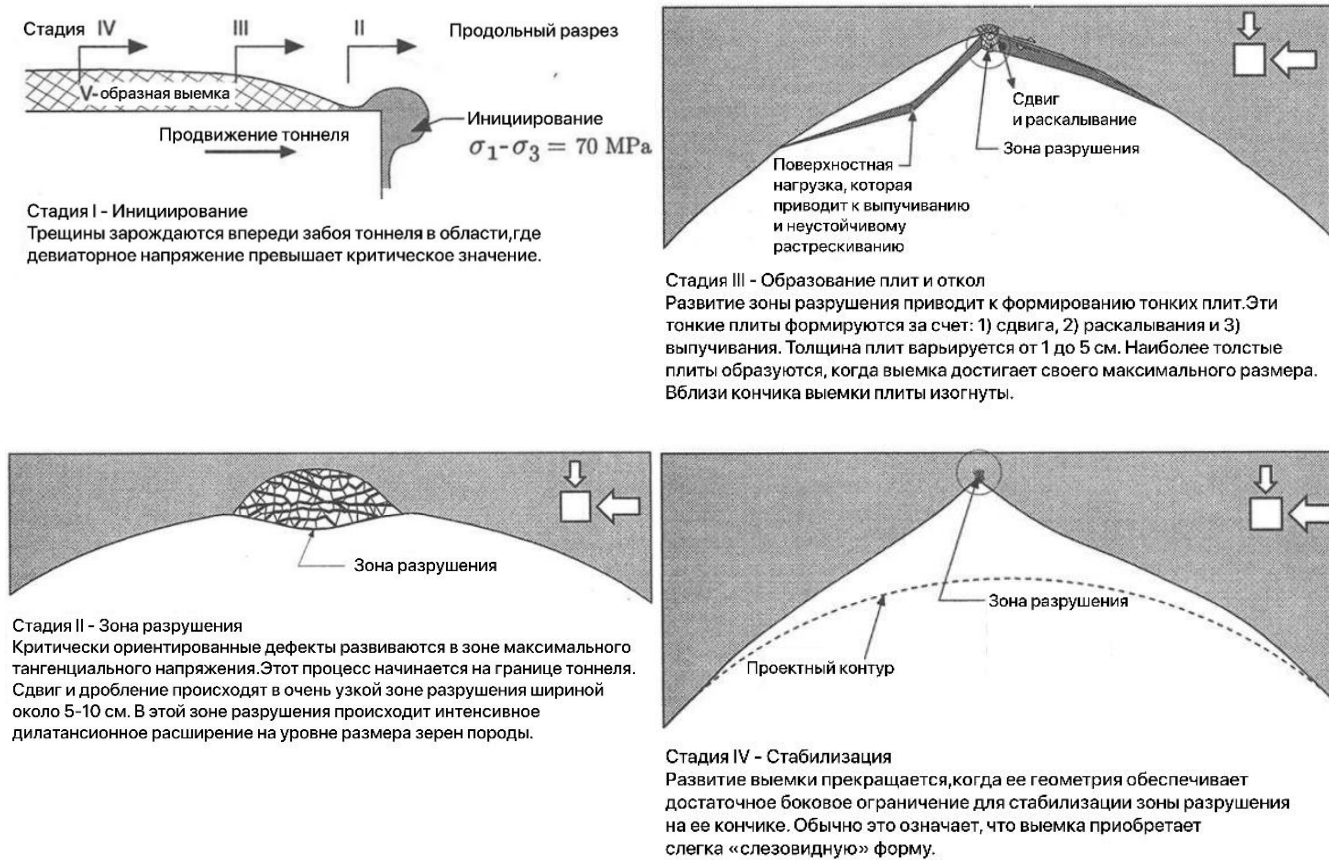


Рисунок 1.11 - Стадии формирования хрупкого разрушения приконтурного массива горных выработок [82]

Прогноз и определение параметров зон хрупкого разрушения является серьезной геомеханической задачей для обеспечения безопасного ведения горных работ. Для оценки зон хрупкого разрушения существуют различные подходы.

1.6.1 Аналитические методы определения размеров зон хрупкого разрушения

Вопросы, касающиеся развития зон хрупкого разрушения, активно исследуются учеными по всему миру [99,17]. Классические теории были зарождались еще в начале XX века Гриффитсом [64], который связывал хрупкое разрушение с энергией, превышающей энергию образования трещины. Критическое напряжение по его критерию определялось по формуле 1.7:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}} \quad (1.7)$$

где E – модуль упругости, МПа;

γ - удельная поверхностная энергия разрушения, Дж/м²;

l - половина длины трещины, м.

Затем в середине XX века Ирвин [72] ввел понятие коэффициента интенсивности напряжений, характеризующий напряженное состояние у вершины трещины. Также существуют и другие модели, помогающие описывать хрупкое разрушение материалов, отраженные в исследованиях Кайзера [49] Ренами и Мартина [90], Сафае [92]. В общем случае модели упрочнения/разупрочнения пород представляют собой функции изменения параметров сцепления, угла внутреннего трения и угла дилатансии в зависимости от деформаций (эквивалентной (ε_q) и объемной (ε_v)) и давления (p) (формула 1.8-1.10)

$$c = f(\varepsilon_q, \varepsilon_v, p) \quad (1.8)$$

$$\varphi = f(\varepsilon_q, \varepsilon_v, p) \quad (1.9)$$

$$\psi = f(\varepsilon_q, \varepsilon_v, p) \quad (1.10)$$

Результаты полевых наблюдений и лабораторных экспериментов, представленные в публикации [35] позволили глубже понять механизмы разрушения в различных горно-геологических условиях, а также изучить применение численных методов расчета. Начало исследований вопроса хрупкого разрушения было заложено в работе [45], где был предложен метод оценки качества горных пород, основанный на показателях качества массива, что стало в дальнейшем основой для последующих исследований устойчивости выработок. В работах [14,44,109], рассмотрено влияние макроструктуры на устойчивость горных выработок. Для оценки прочности горных массивов часто используют критерий Хока-Брауна [68] модификации которого позволяют учесть влияние трещин и неоднородностей.

1.6.2 Численные методы определения размеров зон хрупкого разрушения

Численное моделирование [218] в инженерной геомеханике выступает ключевым инструментом для анализа НДС массивов и прогноза устойчивости искусственных и естественных подземных сооружений. Рост вычислительной мощности и развитие специализированного программного обеспечения позволили перейти от упрощённых расчетных схем к построению детальных трёхмерных моделей, которые интегрируют сложную геометрию выработок, анизотропию, неоднородность и локальные тектонические нарушения.

Метод конечных элементов (МКЭ) представляет собой современную и универсальную численную технологию, лежащую в основе анализа напряжённо-деформированного состояния горных массивов. Его суть заключается в разбиении объёма массива на дискретные элементы (тетраэдры, гексаэдры, плоские или объёмные формы), для которых формулируются соотношения механики сплошных сред с учётом конкретных физико-механических свойств породы. В каждом элементе перемещения и напряжения интерполируются на основе так называемых функций формы, а связи между элементами реализуются через узлы сетки, обеспечивая непрерывность решения [56].

Достоинства МКЭ заключаются в гибкости аппроксимации сложной геометрии и возможности учёта неоднородности, анизотропии, нелинейных деформаций и разрушения. Метод адаптирован для моделирования как статических, так и динамических процессов, анализа воздействия различного рода нагрузок, этапности горных работ и взаимодействия с крепью. В современных постановках МКЭ позволяет включать конструкции, фазовые переходы, многослойное строение массива и учитывать физические критерии отказа. Основные ограничения связаны с необходимостью тщательной калибровки входных данных, детальной генерации расчётной сетки, объёмом вычислений и сложностью обработки крупных трёхмерных моделей.

Метод дискретных элементов (МДЭ) основан на принципе разложения массива на отдельные физически осмысленные структурные единицы — блоки, частицы, или элементы, между которыми возможны контактные взаимодействия и

разрушения. Этот подход позволяет непосредственно моделировать трещиноватость, разуплотнение, локальные разрывы и кинетические процессы, что критически важно для анализа поведения сильно нарушенных и анизотропных массивов, движения блоков, осыпей, обрушений кровли и склонов.

Каждый элемент описывается индивидуальными законами движения, контактные силы и моменты рассчитываются с учетом законов трения, слипания или разрыва, что обеспечивает реализм процессов разрушения и перемещения материала. МДЭ широко используется для моделирования последствий взрывных работ, динамических воздействий, лавиноопасных процессов, блоковых обрушений и для анализа аварийных сценариев в сложных инженерно-геологических условиях [52].

Метод требует подробной информации о структуре и свойствах контактов, высокой разрешающей способности модели, существенных вычислительных ресурсов и специализированного программного обеспечения.

Метод конечных разностей (МКР) является одним из старейших численных методов решения дифференциальных уравнений механики сплошной среды. Он основан на разложении расчетной области на сетку и аппроксимации производных через разности. МКР хорошо подходит для моделирования линейных и нелинейных процессов во времени и пространстве, анализа динамики, распространения волн, развития деформаций и фильтрационных задач [108].

Подход особенно эффективен для задач с регулярной структурой и геометрией, позволяет быстро реализовать расчёты, что важно для анализа больших объёмов массивов, например, в задачах моделирования разработки залежей, распространения упругих, пластических и фильтрационных возмущений. Ограничением МКР является его сравнительная низкая способность к адаптации под сложные формы выработок и неоднородные условия, а также возможная неустойчивость при разбиении сетки.

Метод граничных элементов (МГЭ) основывается на представлении решаемой задачи в интегральной форме и аппроксимации только на границе расчетной области, а не во всем объёме массива. Такой подход сохраняет

преимущество высокой точности при малом объёме информации и существенно снижает вычислительные затраты при анализе областей, примыкающих к нескончаемым средам [87].

МГЭ особенно эффективен при решении задач с простыми или регулярными граничными условиями — анализ напряжений вокруг выработки, ствола, туннелей, лав по всему контуру, расчёты откосов в нескончаемых массивах, а также при проектировании конструкций в контактирующих средах. Недостатки связаны с ограниченными возможностями учета нелинейных, трещиноватых и гетерогенных областей — для подробного внутреннего анализа требуется либо сочетание с объёмными методами, либо гипотетическое упрощение структуры массива.

Метод материальной точки (ММТ) представляет собой комбинированную Lagrange–Euler технику, в которой свойства среды ассоциируются с системой материальных точек, каждая из которых перемещается и обменивается параметрами (напряжением, деформацией, скоростью, массой) на вспомогательной сетке. Подход особенно востребован для моделирования процессов больших и быстрых деформаций, разрушения, сдвигов, динамики контакта и изменений топологии среды (например, обвалов, динамического разрушения кровли, оползней) [96].

ММТ сочетает преимущества частичных и сплошных моделей, позволяет по-новому анализировать нелинейные переходные процессы, потери устойчивости при динамических и циклических воздействиях, а также процессы с меняющейся геометрией контактов. Практическая реализация метода требует высокой вычислительной мощности и грамотного выбора алгоритмов передачи параметров между точками и сеткой.

В таблице 1.6 собраны основные задачи, решаемые с помощью представленных методов.

Таблица 1.6 - Методы численного моделирования (составлено автором)

Метод	Задачи
Метод конечных элементов	Анализ сложных упругопластических задач, учёт деталей геометрии

Продолжение таблицы 1.6

Метод	Задачи
Метод дискретных элементов	Моделирование трещиноватых и блочных массивов, процессов разрушения
Метод конечных разностей	Задачи с регулярной геометрией, динамика, фильтрация
Метод граничных элементов	Оценка напряжений у границ и стволов, задач в нескончаемых средах
Метод материальной точки	Моделирование крупных деформаций, разрушения, контактов

1.7 Выводы по Главе 1

В результате проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

1. Проведен всесторонний анализ геомеханических процессов при проходке горных выработок в тектонически напряженных и геологически неоднородных массивах на примере Хибинского массива апатит-нефелиновых руд. Установлено, что сложная структура массива, наличие прослоек и даек, а также повышенное тектоническое напряжение создают условия для формирования зон концентрации напряжений и локализованного хрупкого разрушения, что существенно усложняет прогнозирование устойчивости выработок.

2. Характер геомеханических явлений проявляется в различных формах горного давления, среди которых динамические проявления — горные и микроудары — представляют наибольшую опасность для безопасности горных работ. Обоснованы стадии развития этих процессов, включающие накопление упругой энергии, достижение предельного НДС и разгрузку массива, что ведет к лавинообразному распространению разрушений в массиве.

3. Выявлено, что для адекватной оценки устойчивости горных выработок необходим комплексный подход, включающий натурные, аналитические и эмпирические методы. Натурные методы, использующие керноотбор, геофизические исследования и лазерное сканирование, обеспечивают достоверные оперативные данные о состоянии массива и динамике перераспределения напряжений.

4. Аналитические методы, основанные на классической механике сплошной среды и улучшенные критериями прочности Хюзка-Брауна с геологическим индексом качества (GSI), позволяют количественно оценивать пределы устойчивости массива, однако не всегда способны адекватно учитывать влияние сильной неоднородности и трещиноватости, требуя дальнейших доработок и адаптаций.

5. Эмпирические рейтинговые системы (RMR, Q-система) широко используются в инженерной практике для классификации качества массива и оценки устойчивости, однако их применение ограничено отсутствием учета динамического взаимодействия крепи и массива, особенно в зонах тектонических нарушений, что снижает точность прогноза и безопасность проектных решений.

6. Рассмотрены современные аналитические и численные методы прогнозирования размеров и развития зон хрупкого разрушения приконтурного массива. Методология базируется на теориях хрупкости и критерия прочности с учетом упрощений и модификаций, что расширяет возможности моделирования. Применение численных методов (МКЭ, МДЭ, МКР, МГЭ, ММТ) демонстрирует высокую эффективность моделирования сложных геомеханических процессов с учетом анизотропии, неоднородности и динамики контактов.

7. Обоснована необходимость интеграции различных методов — натурных наблюдений, аналитических моделей и численного моделирования — для комплексного прогнозирования геомеханического поведения массива с целью повышения достоверности прогноза устойчивости и безопасности ведения горных работ в условиях сложной геологической среды.

8. Подчеркивается важность разработки и внедрения адаптивных моделей и комплексных систем мониторинга, способных учитывать динамическую эволюцию структуры массива и взаимодействия между отдельными структурными элементами, что позволит снизить аварийность и повысить эффективность горной добычи в тектонически напряженных и неоднородных горных массивах.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИКОНТУРНОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

2.1 Горно-геологические условия

Крупнейший в мире Хибинский массив, расположенный в центральной части Кольского полуострова между озерами Имандра и Умбозеро, представляет собой округлый массив горных пород площадью около 1400 км² (рисунок 2.1) и линейным размером до 40 км.

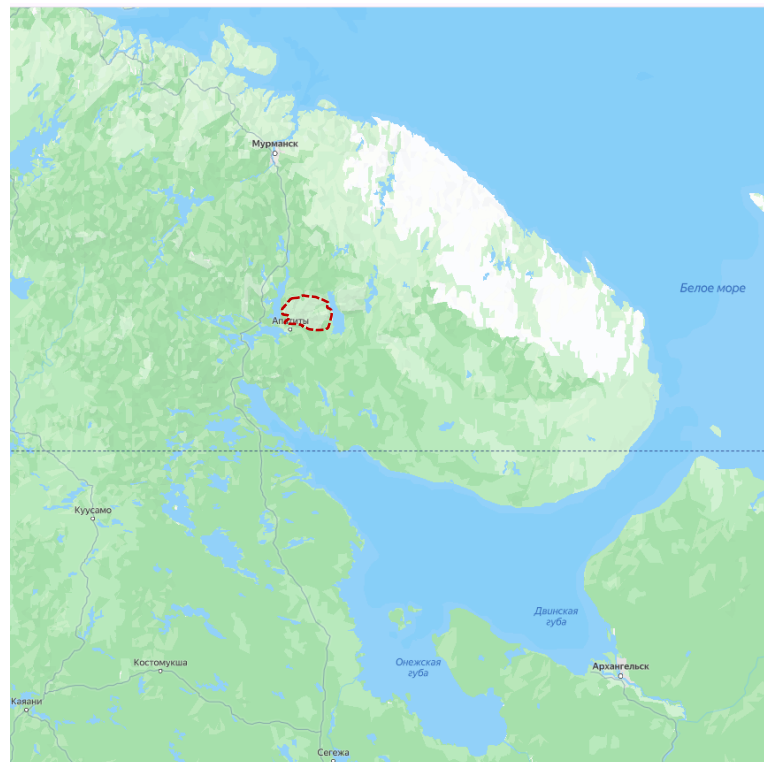


Рисунок 2.1 – Хибинский массив на карте Кольского полуострова
(составлено автором)

Хибинский массив изучался, начиная с конца XIX века многими исследователями с целью промышленного производства апатит-нефелинового концентрата [38].

Инженерно-геологические условия месторождений обусловлены геологическим и литологическим строением, тектоническими нарушениями, физико-механическими свойствами пород и напряженным состоянием массива.

Хибинский массив горных пород имеет блочное строение. Поле напряжений относится к тектоническим, в котором горизонтальные напряжения превышают вертикальные в несколько раз. Основные горные выработки пройдены в скальных породах, вмещающие породы характерны наличием литологических и геологических неоднородностей (даек и зон шпреуштейнизации).

Геологическая структура массива зональна. От периферии к центру следуют хибиниты, рисчорриты, йолит-уртиты, лявочорриты, фойяиты. В центральной части массива формируются апатит-нефелиновые руды.

Апатит-нефелиновые рудные тела имеют линзообразную форму от 25 до 300 м и протяженность до 3.2 км. Залегают они под углом от 20° в верхней части и с увеличением угла до 60° с глубиной.

Дайковый комплекс формировался на заключительных этапах становления месторождений и на данный момент насчитывает около 250 штук (рисунок 2.2). Они относятся к крутопадающим системам трещин ($65-90^\circ$) и прослеживаются до глубины 1000 м. Их мощность варьируется от первых сантиметров до 15 м, однако чаще до 3-5 м. Контакты с вмещающими породами четкие, извилистые, с апофизами и зонами брекчирования мощностью до 1 м.

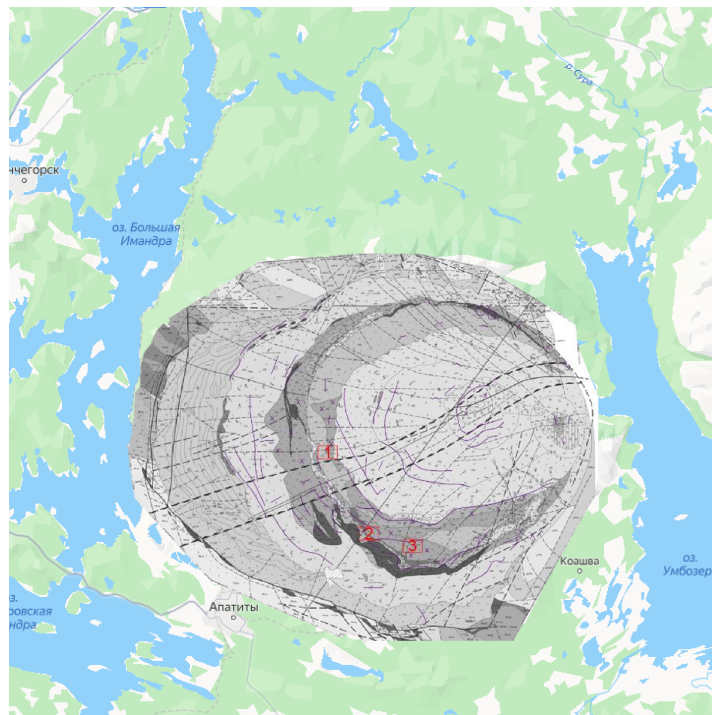


Рисунок 2.2 – Расположение месторождений Хибинского массива и основных геологических структур на карте [3]

По условиям залегания и формирования дайки можно разделить на 2 группы: главных интрузий и не связанные с интрузивными процессами.

Дайки первой группы в основном представлены перидотитами, пироксенами, мельтейгитами и йолитами, а также нефелиновыми сиенитами и составляют не более 15% от общего числа даек. Для них характерно размещение, контролируемое залеганием соответствующих интрузивных комплексов [1].

Дайки второй группы слагают породы, напрямую не связанные с процессом формирования интрузивных комплексов. К дайкам данной группы можно отнести около 180 даек, состоящих из щелочных габброидов, щелочных пикритов, оливиновых меланефелинитов, фонолитов и тингуаитов, а также нерасчлененных даек (рисунок 2.3) [1].

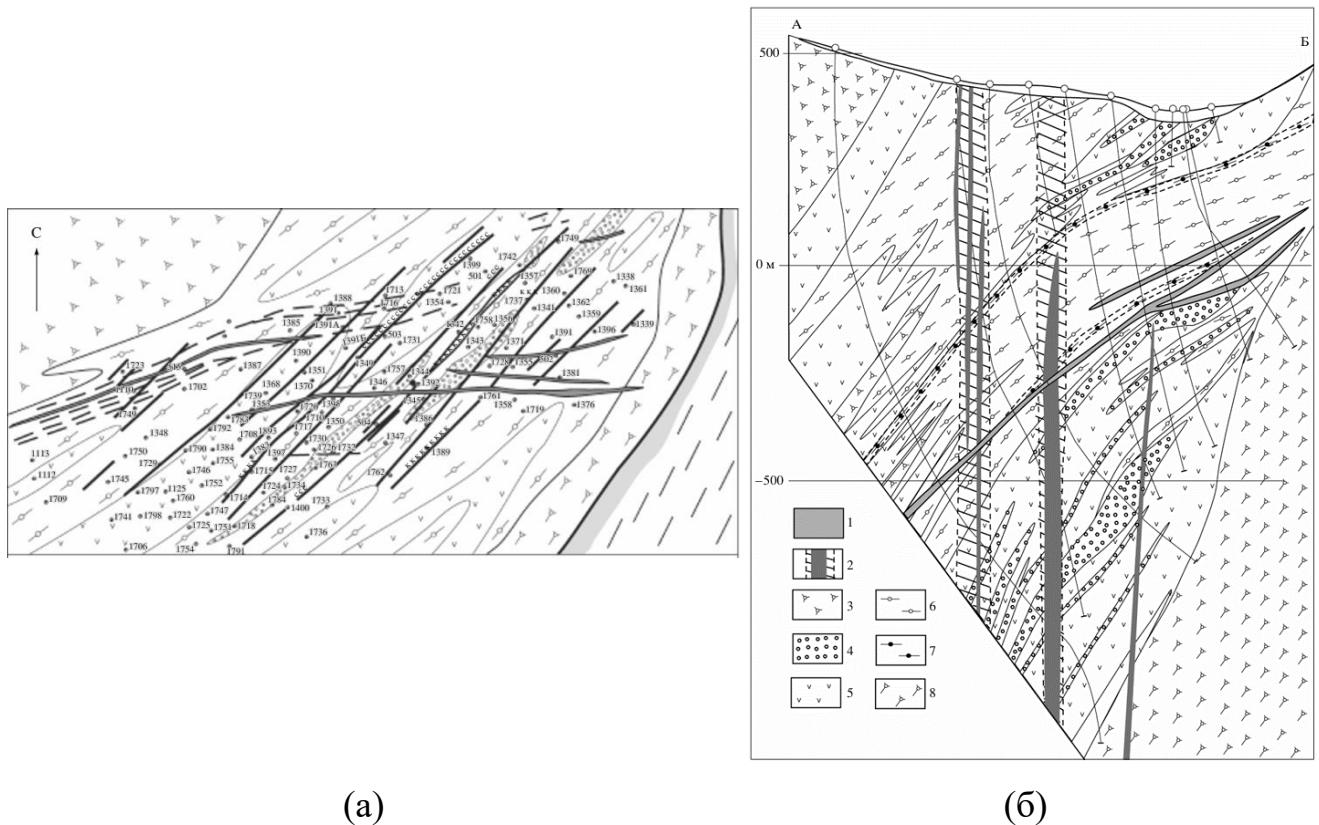


Рисунок 2.3 – Схематические план (а) и разрез (б) участков месторождений Хибинского массива [1]

Породный массив имеет блочное строение, что обуславливает наличие систем трещин. Тектоническое напряженное состояние, сформированное под влиянием неотектоники, характеризуется превышением горизонтальных компонент вертикальной (до 10 раз). Разность в физико-механических

характеристиках геологических неоднородностей и вмещающего массива приводит к неравномерному полю напряжений. Более высокоупругим породам соответствуют большие концентрации напряжений.

2.2 Натурные исследования механизма формирования горного давления на участках пересечения выработкой геологических неоднородностей

Проведен комплексный анализ данных по физико-механическим свойствам, условиям залегания даек и формам потери устойчивости для месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива.

Анализ натурных данных производился по карточкам горных ударов, картированию, а также маркшейдерским съемкам горных выработок (рисунок 2.4).

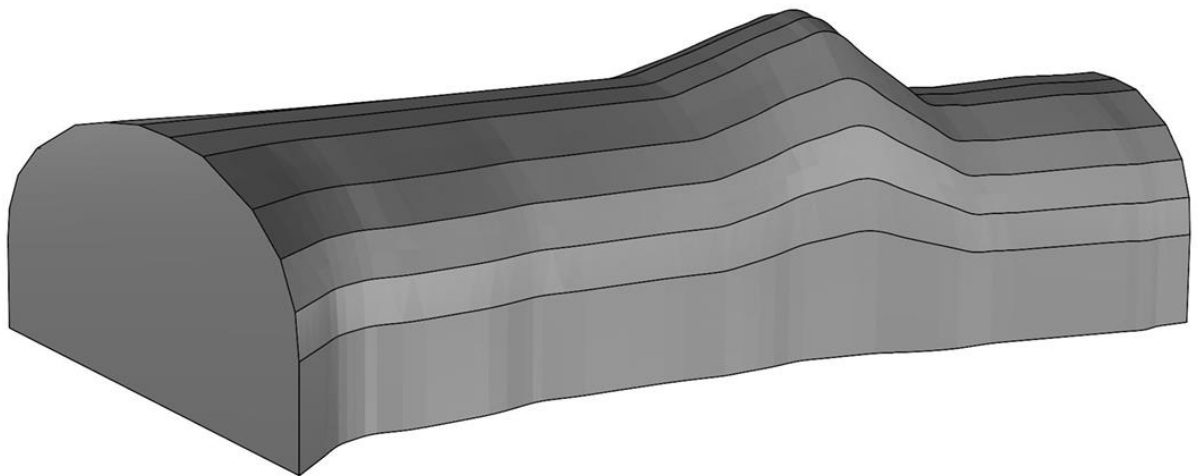


Рисунок 2.4 - Пример маркшейдерской съемки зоны хрупкого разрушения
(составлено автором)

Данные методы позволяют достаточно полно описать геомеханические и геодинамические процессы, проходящие в зоне влияния дайкового комплекса.

Для определения влияния даек на устойчивость горных выработок были определены следующие показатели: расположение горной выработки, её геометрические параметры (ширина, высота, форма выработки), а также геологические условия залегания (наличие неоднородности в сечении, её азимут и угол падения, литология заполнителя, физико-механические свойства неоднородности, массива).

Для оценки устойчивости горных выработок был систематизирован комплекс параметров, включающий их пространственное положение, напряжённо-деформированное состояние, размеры зон хрупкого разрушения, участки интенсивного проявления горного давления, назначение и категорию крепи, а также факторы, инициирующие проявления горного давления. Последующий анализ данных позволяет выявить доминирующие факторы и установить характерные формы его проявления.

При расположении выработки в геологически неоднородном массиве устойчивость незакрепленных горных выработок зависит в основном от параметров геологических неоднородностей. Как прочностные, так и геометрические показатели имеют значения.

Объектом наблюдений являлся приконтурный породный массив, состоящий из вмещающего массива и дайки, вокруг горизонтальной горной выработки. Для анализа визуальных наблюдений и определения напряжений на контуре выработок были пройдены несколько этапов (рисунок 2.5).

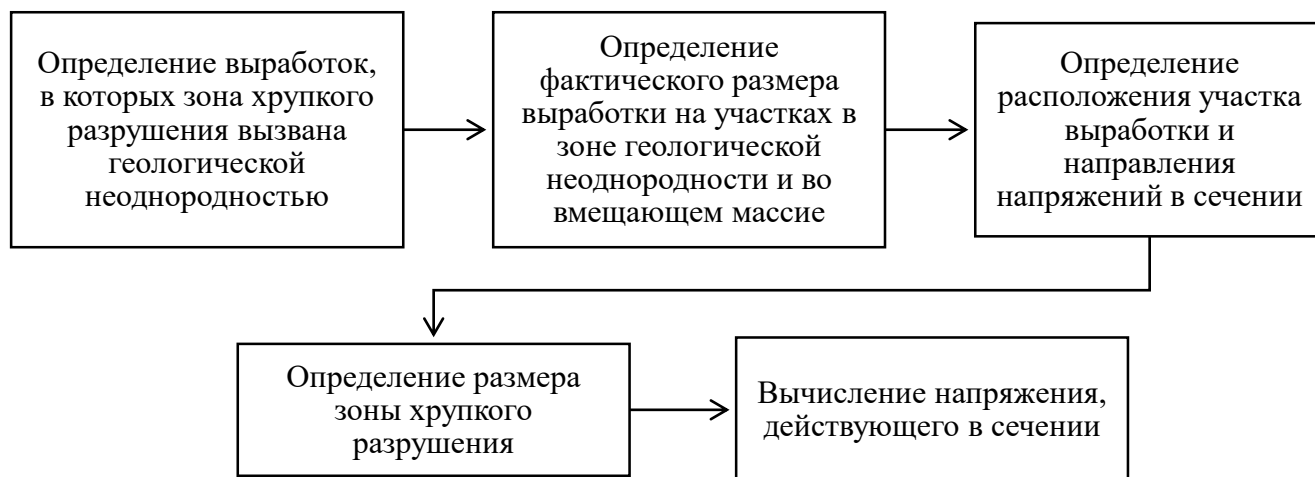


Рисунок 2.5 – Диаграмма определения напряженного состояния на контуре выработки (составлено автором)

Согласно данной методики были определены максимальные напряжения в плоскости сечения по формуле 2.1 [37]:

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

где $R_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии, МПа;

h – расстояние от центра выработки до верхней точки фактического контура выработки, м;

a – эквивалентный радиус выработки, который определяется по формуле 2.2, м:

$$a = 0.56 \cdot \sqrt{S_{np}} \quad (2.2)$$

где S_{np} – площадь сечения выработки в проходке, м².

По полученным натурным данным была получена представительная выборка сечений, в которых наблюдалось развитие зоны хрупкого разрушения для пород даек и вмещающего массива (Приложение В). По результатам были построены закономерности формирования зон при различных горно-геологических условиях (рисунок 2.6).

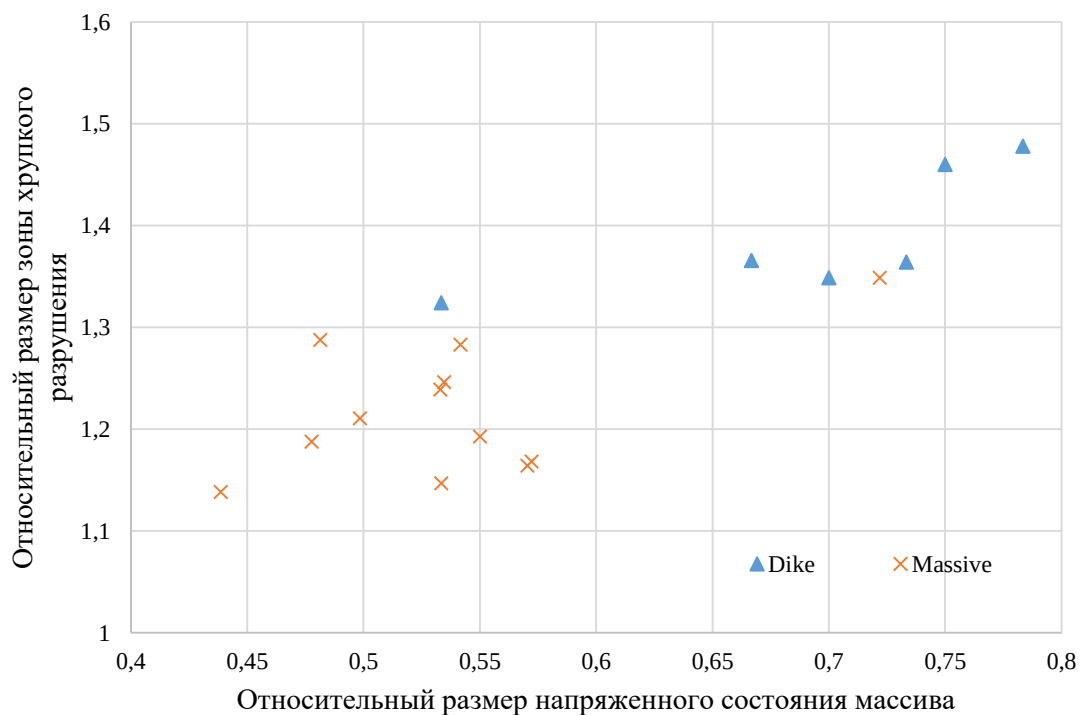


Рисунок 2.6 - Диаграмма закономерности влияния напряженного состояния массива на формирование зоны хрупкого разрушения [3]

Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что в сечениях, расположенных в зоне влияния дайки, напряжение увеличивается до 1.8 раз, а размер зоны хрупкого разрушения до 1.22 раза.

2.3 Результаты определения физико-механических свойств массива

Физико-механические свойства горных пород были исследованы ведущими лабораториями нашей страны: ВНИМИ, КНЦ РАН, Санкт-Петербургским горным университетом [18,27,86]. Физико-механические свойства массива изучались для различных литотипов Хибинских апатит-нефелиновых месторождений и были сведены в единый «Кадастр горных пород». В горно-геологической практике применяется местная классификация апатит-нефелиновых руд, основанная на различии текстур и особенностях состава. В таблице 2.1 приведены основные литотипы пород Хибинского массива апатит-нефелиновых руд.

Физико-механические свойства пород Хибинского массива являются хорошо изученными. Прочностные и деформационные параметры литотипов являются высокими, из чего следует, что в условиях Хибинских месторождений данные породы склонны к хрупкому разрушению.

Диапазон изменения характеристик пород достаточно высок, так прочностные характеристики отличаются между собой в среднем до 2.5 раз. Полученные результаты исследований физико-механических свойств можно использовать как исходные данные для дальнейшего численного моделирования.

Таблица 2.1 - Группы литотипов Хибинского массива (составлено автором)

№ литотипа	Наименование пород	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, °	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, ГПа
1	Уртиты	$\frac{51.9-180}{145.1}$	$\frac{5.09-18.8}{10.2}$	32	49.15	$\frac{0.09-0.3}{0.2}$	$\frac{18.5-92}{55.54}$
2	Рисчориты	$\frac{132.2-251.1}{199.9}$	$\frac{9-23.68}{14.74}$	43.9	47.5	$\frac{0.17-0.21}{0.19}$	$\frac{27.47-94.9}{64.08}$
3	Ийолиты	$\frac{166.9-200}{185.5}$	$\frac{13.55-9.43}{10.98}$	35.8	55.8	$\frac{0.07-0.11}{0.08}$	$\frac{63.15-77.81}{68.2}$
4	Апатит-нефелиновые руды	$\frac{50.8-162}{111.1}$	$\frac{3.05-10.8}{6.23}$	27.34	48.8	$\frac{0.08-0.19}{0.13}$	$\frac{40.3-86.04}{53.72}$
5	Сфен-апатитовые руды	$\frac{85.5-157.2}{119.2}$	$\frac{6.78-12.38}{8.84}$	24.7	52.1	$\frac{0.07-0.15}{0.11}$	$\frac{42.06-82.34}{58.2}$
6	Дайки	$\frac{237.9-285.5}{270.6}$	$\frac{18.28-25.31}{21.74}$	60.2	41.1	$\frac{0.17-0.24}{0.2}$	$\frac{53.78-71.97}{64.58}$
7	Зоны окисленных пород	$\frac{103.4-190.5}{152.2}$	$\frac{0.98-2.68}{1.82}$	9.8	32.9	$\frac{0.08-0.17}{0.13}$	$\frac{48.26-79.48}{60.3}$

2.4 Результаты исследования форм потери устойчивости горных выработок

Хибинский массив апатит-нефелиновых руд относится к тектонически напряженным массивам, что обуславливает наличие горизонтальных компонент напряжений, которые превышают вертикальные в несколько раз. Данные условия приводят к развитию систем трещин и в последствии потери устойчивости горных выработок.

Для анализа форм потери устойчивости горных выработок были использованы данные, представленные в предыдущих разделах, а также карточки горных ударов. Эти данные являются одним из способов фиксации и оценки проявлений горного давления. С их помощью можно оценить НДС, геологические условия и состояние выработки.

Целью наблюдений являлось установление характера проявления горного давления вокруг горных выработок, пройденных в рудном массиве с наличием литологических разностей.

Объектом исследования являлись признаки проявления горного давления, произошедшие в период сооружения и эксплуатации горных выработок (рисунок 2.7). На данных фрагментах планов изображены зафиксированные случаи, в которых дайки являлись причиной перераспределения напряжений.

а) отметка +263, блок 7/12, 113 БДШ в интервале (2-26) м от 18 ВТО на юго-восток максимум разрушений располагался по юго-западной пяте, в интервале (26-42) максимум разрушений сместился на кровлю и при дальнейшей проходке была подсечена дайка мончикитовых пород.

б) отметка +211, блок 7/10, 2/7 МБО в интервале (17-72) м от 21 МХШ на северо-восток были признаки проявления горного давления в виде динамического заколообразования по кровле. В интервале (72-91) м была подсечена дайка мончикитовых пород, после выхода их нее, признаки проявления горного давления не наблюдались.

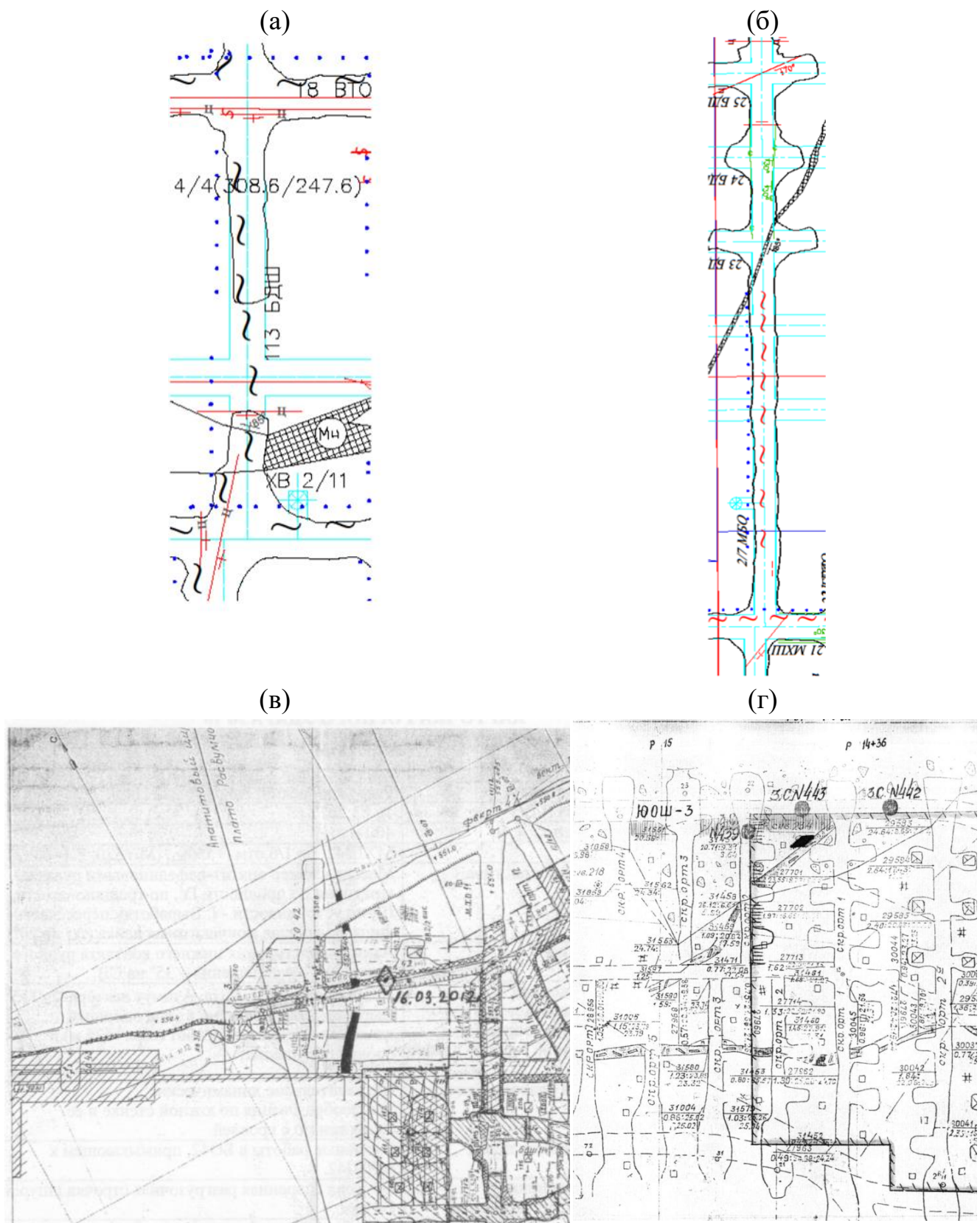


Рисунок 2.7 - Участки планов горизонтов рудников Хибинского месторождения
(составлено автором)

в) микроудар. Отметка +550, блок 1/6, выброс горной массы по сопряжению южной стенки с кровлей на участке протяженностью 10 м суммарным объемом

около 15 м³. Форма кусков породы преимущественно изометричные, обусловленные геологическим трещинам, но отмечаются и характерные для динамического заколообразования (зона отжима). Выброс горной массы произошел в результате незначительной подвижки по мончекитовой дайке, в высоко напряженном массиве, расположенном в зоне опорного давления от границы отбойки по отметке +575м и бровки обрушения покрывающих пород, спровоцированной взрывными работами, проведенными по БО 42.

г) толчок. Горизонт +470, блок 14/19, в следствие подвижки массива по лувритовой жиле мощностью 1 м в сторону очистного пространства был отмечен толчок, последствием которого стало интенсивное разрушение межскважинных целиков по разгрузочной строчке и вывал породы из кровли ЮОШ-3 объемом 2м³, выброс породы по скреперному орту 1 в районе пары пальцевых воронок в объеме 1.5 м³.

Месторождения Хибинского массива являются высоконапряженными и относятся к склонным по горным ударам. Это означает, что породы, слагающие массив и рудные тела, обладают большой прочностью и жесткостью, склонны к динамическим формам разрушения, а напряжения, накопленные в них, достаточны для их разрушения в хрупкой форме при определённых условиях.

Хрупкое разрушение может происходить как при непосредственном ведении горных работ с мгновенным развитием трещин, так и развиваться в течении определенного времени.

Идентификация основных видов проявления горного давления выполнена на основе данных, представленных в карточках горных ударов Кировского и Расвумчоррского рудников (рисунок 2.8). Проведенный анализ позволил систематизировать причины и предвестники микроударов, горных и горно-тектонических ударов, а также техногенных землетрясений, произошедших на рудниках с 1981 года.

На основе данных можно увидеть, что наиболее опасные по удароопасности являются отрабатываемые участки на горизонте +170 м, а также горизонте +320 м. Основным фактором проявления горного давления на горизонте +170 м является

наличие поля тектонических напряжений вблизи очистных работ. На горизонте +320 м, основными триггерами являются как литологические и сейсмические факторы, так и очистные работы.

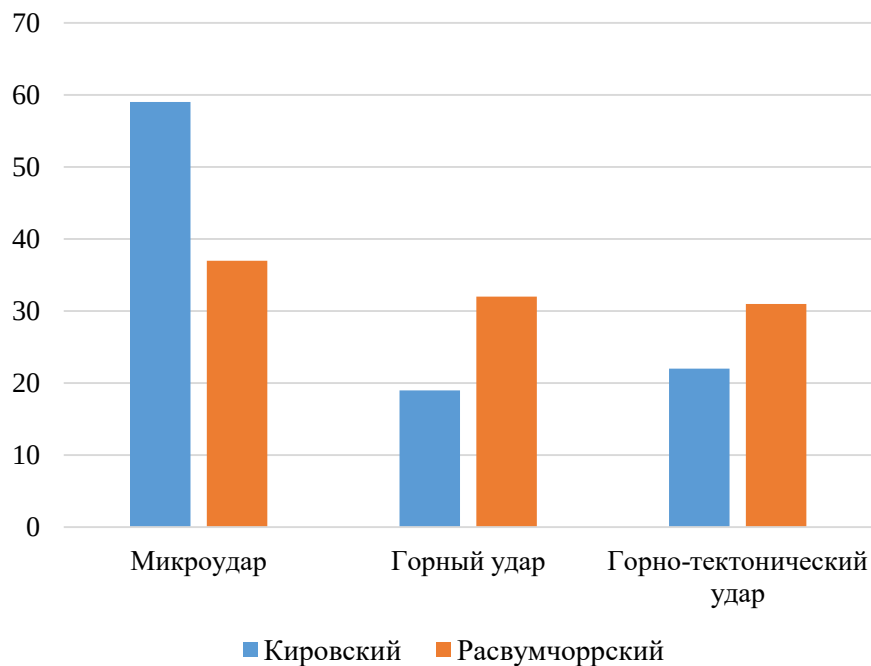


Рисунок 2.8 - Соотношение произошедших проявлений горного давления на рудниках Хибинского массива (составлено автором)

Нанесенный ущерб от проявлений горного давления зависит от степени потери устойчивости горных выработок.

В таблице 2.2 изображены группы факторов, встречающихся на рудниках апатит-нефелиновых месторождений и те события, которые они вызывают.

Таблица 2.2 - Факторы возникновения проявления горного давления (составлено автором)

Проявление горного удара	НДС	Геологическое и литологическое строение	Опорное давление	Буровзрывные работы
Микроудар	31%	22%	37%	10%
Горный удар	21%	33%	33%	13%
Горно-тектонический удар	33%	52%	Нет данных	15%

Микроударом называется проявление горного давления в динамической форме, сопровождающиеся хрупким разрушением пород, сопровождающееся звуковой, а также сейсмической энергией воздействия, но не требующая остановки

технологического процесса. Однако микроудары сопровождаются нарушением целостности крепления и вывалами породы, что приводит к дополнительной энергозатратности производства. На рисунке 2.9 отражен анализ возникновения микроударов.

Причиной проявления **горных ударов** могут стать различные факторы, например, напряженное состояние массива, геологическое строение, очистные работы и т.п. (рисунок 2.10).

Глубина разработки так же является одним из факторов устойчивости, так как на глубоких горизонтах проявление тектонических напряжений становится еще более явным и может превышать вертикальные в десятки раз.

Еще одним фактором является наличие структурно-текстурных элементов, к которым можно отнести как трещиноватость, так и различные включения. Наличие трещин приводит к ослаблению прочностных свойств массива, а наличие пропластков и единичных включений воздействует на массив в зависимости от их свойств. Также влияют контакты пород.

На сегодня проведено достаточное количество экспериментальных исследований, обосновывающих гетерогенность массива горных пород, расположенных на разной глубине. В них отражается геодинамический риск проявлений горного давления.

Увеличение событий, связанных с сейсмической активностью, связано с влиянием тектонических, горно-геологических и техногенных факторов. Так участки массива, являющиеся наиболее изрезанными с наличием тектонической нарушенностью являются наиболее чувствительными к проявлению горного давления.

При анализе карточек горных ударов было принято решение об объединении понятий **горно-тектонический удар** и **техногенное землетрясение**, в связи близкими по энергетическому происхождению причинам (рисунок 2.11). Горно-тектоническим ударом считается проявление горного давления, возникшее в результате отработки месторождения, сопровождающееся выделением сейсмической энергии и влияющее на несколько участков отработки массива.

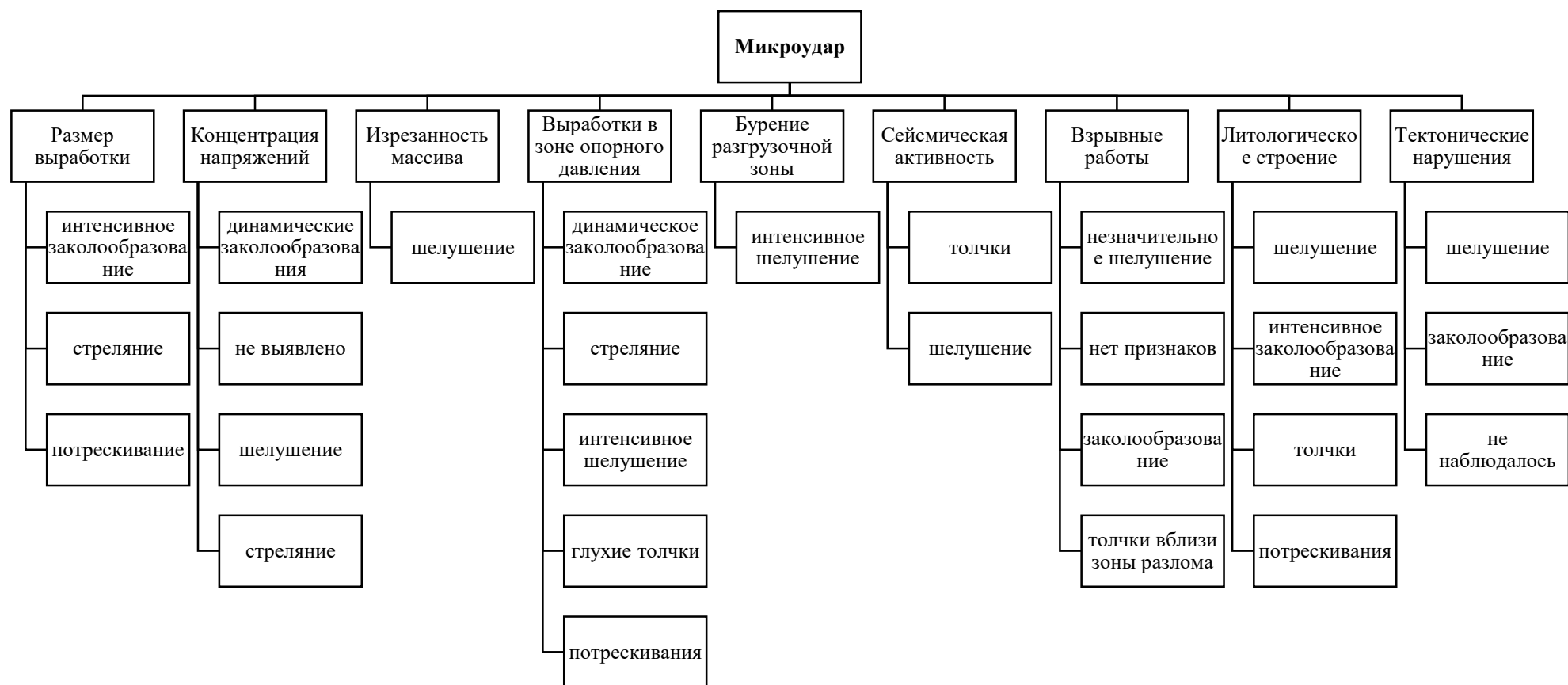


Рисунок 2.9 – Причины и предпосылки возникновения микроударов на рудниках Хибинского массива
(составлено автором)

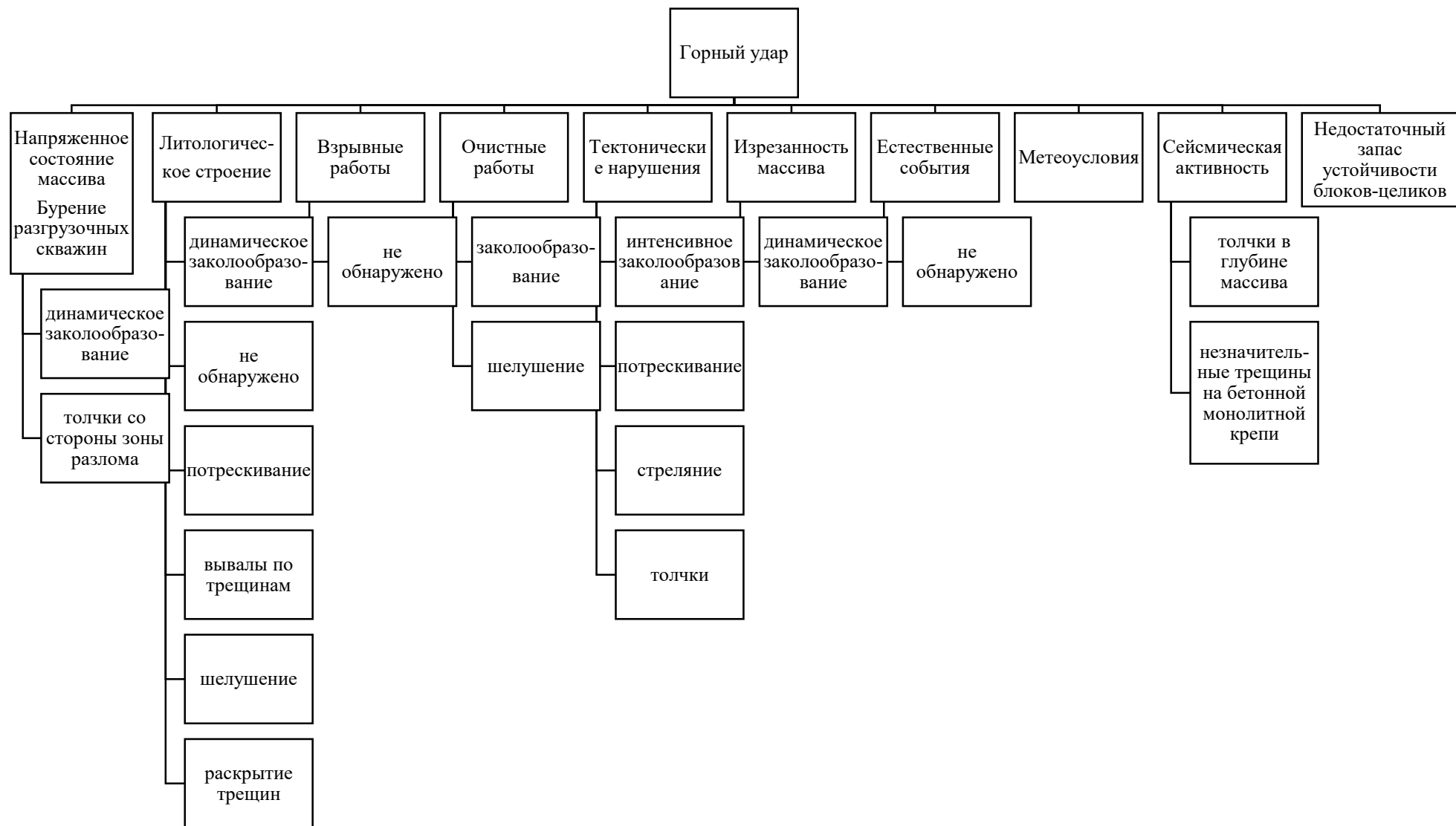


Рисунок 2.10 – Причины и предпосылки возникновения горных ударов на рудниках Хибинского массива
(составлено автором)

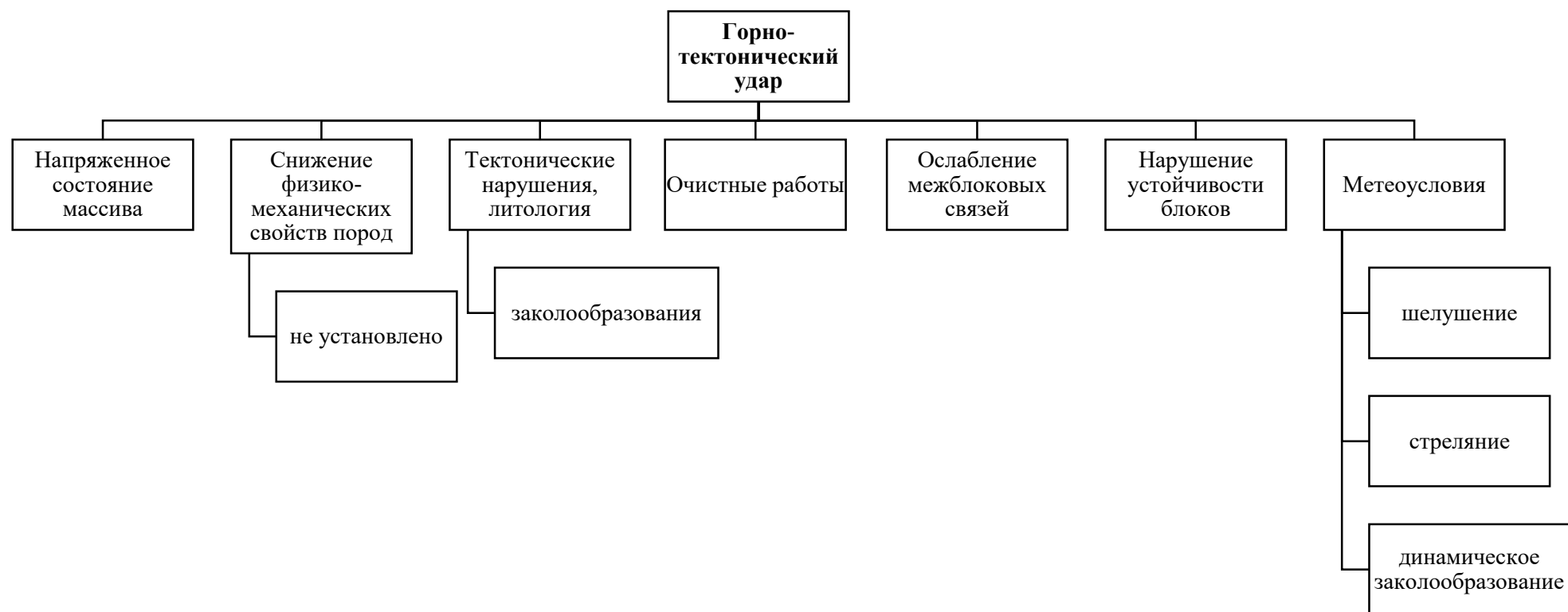


Рисунок 2.11– Причины и предпосылки возникновения горно-тектонических на рудниках Хибинского массива
(составлено автором)

Фундаментальной причиной возникновения горно-тектонических ударов является высокий уровень тектонических напряжений, а также блочная структура массива. Геологическое строение массива формирует неравномерное НДС массива с естественными концентраторами напряжений. Локальные тектонические структуры находятся в состоянии предельного равновесия, однако триггерным механизмом, приводящим к динамическому проявлению, является разработка месторождений. Техногенная деятельность способствует лавинообразному формированию зон хрупкого разрушения в перенапряженном массиве и высвобождению значительного объема энергии за короткий промежуток времени, который характеризуется динамическим разрушением. В результате наблюдений за выработками было выявлено процентное соотношение основных причин проявления горного давления на рудниках апатит-нефелиновых месторождений (рисунок 2.12-2.13).

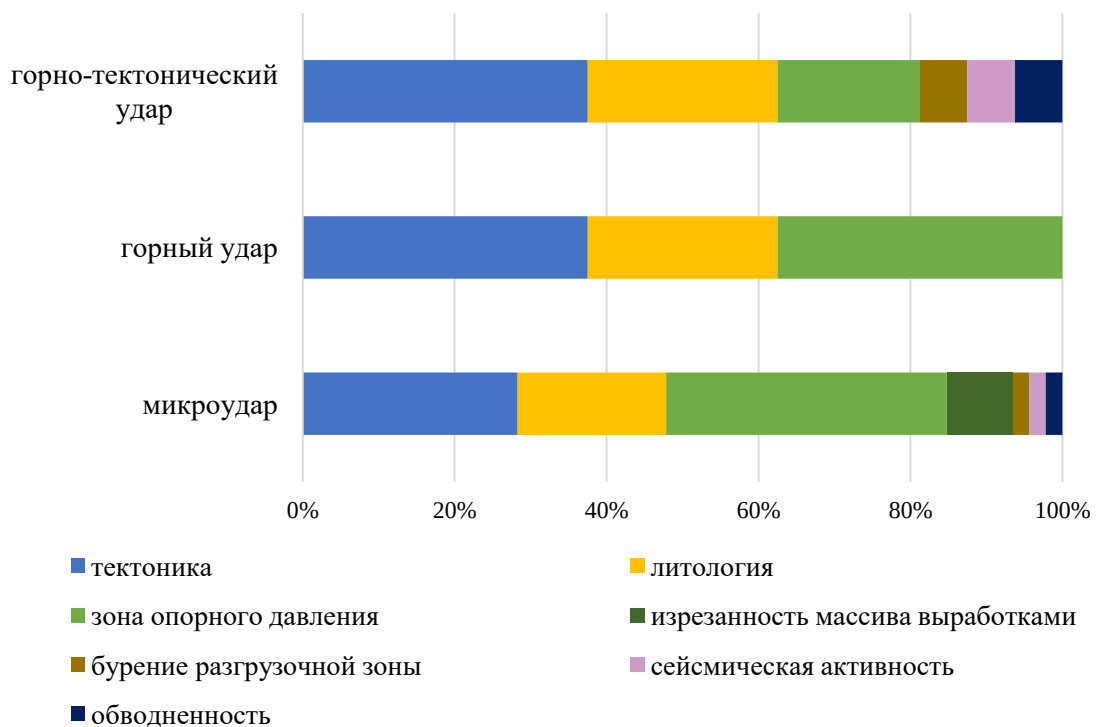


Рисунок 2.12 – Причины возникновения проявлений горного давления на Кировском руднике (составлено автором)

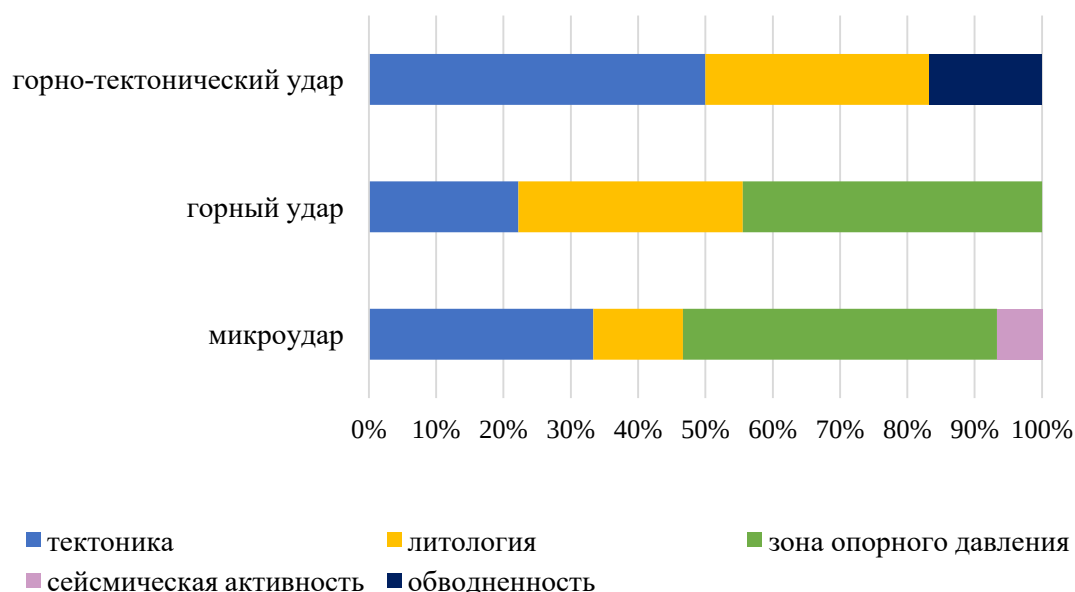


Рисунок 2.13 – Причины возникновения проявлений горного давления на Расвумчоррском руднике (составлено автором)

Однако требуется отдельно выделить комбинированный фактор, так как зачастую причиной проявления горного давления является не один, а сразу несколько факторов. В таблице 2.3 рассмотрены распространенные комбинации основных факторов потери устойчивости горных выработок.

Таблица 2.3 - Вероятность возникновения проявлений горного давления при комбинации факторов (составлено автором)

	НДС	Геологическое и литологическое строение	Опорное давление	Буровзрывные работы
НДС	29%	17%	10%	4%
Геологическое и литологическое строение	17%	32%	12%	6%
Опорное давление	10%	12%	28%	5%
Буровзрывные работы	4%	6%	5%	11%

Таким образом, можно заметить, что наиболее распространенное сочетание факторов, приводящим к проявлениям горного давления являются геологическое строение совместно изменением НДС.

2.5 Разработка методики построения численных моделей прогноза геомеханических процессов на участках горизонтальных горных выработок сложного геологического строения

Для достоверного описания геомеханических процессов, происходящих при пересечении дайки, численная модель должна объективно описывать как геометрию модели, так и механические и деформационные свойства массива горных пород (рисунок 2.14).

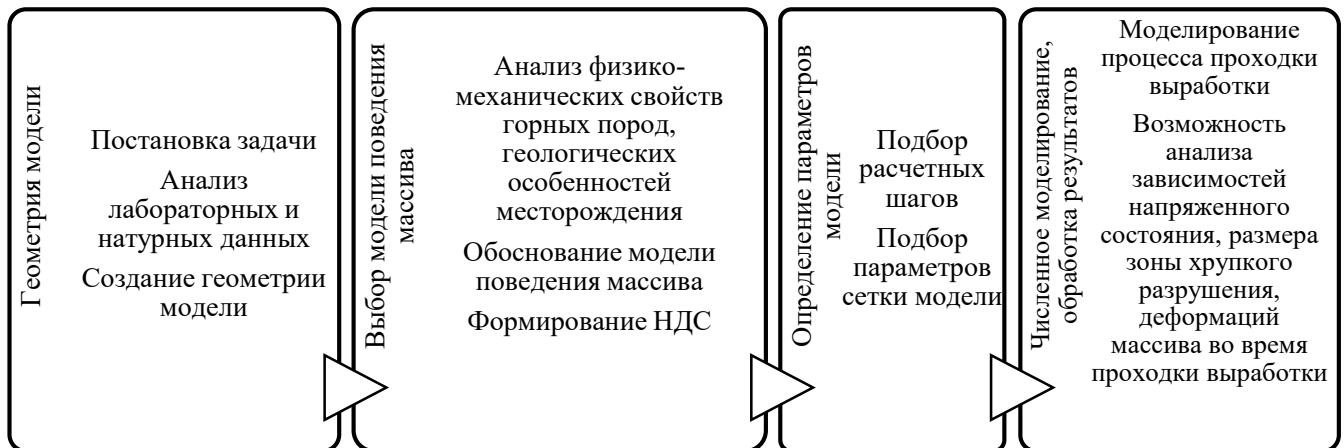


Рисунок 2.14 - Требуемые этапы создания модели (составлено автором)

При создании модели, подбирается участок горной выработки, осложненный наличием геологической неоднородности. Размер модели подбирается таким образом, чтобы граничные условия не влияли на результаты моделирования.

Массив и дайка представляются в явном виде и рассматриваются как сплошные деформируемые тела. Для описания их механического поведения массива горных пород выбрана модель Кулона-Мора, запредельная стадия которой задается с помощью функциональной зависимости и подробно рассмотренная в главе 3.

2.6 Выводы по Главе 2

1. Исследование горно-геологических условий Хибинского массива подтвердило сложное литологическое и тектонически напряженное строение массива, при котором горизонтальные компоненты напряжений многократно превышают вертикальные. Такая особенность формирует высокую степень

неоднородности и способствует развитию концентрированных зон напряжений в пределах приконтурного массива.

2. Натурные исследования с использованием анализа карточек горных ударов, маркшейдерских съемок и картирования геологических неоднородностей выявили важную роль дайкового комплекса в формировании зон локального усиления напряженного состояния и хрупкого разрушения. Параметры геометрии выработок и расположение неоднородностей оказывают значимое влияние на размер и интенсивность зон потери устойчивости.

3. Количественный анализ натурных данных продемонстрировал, что в сечениях, пересекающих дайки, напряжение возрастает в среднем в 2-3 раза, а размер зон хрупкого разрушения увеличивается, что требует разработки специализированных инженерных решений, адаптированных к таким геологическим условиям.

4. Изучение физико-механических характеристик пород различных литотипов показало широкий диапазон прочностных и упругих свойств, при этом дайки обладают повышенными показателями прочности и жесткости, что вносит дополнительную гетерогенность в НДС массива.

5. Анализ форм проявления горного давления выявил преобладание микроударов и горных ударов, вызванных комплексным воздействием литологических, тектонических и технологических факторов. Значимую роль играют технологические процессы, в особенности взрывные и очистные работы, влияющие на перераспределение напряжений.

6. Выявлено, что проявления горного давления чаще всего вызываются совокупностью факторов, включающих тектонические нарушения, литологическую неоднородность, влияние опорного давления и динамическую нагрузку, что подтверждает необходимость комплексного подхода к прогнозированию и обеспечению устойчивости.

7. Разработана методика построения численных моделей, адекватно отражающих геометрию выработок, влияние геологических неоднородностей и физико-механические свойства массива с использованием критерия Кулона-Мора.

Это обеспечивает надежный прогноз напряженного состояния и динамики зон хрупкого разрушения, что является основой для разработки эффективных способов обеспечения устойчивости.

8. Результаты исследований и разработанная методология формируют основу для практического обоснования проектных решений, направленных на повышение устойчивости горных выработок в тектонически напряженных и геологически сложных массивах, что соответствует цели и задачам диссертации.

ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ УЧАСТКОВ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ДАЕК

В данной главе рассмотрены подходы к моделированию развития геомеханических процессов в окрестности горизонтальных горных выработок, расположенных в зоне влияния даек.

Оценка НДС, а также формирования зоны хрупкого разрушения в зоне влияния дайки является сложной комплексной геомеханической задачей. Исследование параметров устойчивости горной выработки, пересекающей дайку, а также развитие зоны хрупкого разрушения и других факторов: геометрических параметров залегания, мощности дайки, отношения физико-механических свойств дайки и массива, изменения тектонических параметров напряжений необходимо учитывать с помощью численных методов моделирования.

Проанализировав натурные данные, было установлено, что пересечение выработкой прослойки более прочных пород приводит к формированию проявлениям горного давления как в динамической форме, так и в форме вывалов.

В общем случае порядок моделирования массива горных пород, имеющего в своем составе дайку, следующий: на основании натурных данных построена геологическая модель; определены возможные ориентации дайки, граничные условия модели, подобраны параметры модели согласно лабораторным испытаниям.

3.1 Обоснование параметров численных моделей для прогноза развития зоны хрупкого разрушения

Исследование развития геомеханических процессов при проходке выработки и пересечении геологических неоднородностей производилось на основании конечно-элементных моделей в программном комплексе Abaqus CAE. Геометрия численной модели в общем случае представляла собой массив горных пород с геологической неоднородностью, представленной в явном виде, а также дайкой, пройденной через неоднородный массив (рисунок 3.1). Для решения поставленной задачи массив может быть представлен сплошной средой.

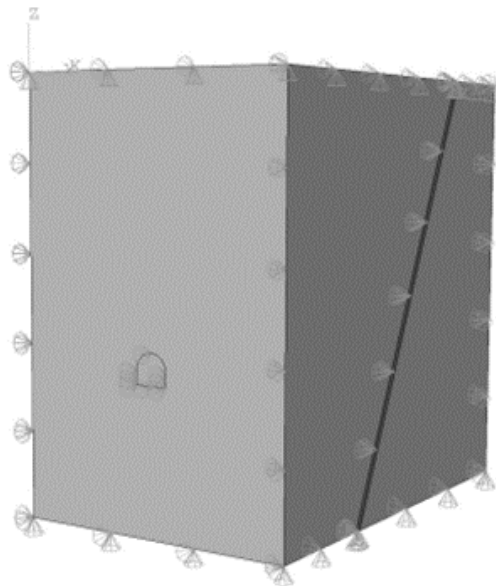


Рисунок 3.1 – Геометрия численной модели [20]

Размер модели составлял 80 м по каждой грани, что позволяет исключить влияние граничных условий на исследуемый объект (более 4В). На гранях модели запрещены перемещения по осям, перпендикулярным граням модели. Геологическая неоднородность пересекает ось выработки в середине модели. Мощность дайки изменялась в пределах от 0.1В до 2В, диапазон значений был обоснован при анализе геологических условий месторождения. Дайка располагалась по одной из трех осей вращения, а угол наклона изменялся от 0 до 90° с шагом 15°.

Для математического описания поведения массива горных пород была использована модель Кулона-Мора, основанная на условии пластичности. В общем виде условие пластичности определяется как изменение угла внутреннего трения, сцепления и угла дилатации, изменяющихся при достижении деформаций.

Для условия Хибинского массива хорошую сходимость показали законы разупрочнения (формулы 3.1 и 3.2), предложенные Renami H.R. и Martin C.D. [90]:

$$c_{mob} = c_r + (c_i - c_r) \left[2 - \frac{2}{1 + \exp \left(-5 \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} \right)} \right] \quad (3.1)$$

$$\varphi_{mob} = \varphi_i + (\varphi_r - \varphi_i) \left[\frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p^r}\right)} - 1 \right] \quad (3.2)$$

где c_i – начальное значение сцепления, МПа;

c_r – остаточная величина сцепления, МПа;

ε_p – эквивалентные пластические деформации;

ε_p^r – эквивалентные пластические деформации на момент достижения остаточной прочности;

φ_i – начальное значение угла внутреннего трения, °;

φ_r – остаточная величина угла внутреннего трения на момент разрушения всех цементационных связей, °.

В исследуемых моделях физико-механические характеристики определялись с учетом запредельной зоны деформирования, с целью определения изменения параметров сцепления и угла внутреннего трения (таблица 3.1, рисунок 3.2).

Таблица 3.1 - Параметры физико-механических свойств горных пород [59]

Параметр горной породы	Единица измерения	Вмещающий массив	Дайка
Модуль деформации, E	ГПа	10	70
Коэффициент Пуассона, ν	-	0.23	0.23
Прочность породы, σ	МПа	120	300
Начальные параметры сцепления, c_i	МПа	29.5	47.2
Остаточное сцепление, c_r	МПа	1.2	2.06
Начальный угол внутреннего трения, φ_i	°	8.8	12.7
Остаточный угол внутреннего трения, φ_r	°	44.8	64.2

Начальное напряженное состояние принято таким образом, что минимальное главное напряжение – вертикальное, а максимальное главное напряжение направлено перпендикулярно проходке горной выработки.

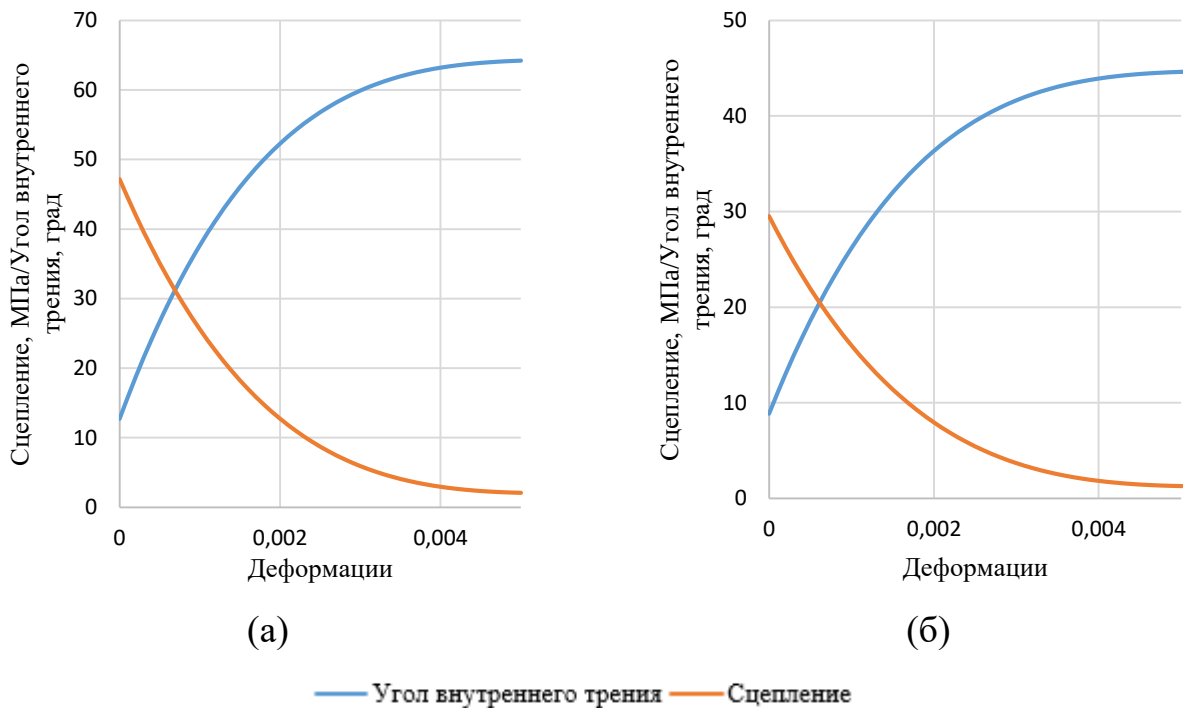


Рисунок 3.2 - Параметры сцепления и угла внутреннего трения [59]

Тектоническое поле напряжений принималось на основании «Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам» [37] (рисунок 3.3).

Для прогноза устойчивости горной выработки с помощью численного моделирования необходимо правильно определить модель механического поведения массива под нагрузкой. В данном исследовании механическое поведение задается с помощью критерия прочности Кулона-Мора, для обоснования зоны формирования области хрупкого разрушения. В ходе обработки натурных данных, были получены представительные выборки данных о зонах хрупкого разрушения на участках одиночных горных выработок, пересекающих дайки (рисунок 3.4).

Для оценки корректности моделирования зон хрупкого разрушения были проанализированы модели, в которых дайки были заданы в явном виде. По результатам анализа было выявлено, что модель показывает хорошую сходимость с натурными данными.

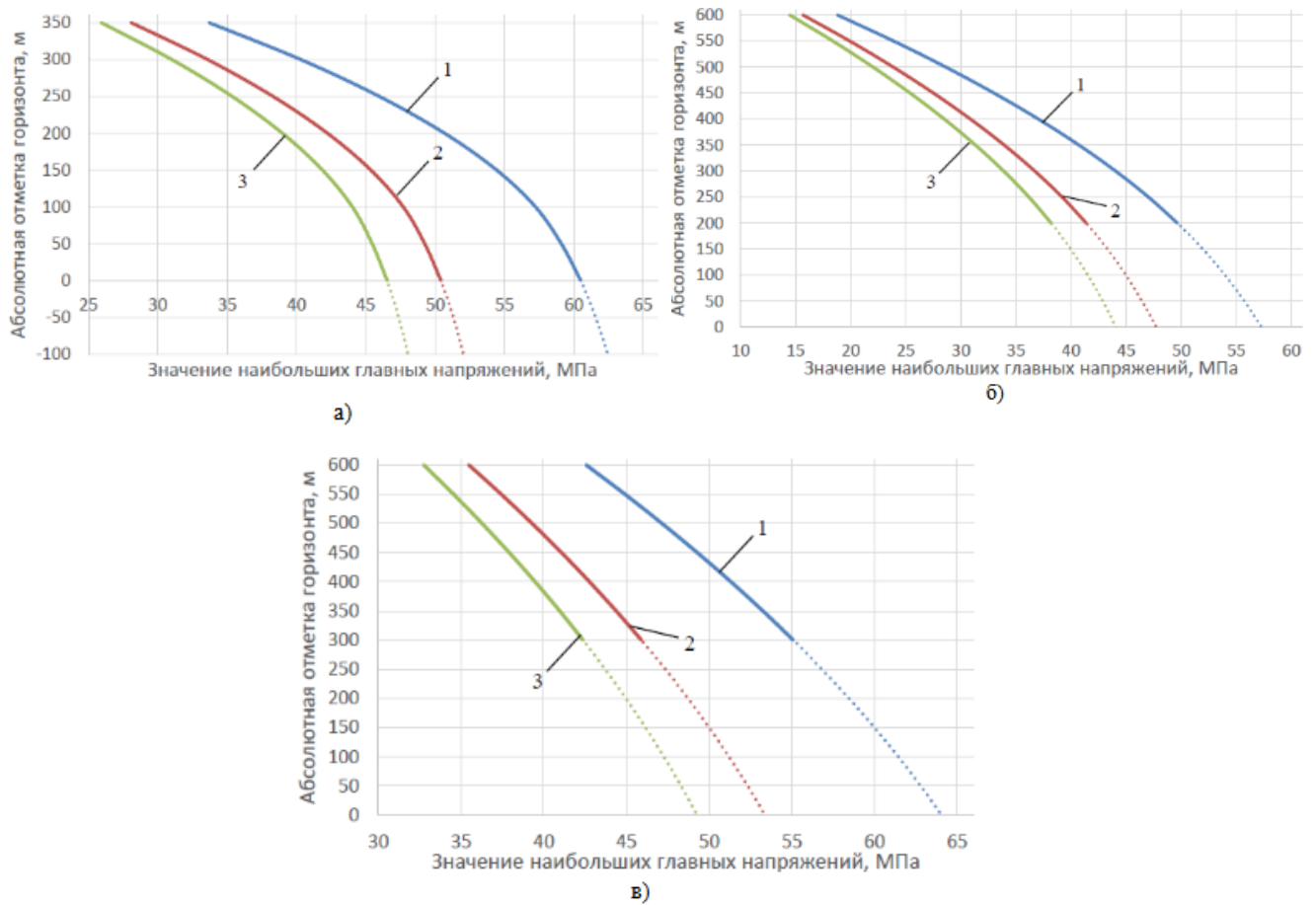


Рисунок 3.3 - Изменение тектонических напряжений во вмещающем массиве с глубиной на (а) Кукисвумчоррском, (б) Юкспорском, (в) месторождении Плато Расвумчорр и Апатитовый Цирк [37]

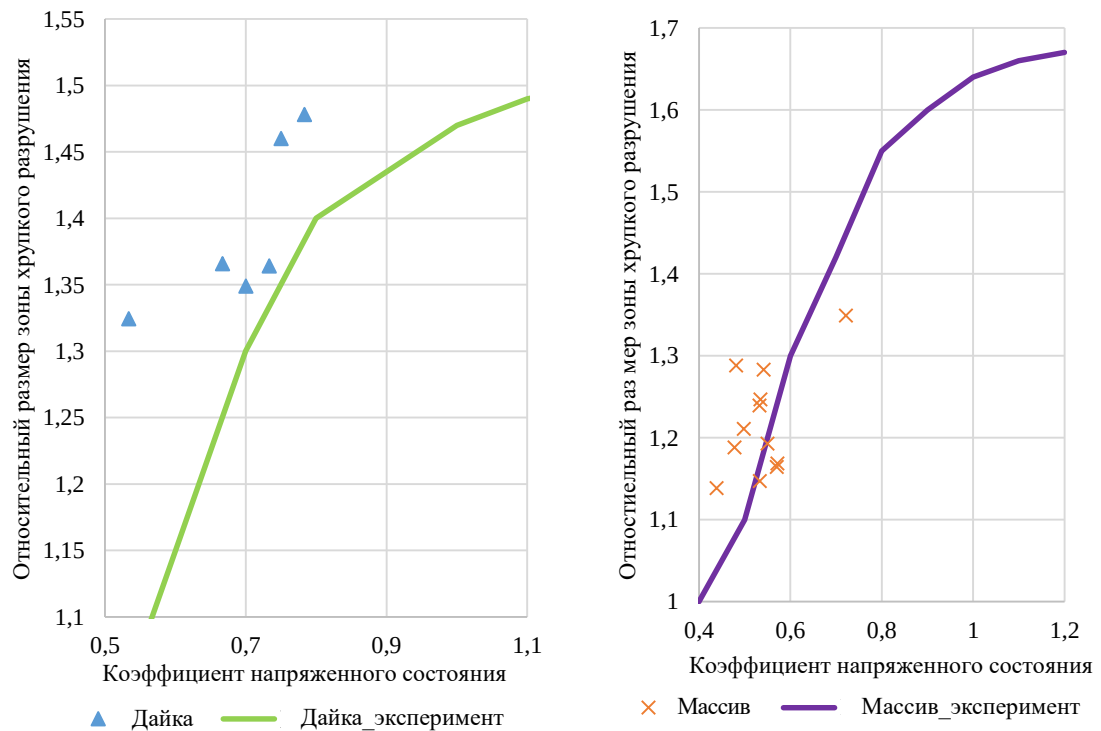


Рисунок 3.4 - График зависимости размеров хрупкого разрушения от напряженного состояния на контуре выработки [59]

Одним из основных факторов обеспечения устойчивости горной выработки является направление пересечения геологических неоднородностей. С этой целью было проведено численное моделирование геомеханических процессов, проходящих при проходке горных выработок. Оценка относительного размера зоны хрупкого разрушения проводилась при вариации направления пересечения, а также угла наклона дайки от 0 до 90° с шагом 15° , где 0 соответствовал горизонтальному расположению дайки, а 90° – вертикальному.

Согласно полученным ранее данным дайка является концентратором напряжений, что приводит к формированию зоны хрупкого разрушения в ее непосредственной близости. При проведении численного моделирования было принято, что дайка изменяет своё положение вокруг трех плоскостей, имеющих наибольшее влияние на формирование зоны хрупкого разрушения (рисунок 3.5).

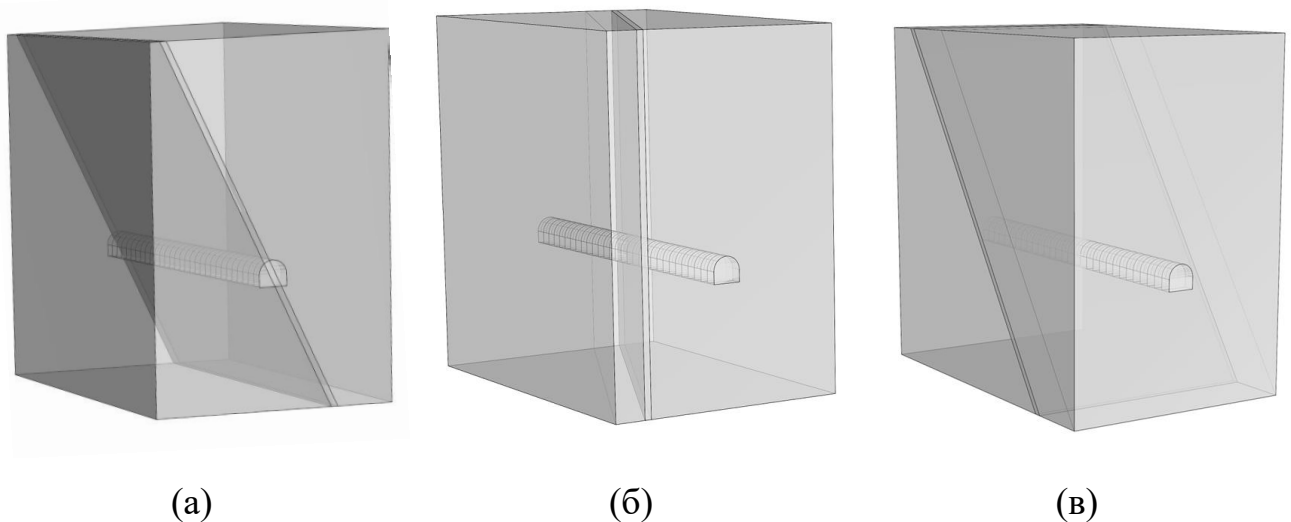


Рисунок 3.5 - Примеры направления пересечения дайки (составлено автором)

В данной части исследования, была проведена оценка влияния направления пересечения дайки на напряженное состояние, а также на размер зоны хрупкого разрушения в приконтурном массиве горизонтальной горной выработки, расположенной в тектонически-напряженном массиве, где горизонтальные напряжения превышают вертикальные.

Для анализа были выделены следующие параметры модели: угол падения дайки, соотношение деформационных и прочностных характеристик дайки и массива.

На эпюре (рисунок 3.6) видно, что при изменении ориентации дайки относительно выработки характер формирования зоны хрупкого разрушения отличается. При ориентации типа А согласно рисунку 3.5 зона хрупкого разрушения формируется по всей трассе выработки в зоне влияния дайки. При анализе залегания согласно ориентации типа Б, происходит перераспределение таким образом, что при пересечении выработкой дайки формируется зона разгрузки в боку выработки при приближении к дайке, а затем на участке пересечения аналогично типу А. Для залегания типа В характерно перераспределение напряжений в лежащем и висячем боку относительно дайки, формируя зону ее влияния.

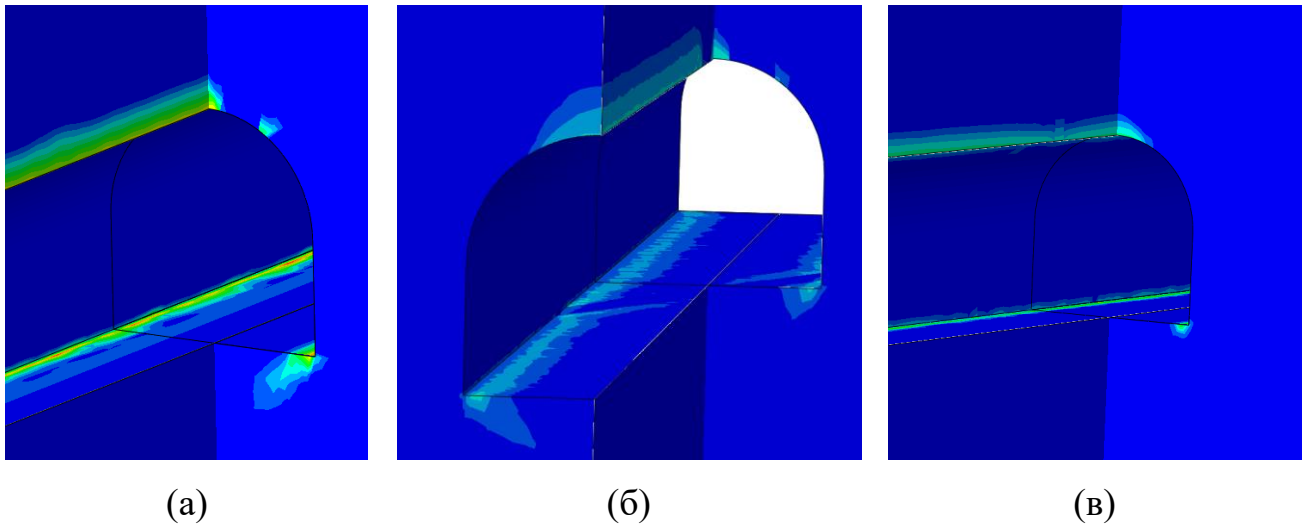


Рисунок 3.6 - Картина формирования зоны хрупкого разрушения
(составлено автором)

При многовариантном моделировании было исследовано влияние двух ориентаций (тип А и тип В) на напряженное состояние в приконтурном массиве горной выработки. Исследование типа Б на формирование зоны влияния дайки рассмотрено в главе 4.

Изучение двух типов пересечения дайки с выработкой показывает, что тип пересечения оказывает существенное влияние на параметры напряженного состояния в массиве. Ориентация дайки относительно выработки и угол её падения оказывают заметное воздействие на степень концентрации напряжений.

Анализ зависимости коэффициента напряженного состояния от угла падения дайки выявил, что с увеличением угла падения напряженное состояние возрастает.

При угле падения около 90° максимальные значения коэффициента напряжения достигают порядка 1.7 для пересечения (перпендикулярное пересечение), в то время как для Типа В с более сложной геометрией максимальные коэффициенты достигают примерно 1.5–1.6. Это означает, что первый тип пересечения формирует более интенсивные локализованные напряжения.

Отношение жёсткостей E_d/E_m оказывает также выраженное влияние (рисунок 3.7). В зависимости от угла падения дайки диапазон изменений коэффициента напряженного состояния при росте E_d/E_m составляет 10-15% в массиве и до 5% в дайке, что указывает на активное перераспределение напряжений в массиве горных пород.

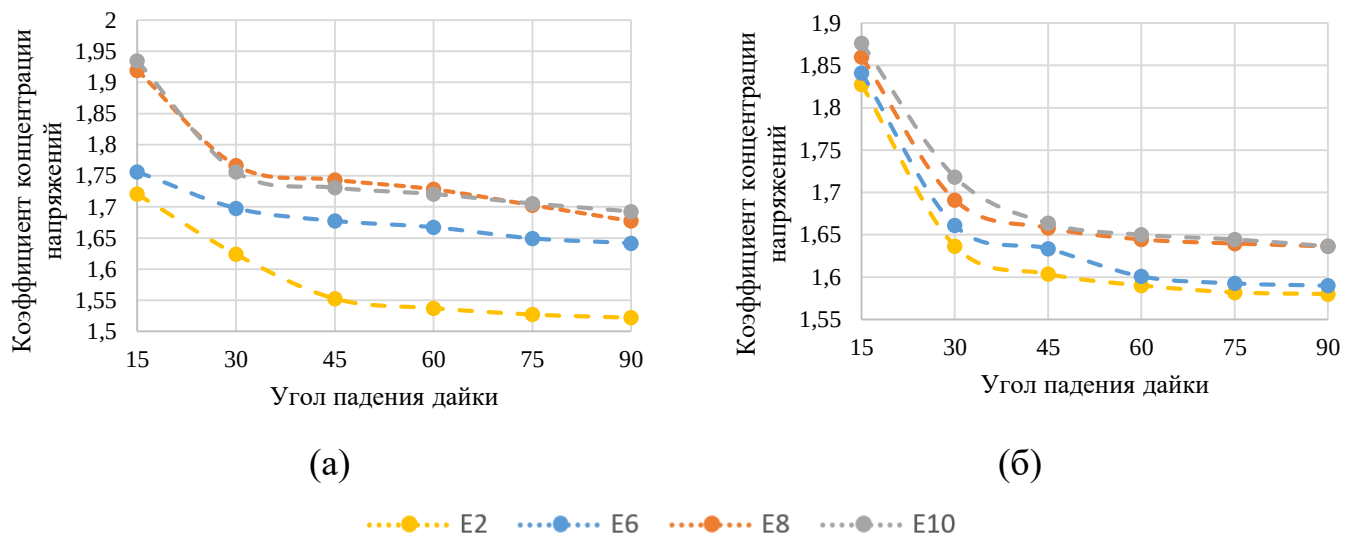


Рисунок 3.7 - Зависимость концентрации напряжений для типа А от залегания дайки и E_d/E_m в массиве (а) и в дайке (б) (составлено автором)

Влияние расстояния до выработки на коэффициент напряженного состояния показывает, что при пересечении типа В напряжение в массиве при приближении дайки к выработке увеличивается для пологих углов снижается с 1.4–1.5 при 1В до 1.7-1.8 на расстоянии 0.1В и с 1.2-1.3 при 1В до 1.55-1.57 при острых углах (рисунок 3.8).

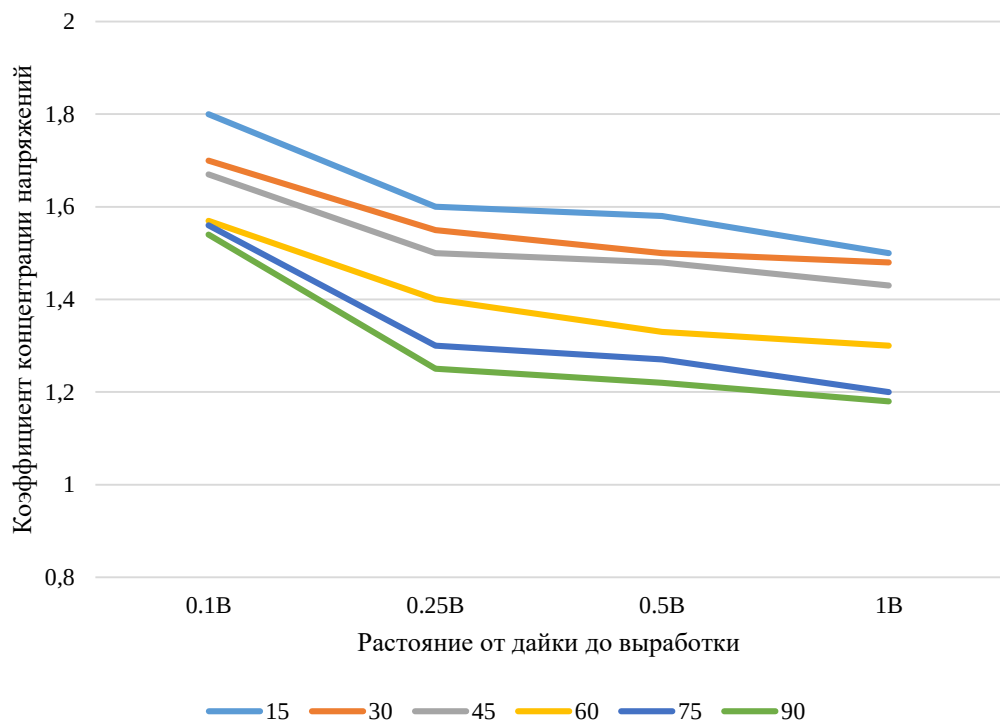


Рисунок 3.8 - Зависимость напряженного состояния от залегания дайки и угла падения для типа В (составлено автором)

Таким образом, сравнительный анализ показывает, что различия между типами пересечений дайки достигают 20–30% по максимальным значениям коэффициентов напряженного состояния и характеризуются различной степенью локализации зон хрупкого разрушения. Тип А пересечения создаёт перераспределение на контуре по всей трассе выработки, а второй — пространственно расширенное поле напряжений, локализованное на меньшей протяженности выработки.

В этой связи ориентировка и тип пересечения дайки играют ключевую роль в формировании напряженного состояния и размера зоны хрупкого разрушения, что необходимо учитывать в инженерной практике и при планировании горных работ. Влияние третьей возможной ориентации дайки подробно рассмотрено в разделе 3.3.

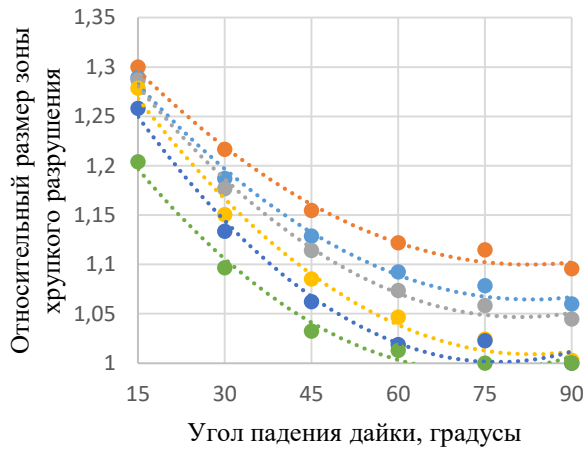
3.3 Исследование влияния мощности дайки на формирование зоны хрупкого разрушения

С помощью многовариантного численного моделирования в рамках диссертационного исследования были определены изменения размеров зон хрупкого разрушения в приконтурном массиве от изменения мощности дайки как в самой дайке, так и в массиве. Результаты расчетов представлены на рисунках 3.9-3.10, в таблицах 3.2-3.4 и Приложении Г.

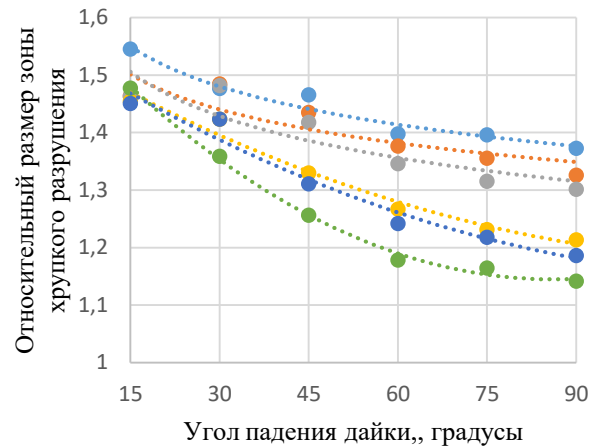
На рисунке 3.9 показано изменение размера зоны хрупкого разрушения в зависимости от начального поля напряжений, мощности дайки и угла наклона. Было установлено, что коэффициент детерминации (R^2) находится в диапазоне от 0.75 до 0.97, что указывает на качество прогнозирующей способности модели для оценки размеров зоны хрупкого разрушения в различных геомеханических условиях. Все графики показывают, что увеличение горизонтальной составляющей напряжений приводит к расширению зоны хрупкого разрушения в пределах дайки, причем наиболее значительные изменения происходят при соотношении напряжений 2:1.5:1 и 3:1:1.

Было обнаружено, что размер зоны хрупкого разрушения внутри дайки (рисунок 3.10) имеет выраженную зависимость от их геометрических параметров и начального напряженного состояния. Для даек малой мощности (толщиной 0.3 м) с углом наклона 15° при соотношении напряжений 4:2:1 относительный размер зоны разрушения достиг 1.72. Напротив, увеличение мощности дайки до 5.0 м снизило этот параметр до 1.11.

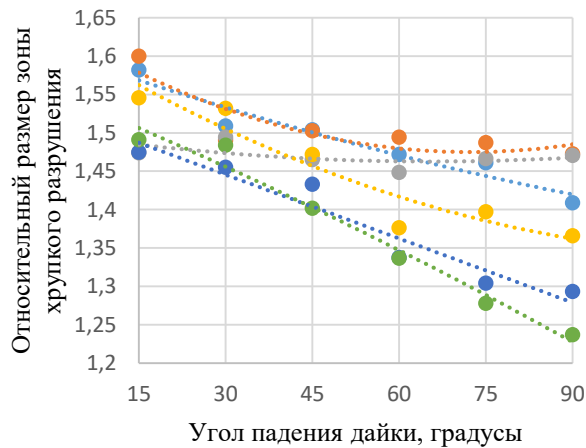
Также наблюдалась угловая зависимость: зона разрушения уменьшалась на 20-25% при увеличении угла падения до 90° , что объясняется однородностью распределения напряжений вблизи субвертикальных геологических структур.



(а)



(б)



(в)

● 0.3 м ● 0.5 м ● 0.75 м ● 1 м ● 2.5 м ● 5 м

Рисунок 3.9 - Диаграмма формирования зоны хрупкого разрушения на контуре выработки в зависимости от мощности дайки и угла ее наклона (в зоне дайки) при различных типах напряженного состояния: (а) 2:1.5:1; (б) 3:1:1; (в) 4:2:1 [59]

Массив вмещающих пород в зоне влияния дайки (рисунок 3.10, таблицы 3.2-3.4) характеризуется асимметричным развитием зон разрушения, что объясняется перераспределением тектонических напряжений. При угле наклона в 15° зона разрушения в подвесной стене в 1.35 раза превышает зону разрушения в опорной стене. Однако увеличение угла наклона до 90° устраняет асимметрию, выравнивая соотношение до 1.0.

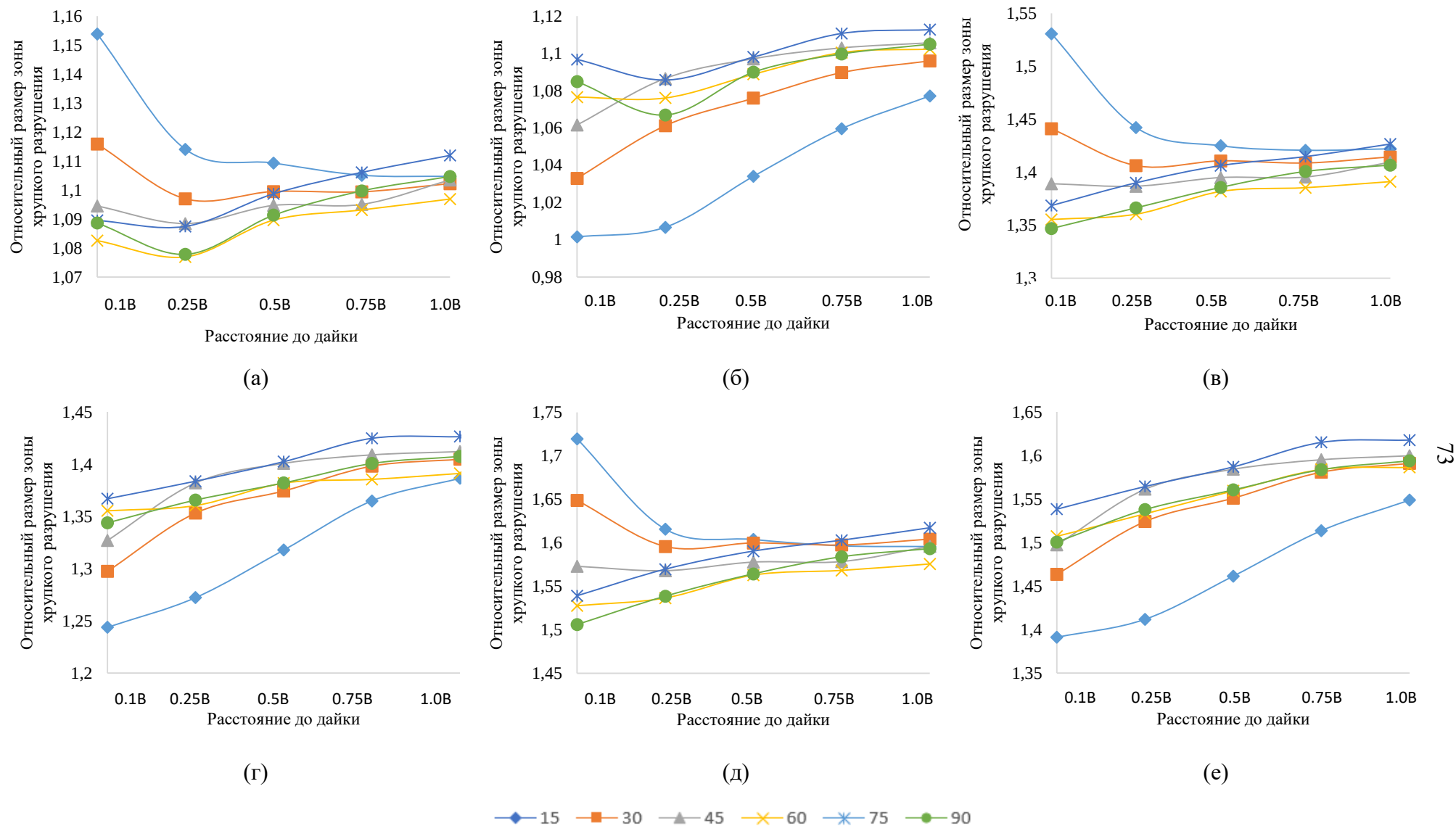


Рисунок 3.10 – Относительный размер зоны хрупкого разрушения в зоне влияния дайки, при мощности дайки 0,3 м в зависимости от угла наклона дайки в висячем боку и в лежащем боку при напряженном состоянии, 2:1.5:1 (а, б), 3:1:1 (в, г), 4:2:1 (д, е) [59]

Таблица 3.2 - Диапазон изменения размера зоны хрупкого разрушения при напряженном напряжении 2:1.5:1 [59]

	Мощность дайки					
	0.3м	0.5м	0.75м	1.0м	2.5м	5.0м
0.1В	1.08-1.16/ 1.00-1.085	1.07-1.165/ 0.96	1.059-1.168/ 0.95-1.06	1.11-1.24/ 0.99-1.108	1.02-1.15/ 0.91-1.02	1.00-1.11/ 0.91-1.2
0.25В	1.06-1.11/ 1.00-1.067	1.07-1.11/ 0.99	1.06-1.109/ 0.971.059	1.121-1.18/ 1.03-1.123	1.028-1.109/ 0.93-1.026	1.02-1.07/ 0.93-1.015
0.5В	1.09-1.10/ 1.03-1.09	1.07-1.10/ 1.01-1.07	1.077-1.099/ 1.002-1.076	1.147-1.17/ 1.06-1.148	1.05-1.08/ 0.97-1.05	1.043-1.057/ 0.96-1.04
0.75В	1.10/ 1.05-1.099	1.09-1.10/ 1.03-1.09	1.088-1.097/ 1.034-1.089	1.17/ 1.099-1.159	1.066-1.079/ 1.00-1.068	1.055-1.058/ 0.99-1.059
1.0В	1.105-1.11/ 1.077-1.11	1.10/ 1.06-1.10	1.095-1.1/ 1.049-1.1	1.17-1.176/ 1.12-1.176	1.075-1.077/ 1.02-1.08	1.053-1.068/ 1.01-1.078

Таблица 3.3 - Диапазон изменения размера зоны хрупкого разрушения при напряженном напряжении 3:1:1 [59]

	Мощность дайки					
	0.3м	0.5м	0.75м	1.0м	2.5м	5.0м
0.1В	1.53-1.346/ 1.24-1.344	1.52-1.54/ 1.19-1.53	1.52-1.30/ 1.17-1.30	1.52-1.31/ 1.15-1.30	1.44-1.37/ 1.10-1.43	1.37-1.20/ 1.08-1.19
0.25В	1.44-1.366/ 1.27-1.365	1.42-1.599/ 1.24-1.592	1.41-1.34/ 1.21-1.33	1.41-1.34/ 1.21-1.33	1.36-1.48/ 1.14-1.22	1.33-1.26/ 1.13-1.25
0.5В	1.425-1.375/ 1.32-1.369	1.39-1.63/ 1.29-1.62	1.39-1.36/ 1.26-1.36	1.39-1.36/ 1.25-1.36	1.34-1.32/ 1.19-1.31	1.31-1.30/ 1.17-1.29
0.75В	1.42-1.38/ 1.32-1.39	1.39-1.638/ 1.32-1.65	1.39-1.38/ 1.31-1.38	1.39-1.38/ 1.30-1.38	1.34/ 1.25-1.35	1.31-1.33/ 1.23-1.33
1.0В	1.422-1.406/ 1.386-1.407	1.39-1.65/ 1.36-1.65	1.387-1.385/ 1.33-1.384	1.39/ 1.33-1.40	1.34-1.36/ 1.27-1.37	1.31-1.34/ 1.25-1.36

Таблица 3.4 - Диапазон изменения размера зоны хрупкого разрушения при напряженном напряжении 4:2:1 [59]

	Мощность дайки					
	0.3м	0.5м	0.75м	1.0м	2.5м	5.0м
0.1В	1.72-1.51/ 1.39-1.50	1.82-1.54/ 1.39-1.54	1.74-1.47/ 1.27-1.46	1.79-1.49/ 1.33-1.48	1.69-1.37/ 1.20-1.37	1.59-1.34/ 1.171.34
0.25В	1.61-1.54/ 1.41-1.54	1.69-1.60/ 1.46-1.59	1.60-1.51/ 1.33-1.50	1.66-1.56/ 1.39-1.56	1.55-1.43/ 1.26-1.43	1.50-1.41/ 1.23-1.40
0.5В	1.60-1.564/ 1.46-1.56	1.66-1.63/ 1.52-1.62	1.58-1.61/ 1.39-1.61	1.65-1.62/ 1.44-1.62	1.53-1.48/ 1.32-1.47	1.48-1.46/ 1.30-1.46
0.75В	1.59-1.58/ 1.51-1.58	1.66-1.64/ 1.56-1.65	1.57-1.65/ 1.46-1.64	1.64-1.66/ 1.51-1.64	1.53-1.51/ 1.40-1.51	1.48-1.49/ 1.37-1.49
1.0В	1.59/ 1.55-1.59	1.66-1.65/ 1.61-1.65	1.57-1.67/ 1.49-1.67	1.64-1.67/ 1.56-1.67	1.52-1.54/ 1.42-1.55	1.48-1.52/ 1.40-1.52

Увеличение толщины дайки с 0.3 м до 2.5 м уменьшает зону разрушения в висячем боку на 18-25%, что объясняется перераспределением напряжений внутри

более жесткого интрузивного массива. Увеличение соотношения горизонтальных составляющих напряжений с 2:1.5:1 до 4:2:1 приводит к увеличению зоны разрушения на 44-60%. Для разработки прогнозной модели была выведена зависимость размера зоны хрупкого разрушения от геометрических параметров дайки и напряженного состояния массива (формула 3.3):

$$h_{\text{хр}} = (1.15 + 0.03m^{0.5})(0.5k)^{0.6-0.07m}(1 - 0.022(\alpha - 15)) \quad (3.3)$$

где m – мощность дайки, м;

k – коэффициент, учитывающий напряженное состояние массива;

α – угол падения дайки, °.

3.4 Исследование влияния напряженного состояния на формирование зоны хрупкого разрушения

Для оценки влияния напряженного состояния на формирование зоны хрупкого разрушения в окрестности выработки были проведены численные расчеты, направленные на учет распределения напряжений при повороте площадок главных напряжений. Характер формирования зон представлен на рисунке 3.11.

Согласно полученным результатам, естественное напряженное состояние влияет на формирование зоны хрупкого разрушения и локализует его в направлении перпендикулярном наибольшему главному напряжению. Соответственно при увеличении угла поворота площадок главных напряжений зона хрупкого разрушения постепенно переходит из кровли выработки в бока.

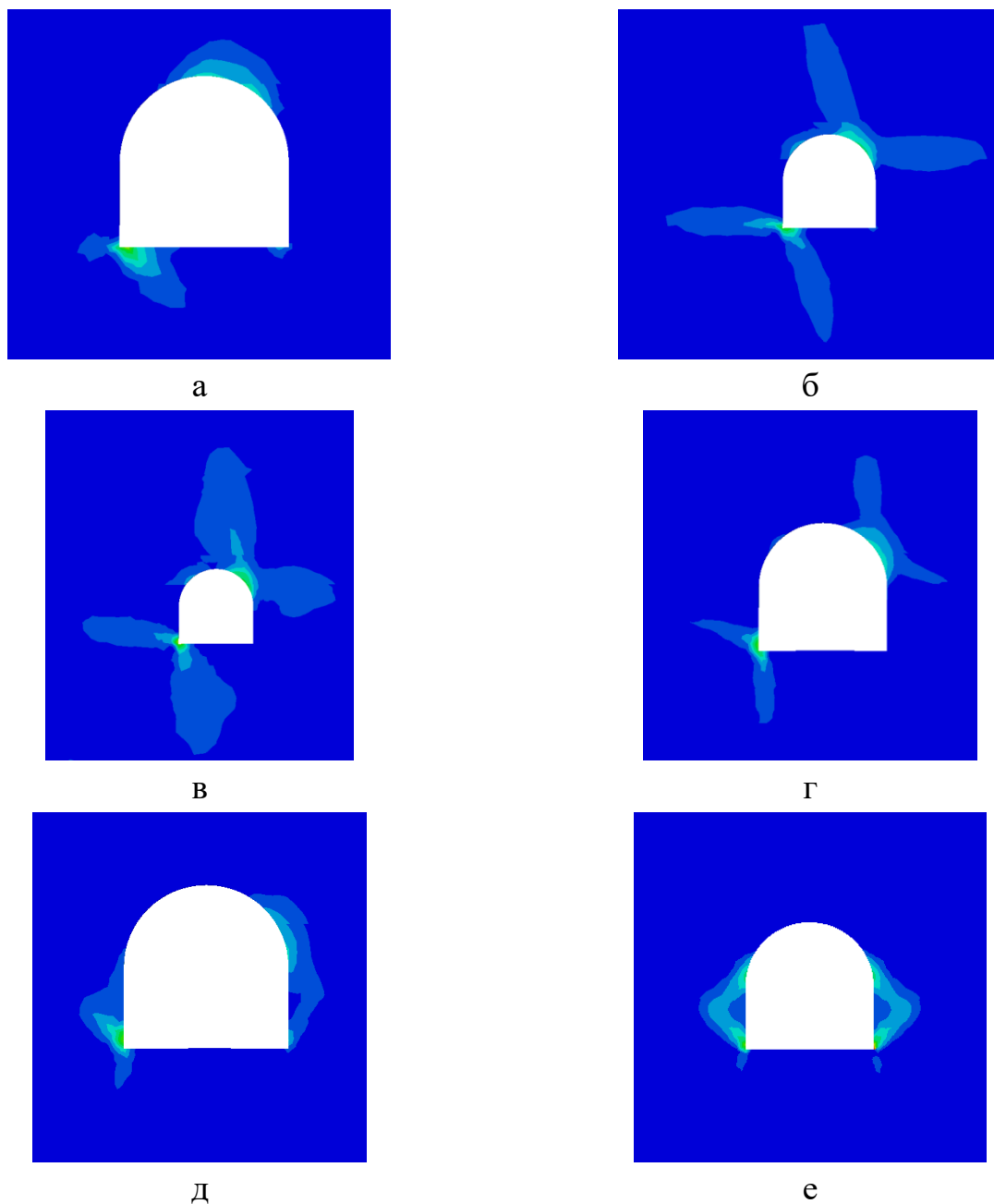


Рисунок 3.11 - Формирование зон хрупкого разрушения горной выработки в зоне влияния дайки при угле наклона главных напряжений (а) 15° , (б) 30° , (в) 45° , (г) , 60° , (д) 75° , (е) 90° (составлен автором)

3.5 Выводы по Главе 3

1. Проведен всесторонний анализ и численное моделирование НДС горного массива вблизи вертикальных и наклонных дайковых включений с использованием метода конечных элементов в программном комплексе Abaqus CAE.

2. Установлено, что ориентация дайки, её мощность и отношение жёсткостей E_d/E_m значительно влияют на распределение напряжений и форму зоны хрупкого разрушения вокруг выработки.

3. Коэффициент концентрации напряжений возрастает с увеличением угла падения дайки, достигая максимальных значений около 2.4 при перпендикулярном пересечении. При более пологих углах и других типах пересечений напряжённое состояние менее локализовано, но распространяется на большую зону.

4. Размер зоны хрупкого разрушения зависит от мощности дайки и отвечает формуле:

$$h_{\text{хр}} = (1.15 + 0.03m^{0.5})(0.5k)^{0.6-0.07m}(1 - 0.022(\alpha - 15))$$

5. Выявлена асимметрия в распределении зоны разрушений висячем и лежащем боку за счёт перераспределения напряжений. При увеличении угла падения дайки асимметрия уменьшается, усиливая однородность зоны хрупкого разрушения.

6. Численные модели хорошо согласуются с натурными данными, что подтверждает адекватность подхода и позволяет использовать их для прогнозирования зон хрупкого разрушения и разработки мер поддержки в технической практике.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЧЕТУ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ ПРОХОДКЕ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ТЕКТОНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ

Прогноз устойчивости горной выработки является одним из основных факторов безопасности при ведении горных работ. Геологические неоднородности – дайки являются прослойками более прочных пород, в связи с чем являются концентраторами напряжений, а также элементами, способными изменить ориентацию главных напряжений.

В этой связи возникает необходимость обобщения результатов полученных исследований в способ обеспечения устойчивости горных выработок, позволяющий производить проходку с учетом факторов, влияющих на размер зоны хрупкого разрушения.

Согласно [37] категория выработки, пересекающей дайку, определяются участковым геологом, что не является качественным показателем, определяющим геомеханические процессы.

4.1 Прогноз развития зон хрупкого разрушения в приконтурном массиве горных пород сложного геологического строения

Массив горных пород в пределах рудников Хибинского месторождений апатит-нефелиновых руд характеризуется сложным геологическим строением, в частности наличием даек, образованных залечиванием трещин и локальных тектонических нарушений с помощью интрузивных процессов. В результате изучения научной литературы и натурных данных было определено, что дайки относятся к вертикальным или субвертикальным элементам залегания, расположенным во вмещающем массиве горных пород.

В исследованиях, проведенных в 3 главе диссертации, горизонтальная горная выработка пересекает прослойку более прочных пород, что приводит к перераспределению напряжений на контуре горной выработки. На основе полученных данных при исследовании влияния различных параметров на размер зоны хрупкого разрушения, были определены граничные условия исследования.

Для оценки устойчивости выработки были приняты следующие параметры вариации: мощности дайки в диапазоне от 0.1 до 2В, угол падения от 30 до 90°, как наиболее вероятный согласно геологическим условиям, соотношение модулей деформации 3. Механические параметры дайки и вмещающего массива отражены в главе 3.

В ходе исследования были получены диаграммы зависимости приближения проходки выработки к дайке для различных конфигураций последней.

Анализ графиков показывает, что перераспределение напряжений на контуре выработки начинается до непосредственного пересечения дайки. При приближении к дайке напряжения на контуре выработки постепенно нарастают, а непосредственно перед контактом с дайковым телом происходит резкое повышение напряженного состояния, что создает благоприятные условия для начала хрупкого разрушения (рисунок 4.1).

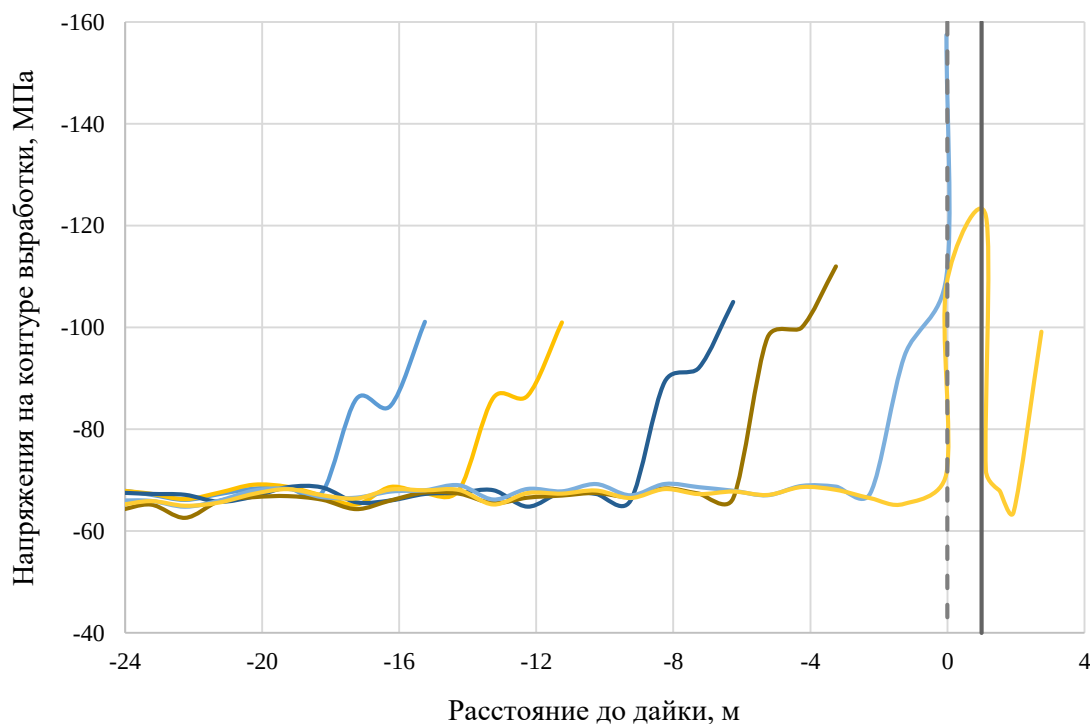


Рисунок 4.1 - Формирование напряжений на контуре горной выработки при приближении забоя горной выработки к дайке при мощности дайки 1 м (составлено автором)

Дальнейший анализ угла наклона дайки выявил значительное влияние этого параметра на размеры зоны влияния. При уменьшении угла наклона от 90° к 30°

зона влияния с лежащей стороны выработки увеличивается, тогда как с висячей стороны изменения носят менее выраженный характер (рисунок 4.2). Это связано с направленностью концентрации напряжений в массиве и характером контакта выработки с более прочной дайкой под различными углами.

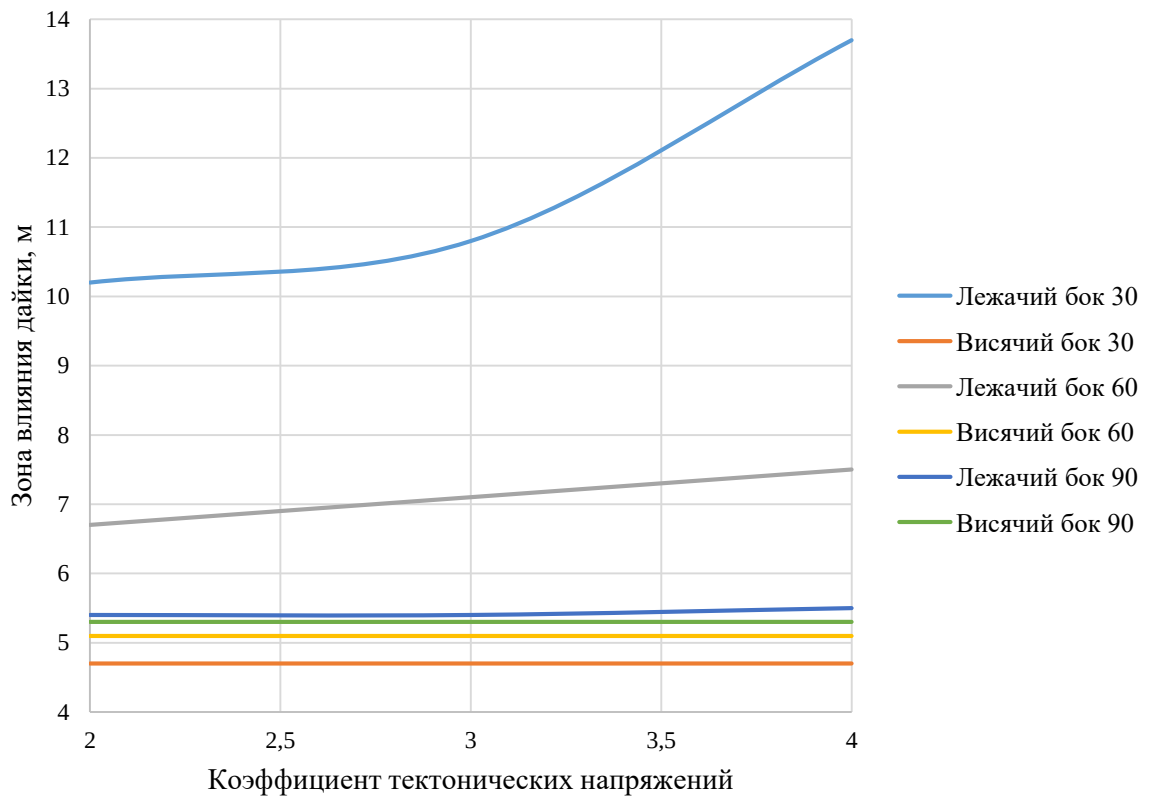


Рисунок 4.2 – Зависимость зоны влияния дайки от направления проходки, а также от напряженного состояния массива (составлен автором)

Угол наклона дайки оказывает существенное влияние на напряженное состояние при приближении забоя к контакту пород. При увеличении жесткости дайки происходит увеличение зоны влияния при направлении проходки со стороны лежащего бока, в то время как со стороны висячего бока перераспределение напряжений происходит таким образом, что зона влияния дайки уменьшается (рисунок 4.3).

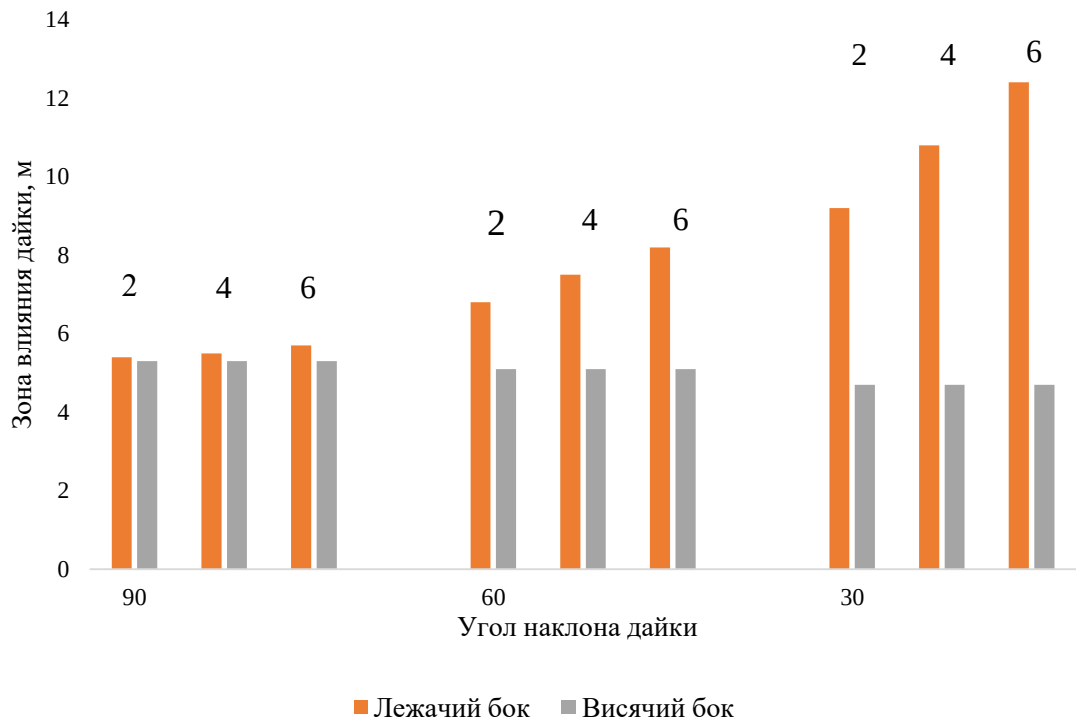


Рисунок 4.3 – Зависимость зоны влияния дайки от соотношения E_d/E_m
(составлено автором)

На рисунке 4.4 так же можно заметить изменение зоны влияния дайки в зависимости от мощности и угла падения.

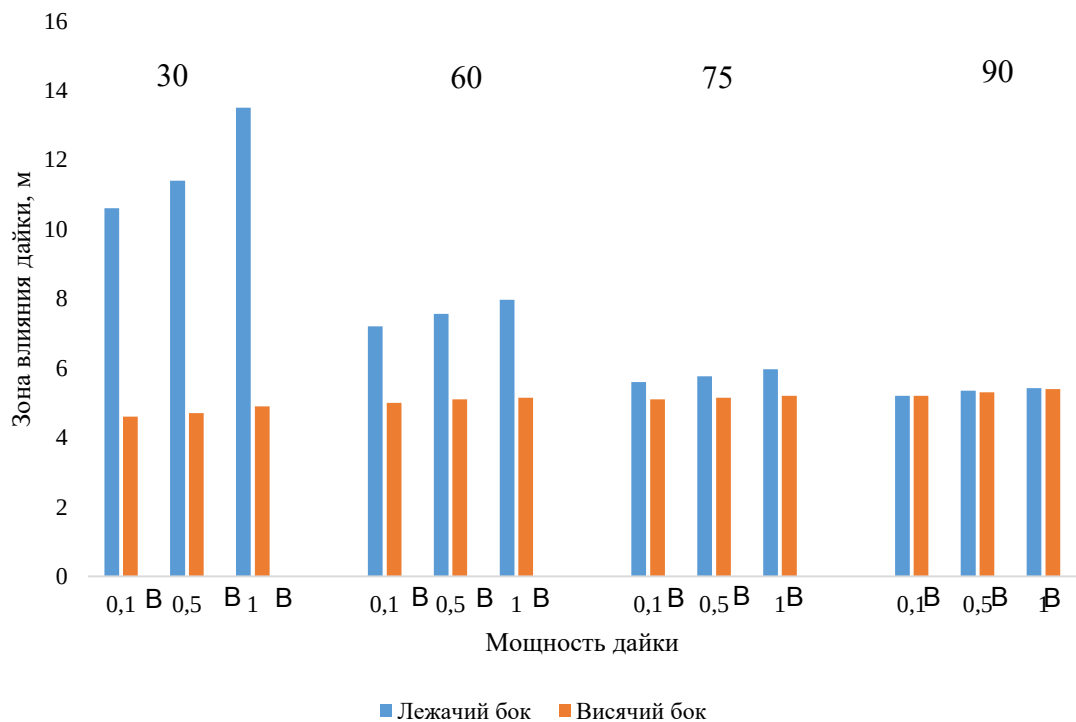


Рисунок 4.4 – Зависимость зоны влияния дайки от мощности и угла падения
(составлено автором)

На диаграмме видно, что при вертикальных углах в пределах 75-90° направление проходки практически не влияет на зону возможной деформации, в то время как при пологих углах разница достигает 3 раз.

Исходя из полученных результатов оценки зоны влияния дайки, можно сделать вывод, что при проходке выработки зона влияния дайки зависит от стороны, с которой осуществляется проходка, а также от угла наклона дайки.

Указаниями разрабатываемых месторождений установлено, что размер зоны хрупкого разрушения определяется согласно формуле 4.1.

$$h_{\text{хр}} = 0.64k_{\text{д}}b\sqrt{H}s. \quad (4.1)$$

где b – ширина одиночной горной выработки, м;

$k_{\text{д}}$ – относительный показатель напряженного состояния, определяемый по формуле 4.2.

$$k_{\text{д}} = 0.6 \frac{\sigma_{\text{д}}}{\sigma_{\text{с}}} - 0.24; \quad (4.2)$$

где H – высота выработки, м;

$\sigma_{\text{д}}$ – величина максимального напряжения, действующего в плоскости сечения горной выработки, МПа.

$\sigma_{\text{с}}$ – величина предела прочности, МПа.

Данная формула учитывает напряженное состояние массива, а также тип выработки и ее размер, однако не учитывает влияние геологических неоднородностей при их наличии.

В соответствии с проведенными натурными и численными исследованиями особое внимание стоит обратить на параметры неоднородностей: мощность дайки, ее угол падения и соотношения прочностных показателей. Таким образом были получены поправочные показатели для участков выработки в зоне влияния дайки.

Размер зоны хрупкого разрушения, как говорилось в главе 3 можно определять согласно эмпирической формуле 4.3:

$$h_{\text{хр}} = (1.15 + 0.03m^{0.5})(0.5k)^{0.6-0.07m}(1 - 0.022(\alpha - 15)) \quad (4.3)$$

Однако также предлагается осуществлять согласно базовой методике с учетом поправочных коэффициентов в зоне влияния дайки по следующей формуле 4.4:

$$h_{xp} = \frac{0.64k_d b \sqrt{H} s k_m}{k_\alpha} \quad (4.4)$$

где k_m – коэффициент, учитывающий мощность дайки;

k_α – коэффициент, учитывающий угол падения дайки.

Значения поправочных коэффициентов определялись исходя из численного моделирования и отражены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 - Значения коэффициента, учитывающего мощность дайки (составлено автором)

m, м	k_m
0.1В	1
0.25В	1.05
0.5В	1.1
0.75В	1.2
1.0В	1.35

Таблица 4.2 - Значения коэффициента, учитывающего угол наклона дайки (составлено автором)

$\alpha, ^\circ$	k_α
90	1
75	0.98
60	0.9
45	0.75
30	0.65
15	0.6

Таким образом, при определении зоны хрупкого разрушения в зоне влияния дайки, необходимо учитывать параметры залегания дайки, причем принимать, что в лежащем боку размер зоны хрупкого разрушения уменьшается до 28%.

На основании результатов исследования были построены графики зоны влияния дайки в зависимости от мощности дайки для углов поворота в двух направлениях угла падения и угла простирания (рисунок 4.5-4.6).

Зона влияния угла простирания формируется при приближении плоскости дайки к контуру выработки в вертикальной плоскости. В то время как зона влияния

угла падения формируется при приближении дайки к кровле выработки в горизонтальной плоскости.

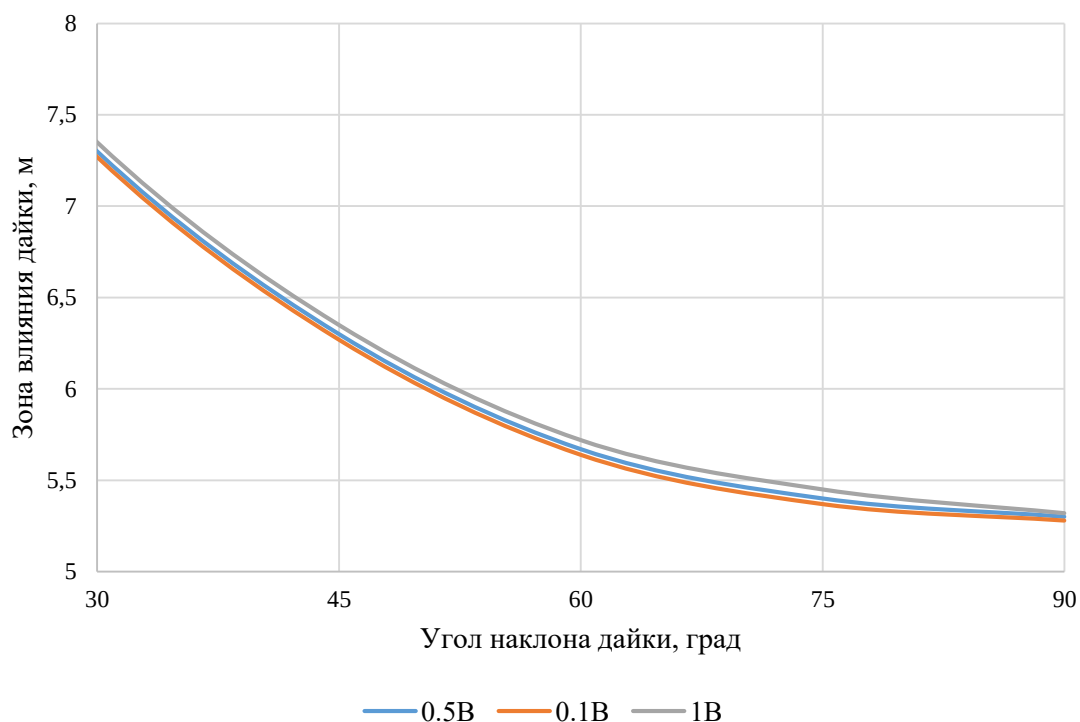


Рисунок 4.5 – Зависимость зоны влияния дайки от мощности и угла простираия
(составлено автором)

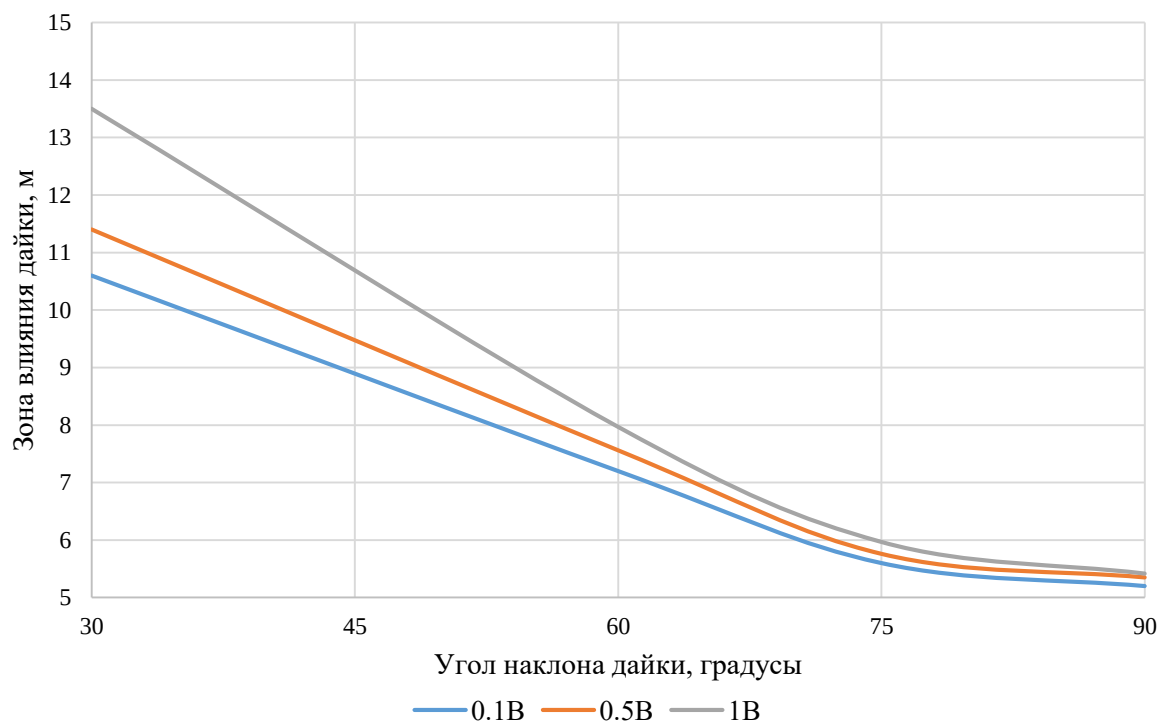


Рисунок 4.6 - Зависимость зоны влияния дайки от мощности и угла падения
(составлено автором)

Направление пересечения дайки влияет на формирование зоны влияния дайки только относительно угла падения. Согласно результатам, полученным в диссертации, зону влияния можно рассчитать по формуле 4.5:

$$Z = 1.2 Z_{\alpha 90} D k_{\alpha_d} k_{\alpha_s} \quad (4.5)$$

где $Z_{\alpha 90}$ – зона влияния дайки при угле 90° , м;

D – коэффициент, характеризующий направление продсечки дайки, определяется при направлении пересечения со стороны висящего бока $D = 1$ и со стороны лежащего бока соответственно по таблице 4.3 в зависимости от напряженного состояния массива.

Таблица 4.3 – Определение коэффициента D (составлено автором)

$\alpha, ^\circ$	$k_\sigma = 2$	$k_\sigma = 3$	$k_\sigma = 4$
0	3.026	3.204	4.359
15	2.598	2.751	3.637
30	2.170	2.298	2.915
45	1.742	1.845	2.193
60	1.314	1.392	1.471
75	1.167	1.206	1.255
90	1.019	1.019	1.038

k_{α_d} – коэффициент, зависящий от угла падения и определяемый по формуле 4.6:

$$k_{\alpha_d} = -0.000021\alpha^2 + 0.0044067\alpha + 0.7735 \quad (4.6)$$

k_{α_s} – коэффициент, учитывающий угол простирания дайки и определяемый по формуле 4.7:

$$k_{\alpha_s} = 0.000152\beta^2 - 0.02472\beta + 1.99318 \quad (4.7)$$

Таким образом, при прогнозе зоны влияния дайки, необходимо учитывать геометрические параметры дайки, а также напряженное состояние массива.

4.2 Описание и условия применения динамических крепей

Целью крепления горных выработок является принцип поддержания, отделяющихся по естественным плоскостям ослабления блоков пород, предотвращая их обрушение в выработанное пространство. Данная концепция эффективна в условиях трещиноватых массивов, расположенных вне зоны

повышенных напряжений. В таких условиях работы крепь воспринимает нагрузку от веса вышележащих пород и от контактного взаимодействия с породного массива. Несущая способность такой крепи должна быть больше нагрузки формируемой весом обрушаемой породной массы, а саму крепь следует выполнять в жестком исполнении.

В тектонически напряженных массивах горных пород разрушение пород происходит в связи с повышенными напряжениями в массиве. Оно может происходить как в связи с деформацией, а также из-за проявления горного давления в динамической форме. Соответственно режим работы крепи переходит из заданной нагрузки в режим совместного взаимодействия. При этом несущая способность крепи зависит от склонности пород к деформированию без разрушения и чем она больше, тем меньше должна быть несущая способность, однако большей пластичностью.

Механизм взаимодействия крепи с породным массивом весьма сложный и не всегда удастся определить характер этого взаимодействия. В то же время в целом, выделяют три основных функции крепи: упрочнение массива; поддержание разрушенной породной массы от обрушения; обеспечение контроля за кинематически подвижными блоками породы. Таким образом, задачей крепи является не столько поддержание разрушенной породной массы, сколько создать условия, при которых расслоение пород, выдавливание пород и выпадение разрушенной массы будет ограничено или исключено, что в целом создаст благоприятные условия для сохранения горной выработки в устойчивом состоянии.

Для эффективного восприятия нагрузки в зонах концентрации напряжений, таких как дайки, крепь должна обладать следующими требованиями:

- способностью деформироваться на заданную величину, с учетом ожидаемых деформаций локального участка породного массива в приконтурной области, вызванных ее разуплотнением;
- способностью абсорбировать энергию, вызванную выносом породной массы из приконтурной области выработки;

- создавать некоторое обжатие породного массива, что благоприятно скажется на количестве упругой энергии затрачиваемой на дробление породы.

Стандартные железобетонные и сталеполимерные анкера имеют достаточную несущую способность, однако при динамических явлениях не способны достаточно деформироваться и сохранять устойчивость крепи. Фрикционные анкера хоть и хорошо работают в условиях больших деформаций, но имеют недостаточную несущую способность.

Для восприятия достаточной нагрузки как у сталеполимерных анкеров и деформаций как у фрикционных используются динамические анкера (рисунок 4.7).

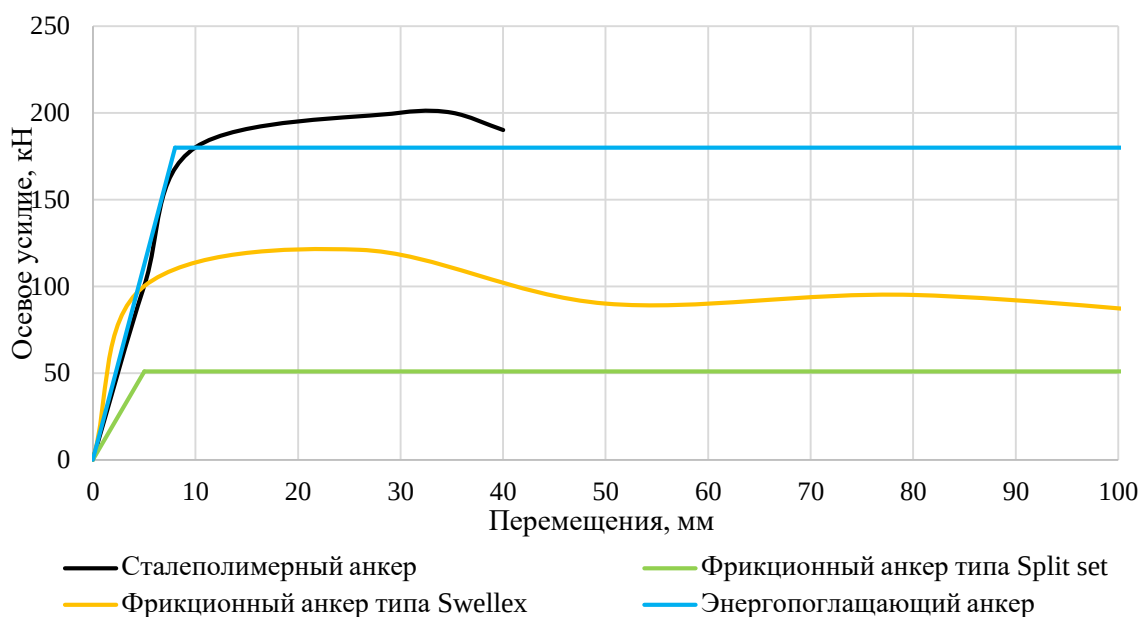


Рисунок 4.7 – Деформационно-силовые характеристики сталеполимерного, фрикционного и динамического анкеров [109]

Динамические анкера являются важнейшим элементов системы крепления горной выработки при динамическом воздействии. Их механическое поведение на предельном режиме работы можно охарактеризовать набором из трех статических и трех динамических показателей: несущая способность, предельная величина смещения (удлинения), способность к энергопоглощению. На основе анализа технической и научной литературы обобщена информация о предельной механической работе анкеров различного типа (таблица 4.4) и поверхностных крепей на основе набрызгбетона (таблица 4.5).

Таблица 4.4 – Механические характеристики различных типов анкеров (составлено автором)

Наименование анкера	Контакт анкера с породой	Статические характеристики			Динамические характеристики			Примечание
		$P_{f.s}$, кН	u_{max} , мм	$E_{max.s}$, кДж	$P_{f.d}$, кН	$u_{max.d}$, мм	$E_{max.d}$, кДж	
Металлический трос, диаметр 12.7 мм	В начале и конце анкера	183	20-40	2-6	150-180	20-40	2-6	-
Металлический трос, диаметр 15.2 мм		260	20-40	3-6	300	26	7.8	-
Металлический трос, диаметр 15.2 мм, модифицированный для восприятия динамической нагрузки		150-180	300	> 30	80-120	300	30	Величина смещений получена в момент остановки эксперимента
Cone Bolt, диаметр 16-22 мм		40-140	> 200	> 15	100-200	> 220	20-39	-
MC Cone Bolt, диаметр стержня 17.3 мм		100-110	150-200	15-25	100-150	63-600	16-35	-
Сталеполимерный анкер, диаметр 20 мм	По всей поверхности	116	10-20	1-4	-	-	-	-
Сталеполимерный анкер, диаметр 22 мм		160	10-30	2-5	-	1-10	2-4	-
Сталеполимерный анкер, диаметр 25 мм		210	10-30	3-7	-	-	-	-
Durabar	В начале и конце анкера	180	> 600	48	100	600	8*	* - на один метр длины стержня свободной от удлинения
Hydrid bolt	По всей поверхности	160	60	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 4.4

Наименование анкера	Контакт анкера с породой	Статические характеристики			Динамические характеристики			Примечание
		$P_{f.s}$, кН	u_{max} , мм	$E_{max.s}$, кДж	$P_{f.d}$, кН	$u_{max.d}$, мм	$E_{max.d}$, кДж	
Inflatable bolt (Swellex)	По всей поверхности	70-100*	50-60	-	50*	300-600	18-29	* - на один метр длины
Garford solid bolt, диаметром 21.7 мм		180-300	500	-	100-125	500	46.8	-
Roofex (Rx8D)		80	150-800	8*	55	25	3	* - на каждые 100 мм удлинения стержня
Roofex (Rx20D)		200	150-800	20*	100	25	5.4	* - на каждые 100 мм удлинения стержня
D-Bolt, диаметр стержня 20-22 мм	В множестве точек по длине анкера	160-200	50-60*	8	200-250	50-150	36-39	* - на один метр длины свободный от удлинения
Фрикционный тип анкера, диаметр 39-46 мм	По всей поверхности	50-100	80-250	5-15	25-30	300-600	3	Длина анкера 2.4 м
Threabar, диаметр стержня анкера 20 мм	-	146	20-70	3-11	155-196	8-15	0.8-1.1	-
Yield-Loc, диаметр стержня 17.2 мм	-	110	> 200	> 20	110-160	> 200	16.4*	на каждые 200 мм смещений анкера

Примечание: $P_{f.s}$ – максимальная несущая способность при статическом нагружении; $P_{f.d}$ – максимальная несущая способность при динамическом нагружении; $u_{max.s}$ – максимальная величина смещений при статическом нагружении; $u_{max.d}$ – максимальная величина смещений при динамическом нагружении; $E_{max.s}$ – максимальная воспринимаемая кинетическая энергия при статическом нагружении; $E_{max.d}$ – максимальная воспринимаемая кинетическая энергия при динамическом нагружении.

Таблица 4.5 – Механические характеристики различных типов набрызгбетонных крепей

Наименование элемента крепи	Геометрические параметры	Статические характеристики			Динамические характеристики			Примечание
		$P_{f.s}$, кН	u_{max} , мм	$E_{max.s}$, кДж	$P_{f.d}$, кН	$u_{max.d}$, мм	$E_{max.d}$, кДж	
Неармированный набрызгбетон	-	-	-	-	-	< 50	<< 5	-
Дисперсно-армированный набрызгбетон,	толщина слоя 50-70 мм	20-30	-	1-3	-	-	< 5	-
Дисперсно-армированный набрызгбетон, стальная фибра	толщина слоя 50-70 мм	20-30	-	1-3	-	30-40	5	-
Dramix дисперсно-армированный набрызгбетон	-	-	-	-	-	100	< 10	-
Дисперсно-армированный набрызгбетон, полипропиленовая фибра	-	-	-	-	-	120	< 15	-
Набрызгбетон армированной вязанной сеткой тип #6	-	45-55	100-150	6-9	-	150	15	-
Дисперсно-армированный набрызгбетон, усиленный канатной обвязкой	-	-	-	-	-	200-400	15-27	-
Дисперсно-армированный набрызгбетон, усиленный арматурными поясами	-	-	-	-	-	220	< 40	-
Дисперсно-армированный набрызгбетон, усиленный податливыми арматурными поясами	-	-	-	-	-	300	< 50	-

Примечание: $P_{f.s}$ – максимальная несущая способность при статическом нагружении; $P_{f.d}$ – максимальная несущая способность при динамическом нагружении; u_{max} – максимальная величина смещений; E_{max} – максимальная воспринимаемая кинетическая энергия.

Расчет крепления производится на основании полученного размера зоны хрупкого разрушения в разделе 4.1 с целью удержания потенциально неустойчивых блоков породы.

4.3 Рекомендации для определения зоны влияния дайки при пересечении горной выработкой

Хибинский массив апатит-нефелиновых месторождений характеризуется как тектонически напряженный. Породы, слагающие массив, характеризуются удароопасными, в связи с чем, на участках повышенных напряжений возможны возникновения горного давления, а также потеря устойчивости горных выработок. Предпосылки проявления данных явлений представлены на рисунках 2.9-2.11.

На предприятиях, разрабатывающих данные месторождения принята классификация категорий устойчивости горных выработок. Участки выработок, расположенные в породах склонных к хрупкому разрушению согласно таблице 1.1 относятся к категориям выработок «В» - «Д».

В условиях тектонически напряжённого массива с наличием даек, представляющих собой геологически и физико-механически неоднородные включения с повышенной жёсткостью, крепление горных выработок требует особого подхода, основанного на комплексном учёте геомеханических и геологических факторов.

Согласно указаниям [11] п. 6.2.4 осложняющие факторы (слоистость, крупные трещины) позволяют изменять категорию устойчивости на усмотрение геолога, что ведет к человеческому фактору, а, следовательно, возможным ошибкам в установки данных параметров. В этой связи необходима разработка рекомендаций по оценке устойчивости выработок, а также приведении их в неудароопасное состояние.

Для оценки устойчивости горной выработки в массиве склонному к хрупкому разрушению необходимо определить следующие параметры:

1. Провести оценку параметров геологической неоднородности, а также структурной нарушенности на контуре выработки вблизи дайки, причем оценку

необходимо проводить на расстоянии $3B$ от дайки с целью оценки зоны влияния как со стороны лежащего, так и со стороны висячего боков

2. Определить направление действующих напряжений и их значения. Классифицировать категорию горной выработки.

3. Определить размер зоны хрупкого разрушения.

На основании полученных результатов необходимо следовать разработанным рекомендациям:

- при картировании выработки необходимо снимать данные параметров залегания дайки.

- на участках выработок, расположенных в зоне влияния даек, необходимо предусматривать пересечение неоднородности под углами близкими к вертикальным.

- при проходке выработок необходимо предусмотреть, минимальное значение m/B .

- перед креплением выработки необходимо оценить напряженное состояние выработки и возможную зону хрупкого разрушения в зоне влияния дайки.

- в категориях выработок «В»-«Д» необходимо вводить понижающий коэффициент несущей способности, в связи с концентрацией напряжений вблизи дайки.

- после проходки выработки, для снижения концентрации напряжений необходимо бурить строчку в висячем боку выработки с целью разгрузки массива.

- участки горных выработок, находящиеся в зоне влияния даек необходимо крепить динамически устойчивыми типами крепей. Комбинированные крепи (ДК) с динамически устойчивыми анкерами (ДА) и армированным набрызгбетоном (АНБ), а также усиленным ДАНБ (УДАНБ) с повышенным коэффициентом дисперсного-армирования.

- при креплении выработки оставлять минимальное отставание крепи от забоя в зоне влияния дайки, с целью предотвращения локальных деформаций на контуре выработки.

- обеспечить качественный геомеханический и геофизический мониторинг зоны влияния дайки, с целью своевременного выявления изменения НДС участка выработки.

- при углах наклона дайки меньше 75° вводить дополнительные элементы крепи, направленные на ориентированные на контроль распространения трещин в направлении максимальных напряжений.

Внедрение описанных рекомендаций позволит повысить надежность обеспечения устойчивости горных выработок в условиях воздействия дайковых структур, снизить риск аварийных ситуаций и оптимизировать материальные затраты на крепление и поддержание работоспособности выработок.

4.4 Выводы по Главе 4

В Главе 4 диссертации реализована методика оценки зоны хрупкого разрушения горизонтальной горной выработки в зоне влияния дайки. На основе численного моделирования определена зона влияния дайки в висячем и лежащем боку, в зависимости от угла падения неоднородности. На основе результатов исследований, проведенных в диссертации, были получены поправочные коэффициенты для определения размера зоны хрупкого разрушения.

В результате были получены следующие закономерности:

1. При вертикальных углах в пределах $75-90^\circ$ направление проходки практически не влияет на зону возможной деформации.
2. При углах меньше 60° зона влияния зависит от направления проходки и увеличивается при уменьшении угла падения дайки.
3. При увеличении жесткости дайки происходит увеличение зоны влияния при направлении проходки со стороны висячего бока, в то время как со стороны лежащего бока перераспределение напряжений происходит таким образом, что зона влияния дайки уменьшается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научная задача геомеханического обоснования способов обеспечения устойчивости выработок в тектонически напряженном массиве горных пород сложного геологического строения, имеющая существенное значение для развития горной отрасли России.

По результатам выполнения исследования были сделаны следующие выводы:

1. Размер зоны хрупкого разрушения в массивах сложного геологического строения может быть определен с помощью модели разупрочняющейся среды, основанной на модели Кулона-Мора.

2. При проектировании выработки, пересекающей вертикальные и субвертикальные дайки, необходимо учитывать их зоны влияния исходя из расчета.

3. При мощностях даек больше $0.5B$, напряжение в дайке перераспределяется таким образом, что зона влияния дайки уменьшается.

4. При пологих углах залегания даек происходит ассиметричное распределение напряжений с разницей до 1.6 раз.

5. При поэтапной проходке выработки зона влияния дайки имеет неравномерный характер и влияет от направления подсечки дайки таким образом, что большая зона влияния формируется в лежащем боку.

6. При проведении натурных исследований необходимо производить определение категории устойчивости выработки, учитывая мощность дайки, ее угол падения и напряженное состояние.

7. Для обеспечения устойчивости выработок, находящихся в зоне влияния даек, необходимо использовать крепление динамически устойчивыми типами крепей

Результаты проведенного исследования показывают хорошую сходимость с натурными данными. Согласно разработанной методике, можно определять категорию горных выработок в полевых условиях согласно полученным зависимостям.

В дальнейшем данная методика может быть доработана для тектонически-напряженных массивов, со схожими условиями залегания, пересеченными более прочными геологическими неоднородностями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арзамасцев, А. А. Дайковые породы Хибинского массива и его обрамления / А. А. Арзамасцев, В. А. Каверина, Л. И. Полежаева; Кольский научный центр АН СССР, 1988. - 86 с.
2. Асилова, З. А. Анализ численных методов моделирования и оценки устойчивости отвалов на нагорных месторождениях / З. А. Асилова, Б. Т. Джакупбеков // Eurasian Journal of Scientific and Multidisciplinary Research. – 2025. – Т. 1., № I. - С. 124-130. DOI:10.63666/ejsmr.1694-9013.1.I.2025.9
3. Басалаева, П.В. Оценка влияния угла падения литологически неоднородной прослойки пород на устойчивость горизонтальной горной выработки при ее проходке / **П. В. Басалаева**, А. Д. Куранов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 17–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_17
4. Басалаева, П.В. Оценка зоны хрупкого разрушения вблизи зоны дайки в тектонически напряженном массиве горных пород / **П.В. Басалаева**, П.А. Деменков, А.Д. Куранов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 25. – С. 134-140. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-25-134-140
5. Батугин, А. С. Тектонофизическая модель горнотектонических ударов с подвижками крыльев крупных тектонических нарушений / А. С. Батугин // Горный информационно аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – Т. 1, № 12. – С. 251–265.
6. Бауэр, Т. В. Перспективы применения лазерного 3D-сканирования в горной промышленности / Т. В. Бауэр, Е. В. Котова // Россия молодая : Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 20–23 апреля 2021 года – 2021. – С. 10701.1–10701.5
7. Булычев, Н. С. Механика подземных сооружений / Н. С. Булычев. – Москва: Недра, 1982. – 271 с

8. Булычев, Н.С. Устойчивость пород, окружающих горные выработки, и выбор типа крепи / Н.С. Булычев // Записки Горного института. – 1975. – Т.67, № 1. – С. 166-176.
9. Влох, Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н.П. Влох – Москва: Недра, 1994. – 208 с.
10. Дмитриев, С.В. / Разработка инструментальных средств проведения объемного сканирования и профилирования подземных выработок / С.В. Дмитриев // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 22-27. – DOI 10.37614/2307-5228.2021.13.3.004
11. Инструкция по креплению и управлению кровлей выработок на рудниках КФ АО «Апатит» (Положение по креплению и поддержанию горных выработок). Кировск, 2019 г.
12. Жабко, А. В. О форме дисков при дисковании керна / А. В. Жабко, Н. М. Жабко, Н. В. Волкоморова // Уральская горная школа - регионам: материалы международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 06–07 апреля 2020 года. – 2020. – С. 237-238.
13. Кальчева, А. В. Керна - основной источник получения геологической информации / А.В. Кальчева // Георесурсы. - 2009. - №3 (31). – С. 23-26.
14. Карасев, М.А. Методические вопросы определения исходных параметров модели деформирования каменной соли как поликристаллической дискретной среды / М.А. Карасев, В.В. Петрушин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 9. – С. 47–64. - DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_47.
15. Карасев, М.А. Применение метода конечно-дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макроструктурном уровне /М.А. Карасев, В.В. Петрушин, А.И. Рысин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 4. – С. 48–66. - DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_48
16. Козырев, А.А. Методика регионального прогноза удароопасности и состояния массива пород и выбора технических решений по обеспечению

безопасности и эффективности горных работ / А.А. Козырев, А.Н. Енютин, В.А. Мальцев, И.Э. Семенова //Иновационный потенциал Кольской науки. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. — С. 52—56.

17. Козырев А. А., Енютин А. Н., Мальцев В. А., Семенова И. Э. Методика регионального прогноза удароопасности и состояния массива пород и выбора технических решений по обеспечению безопасности и эффективности горных работ / Иновационный потенциал Кольской науки. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. — С. 52—56.

18. Корчак, П. А. Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве / П.А. Корчак // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 85-98. – DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_85.

19. Кузнецов, Н.Н. Исследование энергоемкости разрушения скальных горных пород с целью оценки их удароопасности (на примере месторождений Кольского региона): специальность 25.00.20 "Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Н.Н. Кузнецов – 2021. – 27 с.

20. Куранов, А. Д. Влияние даек в массиве горных пород на устойчивость горной выработки в условиях действия гравитационно-тектонического поля напряжений / А. Д. Куранов, **П.В. Басалаева**, В.С. Онуприенко // Известия Уральского государственного горного университета. – 2023 - №2 (70) – С. 72-80. – DOI: 10/21440/2307-2091-2-72-80

21. Курленя, М.В. Взгляд на природу напряженно-деформированного состояния недр земли и техногенные динамические явления / М.В. Курленя, В.Е. Миренков, С.В. Сердюков //Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 8. – С. 5–20.

22. Лебедев, М.О. Оценка влияния техногенных полей напряжений на напряженно-деформированное состояние подземных конструкций / М. О. Лебедев, А. С. Саммаль, П. В. Деев, С. В. Анциферов // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 6. – С. 68-81.
DOI 10.25018/0236_1493_2025_6_0_68

23. Маринин, А.В. Структурные парагенезы и тектонические напряжения южной части Хибинского массива / А. В. Маринин, Л. А. Сим, Д. В. Жиров, И. В. Бондарь // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2018. – №15. – 239-241. – DOI 10.31241/FNS.2018.15.059

24. Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам // Утверждены приказом № 216 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.05.2013

25. Онохин Ф.М. Особенности структуры Хибинского массива и апатит-нефелиновых месторождений / Ф.М. Онохин // Издательство «Наука», Ленингр. Отд., Л – 1975 – с. 106

26. Онуприенко, В. С. Выбор типов и параметров крепей в условиях подземной отработки апатит-нефелиновых месторождений / В. С. Онуприенко, А. А. Еременко, Ю. Н. Шапошник, А. И. Копытов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 2(156). – С. 56-70. – DOI 10.26730/1999-4125-2023-2-56-70

27. 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.

28. Петров, Д.Н. Напряженно-деформированное состояние пород вокруг одиночной выработки в неоднородном массиве / Д.Н. Петров, В.И. Моисеев, Р.И. Ларионов // Записки Горного института. – 2006. – Т. 168. – С. 231-234.

29. Попов, М.Г. Прогнозирование устойчивости выработок при пересечении нарушенных зон породного массива / Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 51-54.

30. Протосеня, А.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке

системами разработки с обрушением / А.Г. Протосеня, Н.А. Беляков, М.А. Буслова // Записки Горного института. - 2023. - Т. 262. - С. 619-627.

31. Рассказов, М.И. Оценка геомеханического состояния горнорудного массива по данным сейсмоакустического мониторинга на удароопасных месторождениях / М.И. Рассказов, А.А. Терёшкин, Д.И. Цой, А.В. Константинов, А.В. Сидляр // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. - № 12-1. — С. 167—182. - DOI:10.25018/0236_1493_2021_121_0_167

32. Рыбак, Я. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой / Я. Рыбак, М.М. Хайрутдинов, Д.А. Кузиев, Ч.Б. Конгар-Сюрюн, Н.В. Бабырь // Записки Горного института. - 2022. - Т. 253. - С. 61-70. - DOI: 10.31897/PMI.2022.2.

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688148 Российская Федерация. Программа для прогнозирования проявлений горного давления, вызванных сложным литологическим строением. Заявка № 2023687662: заявл. 12.12.2023: опубл. 20.12.2023 / **П.В. Басалаева**, А.Д. Куранов, Н.Я. Мельников; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» - 58 КБ.

34. Серебряков, Е. В. Обзор современных методов сбора данных для оценки структурной нарушенности горного массива / Е. В. Серебряков, А. С. Гладков, Т. Д. Гапфаров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 9. С. 160–177. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_9_0_160

35. Трушко, В. Л. Критерии акустической эмиссии для анализа процесса разрушения горных пород и оценки формирования трещинных коллекторов на больших глубинах / В. Л. Трушко, А. О. Розанов, М. М. Саитгалеев, Д. Н. Петров, М. Д. Ильинов, Д. А. Карманский, А. А. Селихов // Записки Горного института. — 2024. — Т. 269. — С. 848–858.

36. Трушко В. Л., Господариков А. П., Созонов К. В. Расчет напряженно-деформированного состояния рудного и закладочного массивов при разработке

Яковлевского железорудного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 111–123. – DOI 10.25018/0236-1493-2019-05-0-111-123. – EDN SCGZXR.

37. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. Кировск, 2021

38. Ферсман, А. Е. Путеводитель по Хибинским тундрам / А.Е. Ферсман; Ленинград: Издательство Академии наук СССР, 1932. — 200 с.

39. Фисенко, Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок / Г.Л. Фисенко // Недра, Москва, - 1976 г., - 272 с.

40. Черданцев, Н.В. Исследование состояния анизотропного массива горных пород в окрестности выработки, пройденной вблизи дизъюнктивного нарушения / Н.В. Черданцев // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – №2 – С. 34-40.

41. Черданцев, Н.В. Вопросы методического и инструментального обеспечения мониторинга горных выработок / Н.В. Черданцев, В.Т. Преслер, В.Е. Ануфриев// Кемерово: Институт угля СО РАН, 2012. – 224 с.

42. Askaripour, M. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods / M.Askaripour, A.Saeidi, A.Rouleau // Underground Space. – 2022. – Т. 7, №. 4. – С. 577-607. - DOI:10.1016/j.undsp.2021.11.008

43. Barton, N.R. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support / N.R. Barton, R. Lien, J. Lunde // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 1974. – Vol. 6, No. 4. – P. 189-236. - DOI:10.1007/BF01239496

44. Bažant, Z.P. Microplane constitutive model for porous isotropic rocks. / Z.P. Bažant, Z. Goangseup // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics – 2003 – Vol. 27 – P. 25–47. - DOI:10.1002/nag.261

45. Bieniawski, Z.T. Determining rock mass deformability: Experience from case histories. / Z.T. Bieniawski // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1978 – Vol. 15. – P. 237-247. - DOI:10.1016/0148-9062(78)90956-7

46. Bieniawski, Z.T. Engineering classification of jointed rock masses / Z.T. Bieniawski, B. Celada, I. Tardaguilla // Transaction of the South African Institution of Civil Engineers. –1973. –Vol. 15(12). – P. 335 - 344. - DOI:10.1201/9781351168489-6
47. Bieniawski, Z.T. Engineering rock mass classifications / Z.T. Bieniawski - ISBN 0-471-60172-1 / John Wiley and sons, 1989. –252 p.
48. Bucky, P.B. Effect of approximately vertical cracks on the behaviour of horizontally lying roof strata. / P.B. Bucky // The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers – 1933 – p.212-229.
49. Cai, M. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. / M. Cai, P.K. Kaiser, Y. Tasaka, M. Minami // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2007. –Vol. 44. № 2. – P. 247–265. DOI:10.1016/j.ijrmms.2006.07.005
50. Castro, L. A. M. An overview of numerical modelling applied to deep mining / L. Castro, R. Bewick, T. Carter // Innovative numerical modelling in geomechanics. – 2012. – C. 393-414. - DOI:10.1201/b12130-22.
51. Chan, A. H. Computational geomechanics: theory and applications/ A. Chan, M. Pastor, B. Schrefler, T. Shiomi - ISBN 9781118350478 /John Wiley & Sons, 2022 – P. 496.
52. Chen, W. Hydraulic fracturing simulation for heterogeneous granite by discrete element method / W. Chen, H. Konietzky, C. Liu, X. Tan –// Computers and Geotechnics. – 2018. – V.95. – P. 1-15. DOI:10.1016/j.compgeo.2017.11.016.
53. Chen, Y. Application of shallow-hole blasting in improving the stability of gob-side retaining entry in deep mines: A case study / Y. Chen, S. Ma, Y. Yang, N. Beng // Energies. 2019. –Vol. 12. No. 19. – 3623. - DOI:10.3390/en12193623
54. Choi, Y. Interdisciplinary studies for sustainable mining/ Y.Choi // Applied Sciences. – 2023. – T. 13. – №. 7. – C. 4621. DOI:10.3390/app13074621
55. Cong, R. Geomechanical properties of thinly interbedded rocks based on micro-and macro-scale measurements / R.Cong, R. Yang, G. Li, Z. Huang // Rock

Mechanics and Rock Engineering. – 2023. – T. 56. – №. 8. – C. 5657-5675.
DOI:10.1007/s00603-023-03360-w

56. Deb, D. Finite element methods: concepts and applications in geomechanics / D. Deb – ISBN 9788120342958 / New Delhi: Prentice-Hall of India, 2010. – p.269.

57. Deere, D. U. Rock Quality Designation (RQD) after Twenty Years. /D.U. Deere, D.W Deere - ISBN 9058093417 / Report – 1989. – №. WESCRGL891.

58. Deere, D.U. The rock quality designation (RQD) Index in practice / D.U. Deere, D.W. Deere - ISBN 0-8031-0988-1 / Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984, American Society for Testing and Materials, Philadelphia – 1988. – P. 91a-101.

59. Demenkov, P.A. Regularities of Brittle Fracture Zone Formation in the Zone of Dyke Around Horizontal Mine Workings / Demenkov P.A., **Basalaeva P.** // Eng. – 2025. – Vol. 6, № 91. – 12 p. DOI: 10.3390/eng6050091

60. Do, N. Behavior of noncircular tunnels excavated in stratified rock masses Case of underground coal mines / N. Do, D. Dias, V. Dinh, T. Tran, V. Dao, P. Nguyen // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. –2019. – No 11. –P. 99-110. - DOI 10.1016/j.jrmge.2018.05.005

61. Duan, S. Q. An insight into the excavation-induced stress paths on mechanical response of weak interlayer zone in underground cavern under high geostress /S.Q. Duan, G. Liu // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2021. – T. 54. – №. 3. – C. 1331-1354. DOI:10.1088/1755-1315/861/4/042014

62. Jenck, O. Analyse tridimensionnelle en différences finies de l'interaction entre une structure en béton et le creusement d'un tunnel à faible profondeur./ O. Jenk, D. Dias // Geotechnique. 2004. – No 54 (8). – P. 519–528. - DOI:10.1680/geot.2004.54.8.519

63. Jingyuan, W. Numerical analysis on the stability of layered surrounding rock tunnel under the conditions of different inclination angle and thickness / W. Jingyuan - DOI:10.11648/j.ajtte.20190402.14 / American journal of traffic and transportation engineering. – 2019. – No 4 (2). – P. 67-74.

64. Griffith, A. A. "VI. The phenomena of rupture and flow in solids." / A.A. Griffith – DOI: 10.1098/rsta.1921.0006 //Philosophical transactions of the royal society of London. Series A, containing papers of a mathematical or physical character - 1921. - Vol. 221. – №582-593. – P.163-198.
65. Grimstad, E. Updating the Q-system for NMT. / E. Grimstad, N.R. Barton / roceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete, Fagernes, Norway. – 1993. – p. 46-56.
66. Hebblewhite, B. A review of the geomechanics aspects of a double fatality coal burst at Austar Colliery in NSW, Australia in April 2014 / B. Hebblewhite, J. Galvin - DOI:10.1016/j.ijmst.2016.10.002 // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – T. 27. – №. 1. – C. 3-7.
67. Henk, A. Pre-drilling prediction of the tectonic stress field with geomechanical models / A. Henk - DOI:10.3997/1365-2397.2005021 //First Break. – 2005. – T. 23. – №. 11.
68. Hoek, E. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition / E. Hoek, C.T. Caranza-Torres, B. Corcum / /Proceedings. of the North American Rock Mechanics Society (NARMSTAC'2002). –2002. – v. 1. – pp. 267-273
69. Hoek, E. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of the Athens Schist Formation / E. Hoek, P. Marinos, M. Benissi - – DOI: 10.1061/AJGEB6.0001029. / Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 1998. – T. 57. – C. 151–160.
70. Hoek, E. Empirical strength criterion for rock masses / E. Hoek, E. T. Brown / Journal of the Geotechnical Engineering Division. – 1980. – № 9 (106). – C. 1013–1035.
71. Hoek, E. The Hoek-Brown failure criterion and GSI (2018 Edition)/ E. Hoek, E.T. Brown - DOI:10.1016/j.jrmge.2018.08.001 / Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, – 2019, –Vol. 11. № 3, – P. 445–463
72. Irwin, G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. / G. Irwin - DOI: 10.1115/1.4011547 / Journal of applied mechanics, –1957. – Vol. 24. – pp 361-364.

73. Kajzar, V. Verifying the possibilities of using a 3D laser scanner in the mining underground / V. Kajzar, R. Kukutsch, N. Heroldova - DOI:10.13168/AGG.2015.0004 / Acta Geodynamica et Geomaterialia. – 2015. – T. 12. – №. 1. – C. 51-58.
74. Labuz, J. Mohr–Coulomb Failure Criterion / J. Labuz, A. Zang - DOI:10.1007/s00603-012-0281-7 // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2012. – vol. 45. – p. 975-979
75. Laouafa, F. Underground rock dissolution and geomechanical issues / F. Laouafa, J. Guo, M. Quintard - DOI:10.1007/s00603-020-02320-y // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2021. – T. 54. – №. 7. – C. 3423-3445.
76. Laubscher, D.H. The importance of geomechanics classification of jointed rock masses in mining operations., (ed. Z.T. Bieniawski) / D.H. Laubscher // Exploration for rock engineering Cape Town: Balkema - 1976 – vol. 1, pp. 119-128.
77. Li, C. C. Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines / C.C. Li, P. Mikula, B. Simer, B. Hebblewhite, W. Joughin , X. Feng, N. Xu - DOI:10.1016/j.jrmge.2019.06.001 // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2019. – Vol. 11. Issue 5. – P. 1110–1118
78. Li, P. Present-day stress state and fault stability analysis in the capital area of China constrained by in situ stress measurements and focal mechanism solutions / P. Li, F. Ren, M. Cai, Q. Guo, S. Miao - – DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.104007 // Journal of Asian Earth Sciences. – 2019. – T. 185. – C. 104007.
79. Li, T. Geomechanical types and mechanical analyses of rockbursts / T. Li, C. Ma, M. Zhu, L. Meng - DOI:10.1016/j.enggeo.2017.03.011 //Engineering Geology. – 2017. – T. 222. – C. 72-83.
80. Li, Y. Determination of mining-induced stresses using diametral rock core deformations / Y. Li, H.S Mitri - DOI:10.1007/s40789-022-00549-2 // International Journal of Coal Science & Technology. – 2022. – T. 9. – №. 1. – C. 80.
81. Ma, W. Study on representative volume elements considering inhomogeneity and anisotropy of rock masses characterised by non-persistent fractures / W. Ma, H. Gen,

W. Zhang, C. Tan - DOI:10.1007/s00603-021-02546-4 //Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2021. – T. 54. – №. 9. – C. 4617-4637.

82. Martini, C.D. Observations of brittle failure around a circular test tunnel, / C.D. Martini, R.S. Read, J.B Martino - DOI: 10.1016/S1365-1609(97)90200-8 // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 1997 – Vol. 34, Issue 7, – Pages 1065-1073.

83. Müller, B. Regional patterns of tectonic stress in Europe / B. Müller - DOI:10.1594/GFZ // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1992. – T. 97. – №. B8. – C. 11783-11803.

84. Nunes, M.A. A study on the effects of overlying soil strata on the stresses developing in a tunnel lining / M.A Nunes, M.A. Meguid - DOI:10.1016/j.tust.2009.04.002 // Tunnelling and underground space technology. – 2009 - No 24. - P. 716–722

85. Petlovanyi, M. Influence of waste rock dump placement on the geomechanical state of underground mine workings / M. Petlovanyi, K. Sai, D. Malashkevych, V.V. Popovych - DOI:10.1088/1755-1315/1156/1/012007 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, - 2023. – T. 1156. – №. 1. – C. 012007.

86. 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.

87. Qin, QH. Boundary Element Method / QH. Qin, J. Yang - DOI:10.1007/978-0-387-89498-0_5 // Special Topics in the Theory of Piezoelectricity. – 2009. – P. 137-16

88. Rajabi, M. The present-day stress field of New South Wales, Australia / M. Rajabi, M. Tingay, O. Heidbach – DOI: 10.1080/08120099.2016.1135821 // Australian Journal of Earth Sciences. – 2016. – T. 63. – № 1. – C. 1–21.

89. Ramamurthy, T. Ramamurthy T. A realistic approach to estimate stand-up time / T. Ramamurthy/ ISRM-11CONGRESS-2007-166 / ISRM Congress. – ISRM, 2007.

90. Renani, H. R. Cohesion degradation and friction mobilization in brittle failure of rocks. / H.R Renani, C.D. Cohesion - DOI:10.1016/j.ijrmms.2018.04.003 // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. – 2018. – Vol. 106. - pp. 1–13
91. Rong, P. Study of mechanical properties and failure characteristics of combined rock mass with weak interlayer / P. Rong, Y. Zuo, J. Lin, Q. Chen - DOI:10.1007/s40948-021-00328-4 // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. – 2022. – T. 8. – №. 3. – C. 89.
92. Safaei S. Modeling methods and constitutive laws for nonlinear analysis of steel moment-resisting frames / S. Safaei, M. Shamlu, A. Vakili – DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000376. // Journal of Constructional Steel Research. – 2022. – T. 199. – C. 107583.
93. Simonetti, M. Unravelling the development of regional-scale shear zones by a multidisciplinary approach: The case study of the Ferrière-Mollières Shear Zone (Argentera Massif, Western Alps) / M. Simonetti, R. Carosi, C. Montomoli, R. D. Law, J. M. Cottle – DOI: 10.1016/j.jsg.2021.104399. // Journal of Structural Geology. – 2021. – T. 149. – C. 104399.
94. Sun, X. Physical modeling of deformation failure mechanism of surrounding rocks for the deep-buried tunnel in soft rock strata during the excavation / X.Sun, F. Chen, C. Miao, P. Song - DOI:10.1016/j.tust.2018.01.022 // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2018. – No 74. – P. 247–261.
95. Sleep, N. H. Ambient tectonic stress as fragile geological feature / N.H Sleep - DOI:10.1002/2014GC005426 // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2014. – T. 15. – №. 9. – C. 3628-3644.
96. Sołowski, W.T. Chapter Two - Material point method: Overview and challenges ahead / W.T. Sołowski, M. Berzins, W.M. Coombs, J.E. Guilkey, M.Moller, Q.A. Tran, T. Adibaskoro, S. Seyedan, R. Tielen, K. Soga – DOI:10.1016/bs.aams.2020.12.002// Advances in Applied Mechanics. – 2021. – V. 54. – P. 113-204.

97. Tang, C. A Numerical simulation of loading inhomogeneous rocks / C.A. Tang, Y.F. Fu, S.Q. Kou, P.A. Lindqvist – DOI: 10.1016/S0148-9062(98)00014-X // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1998. – T. 35. – №. 7. – C. 1001-1007.
98. Terzaghi, K. Origin and functions of soil mechanics / K. Terzaghi – DOI: 10.1061/TACEAT.0006957 // Transactions of the American Society of Civil Engineers. – 1953. – T. 118. – № 2. – C. 666–696.
99. Wawersik, W. R., A study of brittle rock fracture in a laboratory compression experiments.// W.R. Wawersik, C. Fairhurst DOI:10.1016/0148-9062(70)90007-0 // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts – 1979, – №7, – pp.561-575
100. Wickham, G.E. Support determination based on geologic predictions. / G.E. Wickham, H.R. Tiedemann, E.H. Skinner / Proc. North American rapid excav. tunneling conf., Chicago. – 1972 – vol.1- pp 43-64.
101. Yoshimoto K. Results of a Tunnel Excavation By Means of NATM Method / K. Yoshimoto, Y. Doi - ISRM-IS-1981-156 /ISRM International Symposium. – ISRM, 1981.
102. Zang, A. World stress map database as a resource for rock mechanics and rock engineering / A. Zang, O. Stephansson, O. Heidbach, S. Janouschkowetz – DOI: 10.1007/s10706-012-9505-6 // Geotechnical and Geological Engineering. – 2012. – T. 30. – C. 625–646.
103. Zevgolis, I. E. Geotechnical characterization of mining rock waste dumps in central Evia, Greece / I.E Zevgolis - DOI:10.1007/s12665-018-7743-5 // Environmental Earth Sciences. – 2018. – T. 77. – №. 16. – C. 566.
104. Zhang, D.M. 101. Influence of multi-layered soil formation on shield tunnel lining behavior / D.M. Zhang, H.W. Huang, Q.F. Hu, F. Jiang – DOI:10.1016/j.tust.2014.12.011 // Tunnelling and underground space technology – 2015. – No 47. – P.123–135
105. Zhang, J., Evaluation and analysis of the causes of a landslide and treatment measures during the excavation of a tunnel through a soil-rock interface / J. Zhang,

M. Kuang, Y. Zhang, T. Feng – DOI:10.1016/j.engfailanal.2021.105784 // Engineering failure analysis. – 2021. – No 130. – 105784.

106. Zhang, X., Experimental study on contact erosion at the interface between the weak interlayer and the crushed zone / X. Zhang, A. Benamar, Y. Luo – DOI:10.1016/j.gete.2023.100492 // Geomechanics for Energy and the Environment. – 2023. – T. 36. – C. 100492.

107. Zheng, Y. Tectonic evolution of convergent plate margins and its geological effects / Y. Zheng, Y. Chen, R. Chen, L. Dai – DOI: 10.1007/s11430-021-9940-x. // Science China Earth Sciences. – 2022. – T. 65. – № 7. – C. 1247 1276.

108. Zhou, PB. Finite Difference Method /P.B. Zhou - DOI:10.1007/978-3-642-50319-1_3. // Numerical Analysis of Electromagnetic Fields. –1993. – P. 63-94.

109. Zhou, Y. Advance in Rock Dynamics and Applications. / Y. Zhou, J. Zhau; CRS Press. – 2011, – p. 514.

110. Zienkiewicz, O.C. Time-dependent multilaminate model of rock - A numerical study of deformation and failure of rock masses. / O.C. Zienkiewicz, G.N. Pande – DOI:10.1002/nag.1610010302 // International journal for numerical and analytical methods on geomechanics – 1997, – Vol. 1, – P. 219-247

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2023688148

**Программа для прогнозирования проявлений горного
давления, вызванных сложным литологическим
строением**

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

Авторы: *Басалаева Полина Вячеславовна (RU), Куранов Антон
Дмитриевич (RU), Мельников Никита Ярославович (RU)*

Заявка № **2023687662**
Дата поступления **12 декабря 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **20 декабря 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2023688148**

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2023688148 Дата регистрации: 20.12.2023 Номер и дата поступления заявки: 2023687662 12.12.2023 Дата публикации и номер бюллетеня: 20.12.2023 Бюл. № 12	Автор(ы): Басалаева Полина Вячеславовна (RU), Куранов Антон Дмитриевич (RU), Мельников Никита Ярославович (RU) Правообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (RU)
---	--

Название программы для ЭВМ:

Программа для прогнозирования проявлений горного давления, вызванных сложным литологическим строением

Реферат:

Программа позволяет прогнозировать условия, при которых произойдет проявление горного давления в подземных условиях при разработке и эксплуатации рудных месторождений сложного литологического строения с помощью искусственных нейронных сетей. В программе реализованы следующие функции: импорт данных в формате .csv; факторный анализ методом, основанным на искусственных нейронных сетях; расчет показателей из математической статистики; расчет оценок качества прогнозных моделей. Программу можно использовать в образовательной деятельности по следующим дисциплинам: «Геофизика», «Механика подземных сооружений», «Геомеханика» для специальностей: 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений»; 21.05.04 «Горное дело»; 21.05.02 «Прикладная геология»; 21.05.03 «Технология геологической разведки».

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 58 КБ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения



АО «Гипроцветмет»
Звездный бульвар, д. 23, стр. 10, эт. 2, пом. 1
Москва, а/я 25, 129075
Тел.: +7 (495) 600-32-00, e-mail: office@giprocm.ru
ОКПО 00198404, ОГРН 1137746314640
ИНН/КПП 7717750345/771701001

Утверждаю
Управляющий директор
А.Д. Куранов

М.П.

Дата « 28 » 11 2024 г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации аспиранта
Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II,
Басалаевой Полины Вячеславовны, обучающегося по научной специальности 2.8.6.
Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная
теплофизика.

Рабочая комиссия в составе: председателя комиссии - директора по инженерным изысканиям и полевым работам Тимохина Вадима Анатольевича, а также членов комиссии – начальника отдела горных работ Гордымова Александра Николаевича, ведущего инженера отдела горных работ Семенова Александра Сергеевича - составила настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Геомеханическое обоснование способов обеспечения устойчивости выработок в тектонически напряжённом массиве горных пород сложного геологического строения», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы при ведении проектной и экспертной работы в деятельности АО «Гипроцветмет» при разработке технико-коммерческих предложений в части сопровождения проектирования горизонтальных горных выработок в части:

- обоснования состава инженерно-геологических изысканий
- регламентации применения достоверных методик расчета;

- регламентации требований к численному моделированию.

Использование указанных результатов позволяет повысить качество проектирования подземных горных работ, произвести достоверную оценку устойчивости участков горизонтальной горной выработки, расположенных в зоне влияния дайки, и нагрузки на крепление горных выработок, за счет проведенного исследования напряженно-деформированного состояния горных выработок, прогноз возможных проявлений горного давления и их предотвращения, а также изучения возможности применения конечно-дискретной модели для анализа процесса разрушения в окрестности породных обнажений.

По результатам совместных разработок получен 1 патент и опубликовано 2 статьи.

Председатель комиссии

Директор по инженерным изысканиям
и полевым работам



Тимохин В.А.

Члены комиссии:

Начальник отдела горных работ



Гордымов А.Н.

Ведущий инженер отдела горных работ,
канд. техн.наук

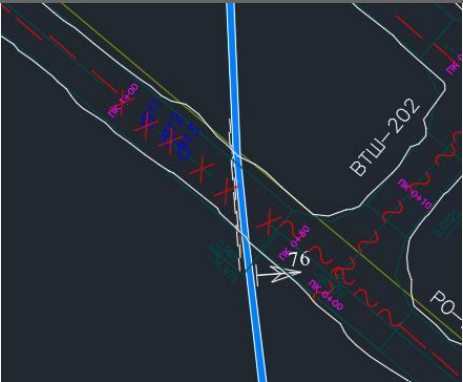
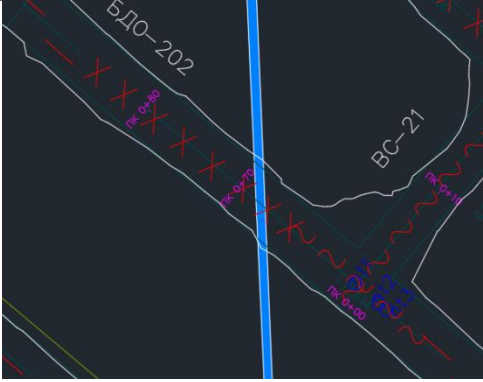


Семенов А.С.

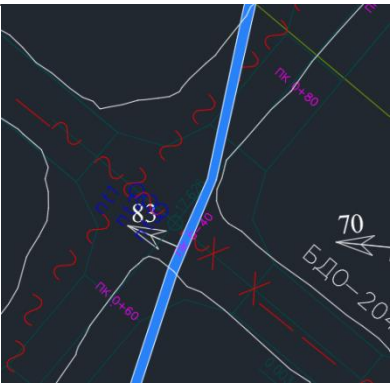
ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты исследования зоны влияния дайки на рудниках Хибинского массива

Таблица В.1 – Зоны влияния даек (составлено автором)

Фрагмент плана горных работ	Выработка	Горизонт	Угол падения, °	Угол простирания, °	Мощность дайки, м	Влияние в лежащем боку/висячем боку, м
	РО-201	-20	76	49	0.6	14/4
	БДО-202	-20	76	41	0.7	17/3

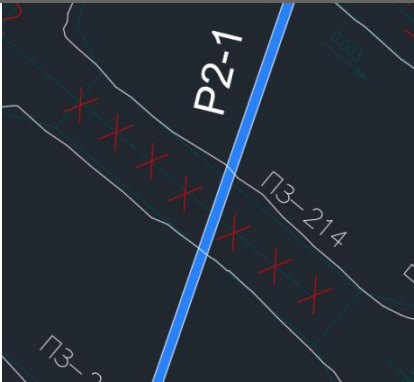
Продолжение таблицы В.1

Фрагмент плана горных работ	Выработка	Горизонт	Угол падения, °	Угол простирания, °	Мощность дайки, м	Влияние в лежащем боку/висячем боку, м
	БДО-203	-20	76-82	49	0.75	33/9
	БДО-204	-20	83	16	0.7	6/0

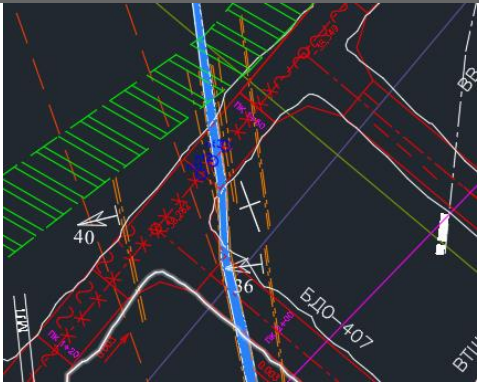
Продолжение таблицы В.1

Фрагмент плана горных работ	Выработка	Горизонт	Угол падения, °	Угол простирания, °	Мощность дайки, м	Влияние в лежащем боку/висячем боку, м
	БДО-211	-20	86	19	0.85	4/1
	ПЗ-213	-20	86	26	0.6	23 (13)/1

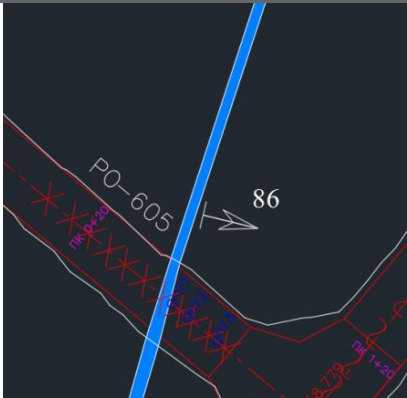
Продолжение таблицы В.1

Фрагмент плана горных работ	Выработка	Горизонт	Угол падения, °	Угол простиранья, °	Мощность дайки, м	Влияние в лежащем боку/висячем боку, м
	ПЗ-214	-20	86	22	0.7	11/8
	БДО-402	-40	81	37	0.65	17/1

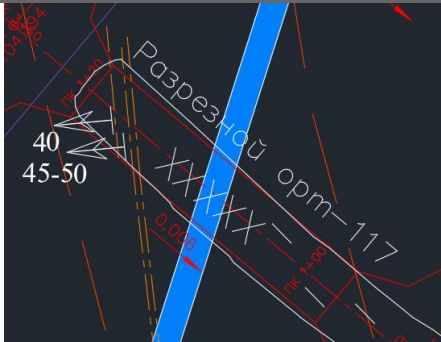
Продолжение таблицы В.1

Фрагмент плана горных работ	Выработка	Горизонт	Угол падения, °	Угол простирания, °	Мощность дайки, м	Влияние в лежащем боку/висячем боку, м
	ОШ-407	-40	80	44	0.85	23/9
	БДО-414	-40	85	21	0.85	6/1

Продолжение таблицы В.1

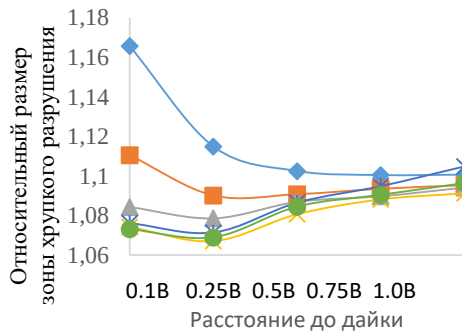
Фрагмент плана горных работ	Выработка	Горизонт	Угол падения, °	Угол простирания, °	Мощность дайки, м	Влияние в лежащем боку/висячем боку, м
	PO-605	-60	86	22	0.85	11/5.5
	PO-609	-60	80	19	1	7/4

Продолжение таблицы В.1

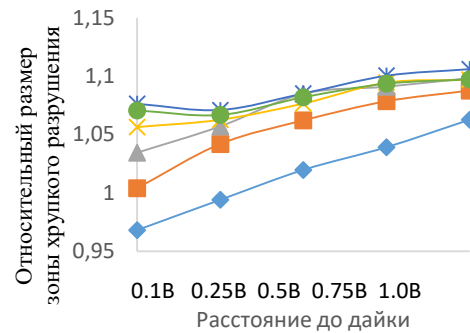
Фрагмент плана горных работ	Выработка	Горизонт	Угол падения, °	Угол простирания, °	Мощность дайки, м	Влияние в лежащем боку/висячем боку, м
	Разрезной орт-117	-100	80-90	24	1.85	3/3

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

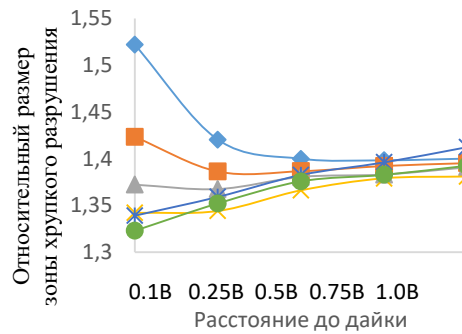
Результаты исследования формирования зоны хрупкого разрушения в висячем и лежащем боках при различных мощностях дайки



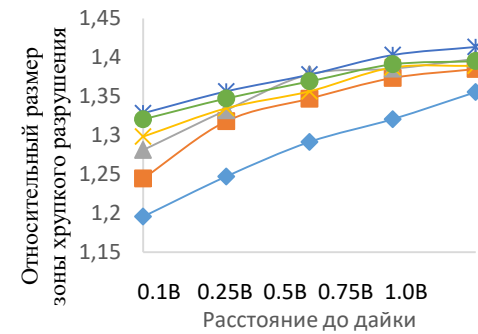
(а)



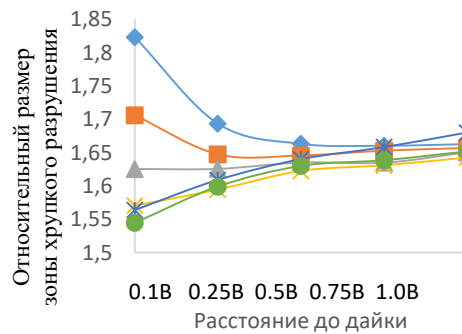
(б)



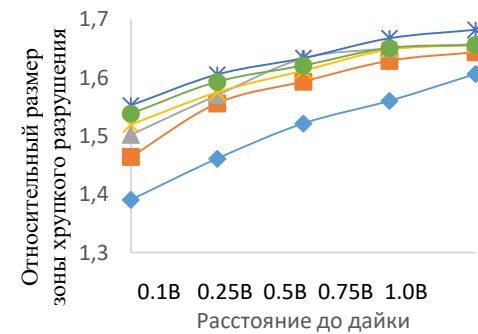
(в)



(г)

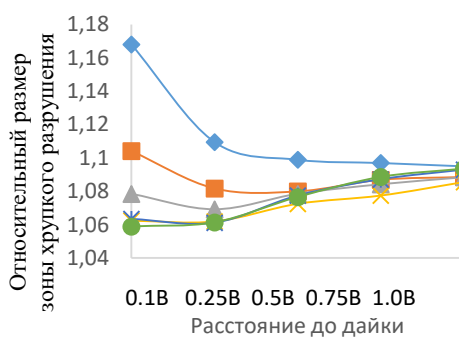


(д)

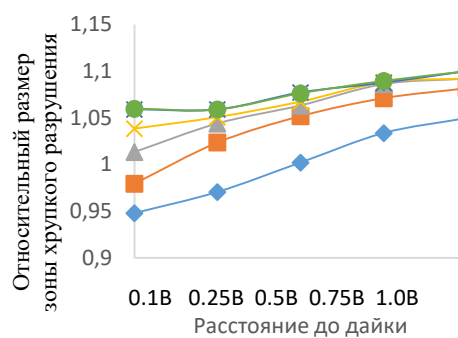


(е)

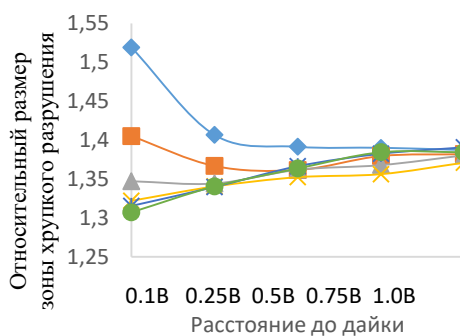
Рисунок Г.1 - Относительный размер зоны хрупкого разрушения в зоне влияния дайки, при мощности дайки 0.5 м в зависимости от угла наклона дайки в лежащем боку и в висячем боку при напряженном состоянии 2:1.5:1, 3:1:1, 4:2:1
(составлено автором)



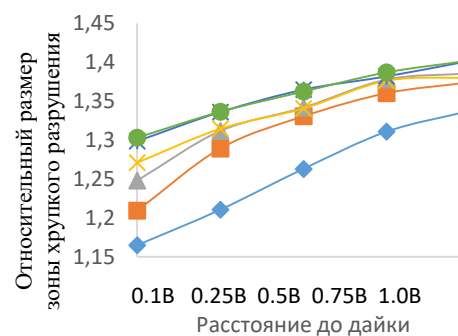
(a)



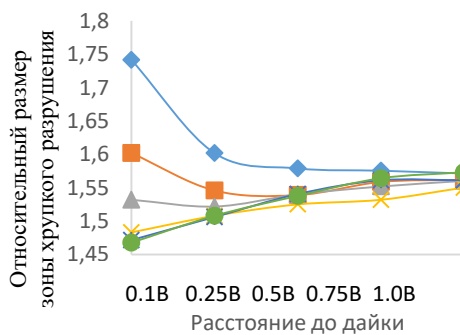
(б)



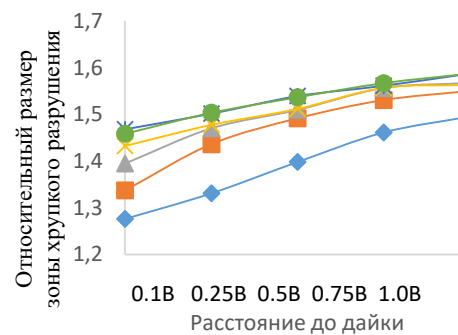
(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок Г.2 - Относительный размер зоны хрупкого разрушения в зоне влияния
 дайки, при мощности дайки 0.75 м в зависимости от угла наклона дайки в
 лежащем боку и в висячем боку при напряженном состоянии 2:1.5:1, 3:1:1, 4:2:1
 (составлено автором)

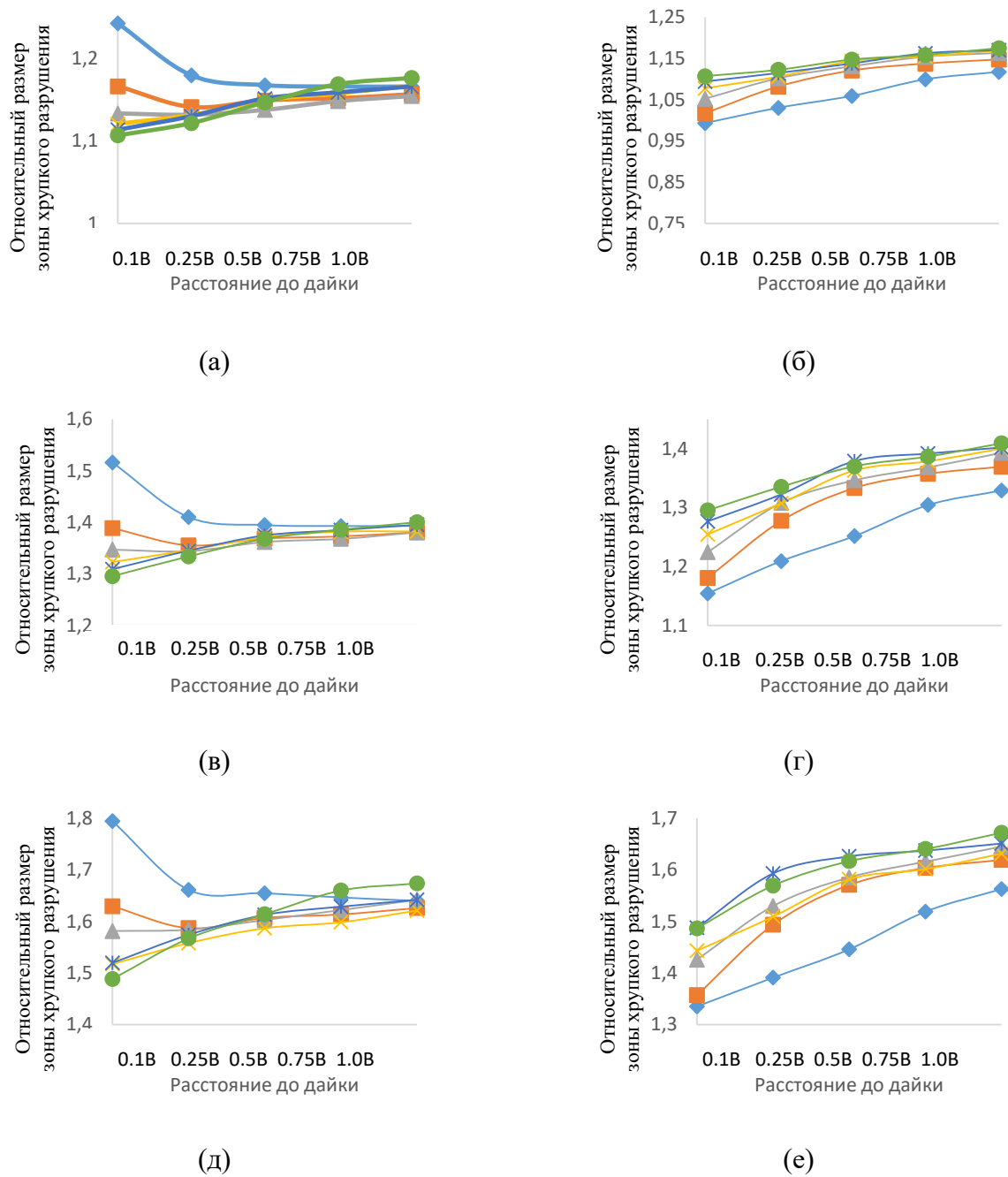
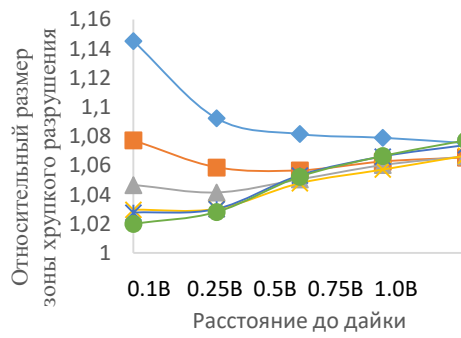
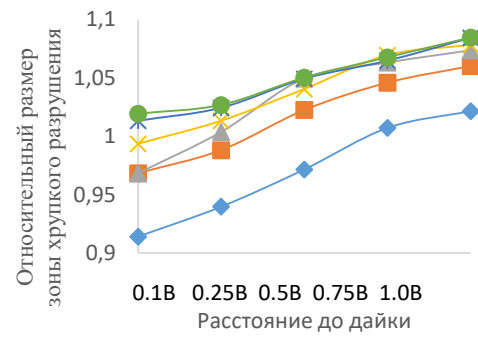


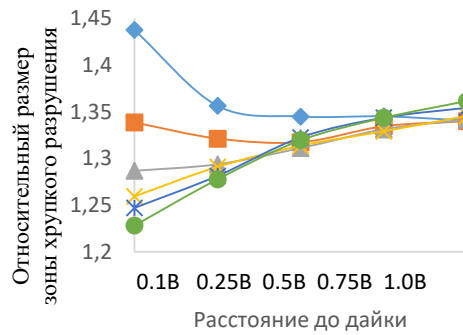
Рисунок Г.3 - Относительный размер зоны хрупкого разрушения в зоне влияния дайки, при мощности дайки 1 м в зависимости от угла наклона дайки в лежащем боку и в висячем боку при напряженном состоянии 2:1.5:1, 3:1:1, 4:2:1
(составлено автором)



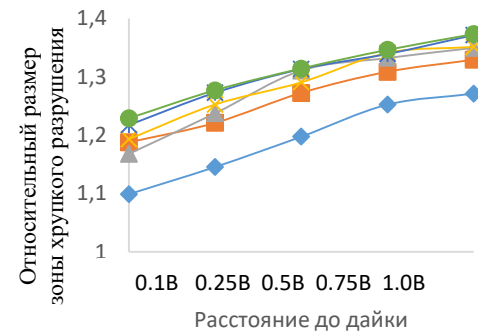
(a)



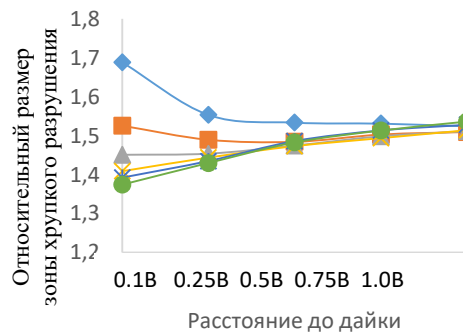
(б)



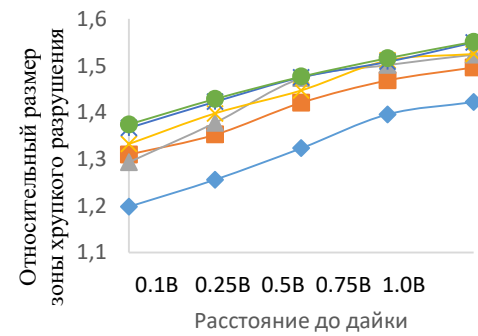
(в)



(г)

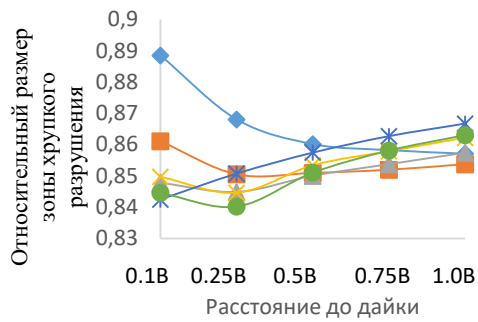


(д)

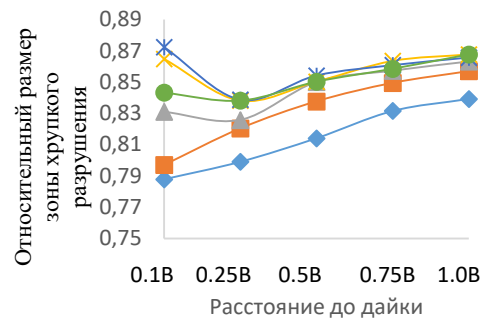


(е)

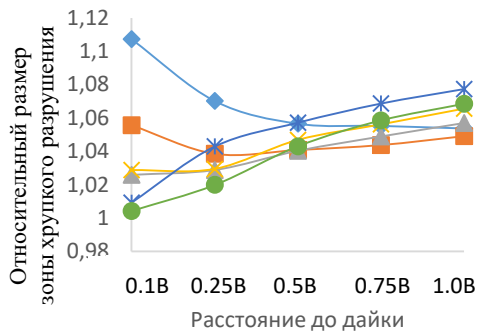
Рисунок Г.4 - Относительный размер зоны хрупкого разрушения в зоне влияния дайки, при мощности дайки 2.5 м в зависимости от угла наклона дайки в лежащем боку и в висячем боку при напряженном состоянии 2:1.5:1, 3:1:1, 4:2:1
(составлено автором)



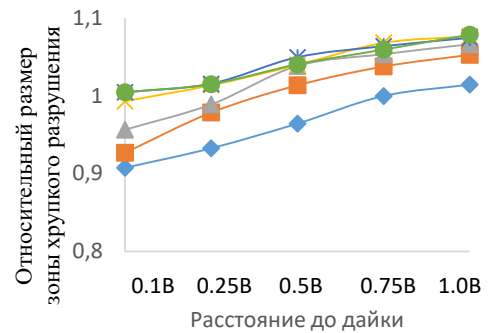
(a)



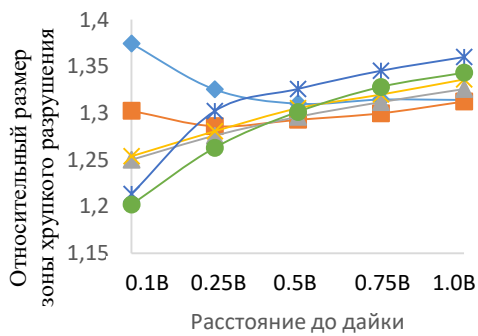
(б)



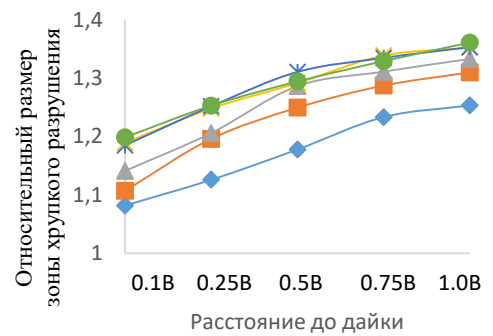
(в)



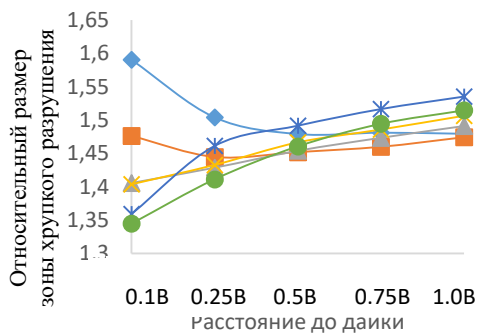
(г)



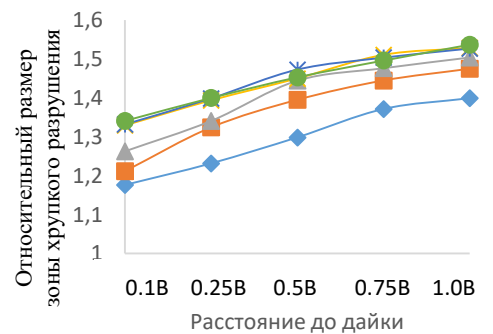
(д)



(е)



(ж)



(з)

Рисунок Г.5 - Относительный размер зоны хрупкого разрушения в зоне влияния дайки, при мощности дайки 5.0 м в зависимости от угла наклона дайки в лежащем боку и в висячем боку при напряженном состоянии, 2:1.5:1, 3:1:1, 4:2:1
(составлено автором)