

На правах рукописи

Басалаева Полина Вячеславовна



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

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Деменков Петр Алексеевич

Официальные оппоненты:

Кашиников Юрий Александрович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра маркшейдерского дела, геодезии геоинформационных систем, заведующий кафедрой;

Трофимов Андрей Викторович

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», департамент по исследованиям и разработкам, заместитель директора.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится **25 декабря 2025 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 октября 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, Wawersik W. R, Baroň I. 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. Вопросами 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 напряжённом 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 напряжённом 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 разработки метода прогноза устойчивости горной выработки, пересекающей дайку.

Научная новизна работы:

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, запредельная 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».

4. Разработана методика прогноза развития геомеханических процессов в окрестности горизонтальной горной выработки, пересекающей дайку 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.

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 лежачего 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, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ научно-технической литературы по теме исследования, описаны существую-

щие подходы к оценке зон хрупкого разрушения горных выработок, расположенных в тектонически напряженных массивах горных пород. Показано, что для осуществления адекватной оценки устойчивости горной выработки, расположенной в зоне влияния дайки, необходимо использовать комплексный подход к оценке зоны хрупкого разрушения.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены результаты исследования натуральных данных горных выработок. Проведен анализ форм потери устойчивости горных выработок в зоне влияния дайки. На основе проведенных исследований была разработана методика построения численных моделей прогноза геомеханических процессов, происходящих на участках горизонтальных горных выработок сложного геологического строения.

В конце второй главы сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

В третьей главе на основе лабораторных и натуральных данных проведен подбор параметров численной модели, отражающий зависимость деформационных характеристик от размера зоны хрупкого разрушения. Получены основные зависимости развития размеров зон хрупкого разрушения для различных параметров даек. Приведено обоснование зоны влияния дайки, при этом размер зоны хрупкого разрушения вблизи дайки многократно превышает величину разрушения вне зоны её влияния.

В результате проведенных испытаний установлена необходимость учета дайки при определении напряженно-деформированного состояния массива, а также размера зоны хрупкого разрушения и размера зоны влияния дайки.

В четвертой главе произведен прогноз зоны хрупкого разрушения в приконтурном массиве горных выработок, разработана методика расчета зоны хрупкого разрушения, а также зоны влияния геологических неоднородностей для горизонтальных горных выработок, пересекающих дайки. Обосновано использование динамических крепей в условиях развития напряженно-деформированного состояния в зоне влияния даек. Предложены практические рекомендации по обеспечению устойчивости горных выработок, пересекающих дайки, в тектонически напряженных массивах.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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 лежачего и пригрузки со стороны висячего боков, параметры которых необходимо определять численным моделированием с заданием неоднородности в явном виде.

Дайка в переводе с английского означает «стена из камня». В геологии этот термин обозначает интрузивное геологическое тело, длина которого во много раз превышает его мощность. Зачастую дайки имеют большую прочность и жесткость относительно массива горных пород, что приводит к локальным изменениям напряженно-деформированного состояния приконтурного массива.

Для оценки зоны хрупкого разрушения вблизи дайки было осуществлено численное моделирование, в ходе которого

были созданы численные модели горизонтальных горных выработок, расположенных в массиве горных пород, пересеченных дайкой. Модели были верифицированы на натурных данных маркшейдерских съемок горных выработок. На основе полученных данных была подобрана математическая модель, учитывающая разупрочнение пород (1) и (2).

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

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

где c_i – начальное значение сцепления, МПа; c_r – остаточная величина сцепления, МПа; ε_p – эквивалентные пластические деформации; ε_r – эквивалентные пластические деформации на момент достижения остаточной прочности; φ_i – начальное значение угла внутреннего трения, град; φ_r – остаточная величина угла внутреннего трения на момент разрушения всех цементационных связей, град.

Численная модель состоит из сводчатой горизонтальной горной выработки и массива, состоящего из вмещающих пород и пород дайки.

Геологическая неоднородность пересекает выработку по трассе (рисунок 1) в плоскости перпендикулярной оси выработки. Мощность дайки варьируется в диапазоне от 0.1В до 1.0В, где В – ширина выработки; α – угол наклона дайки изменялся от 0 до 90°. Результаты определения зоны хрупкого разрушения были представлены в виде относительных величин и приведены в таблице 1. Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что при пологих углах падения геологической

неоднородности происходит ассиметричное перераспределение напряженного состояния в зоне влияния, которая уменьшается при увеличении угла падения дайки.

В результате проведения расчетов было выявлено, что при увеличении угла падения дайки зона хрупкого разрушения в зоне ее влияния уменьшается, а при уменьшении мощности локально размер зоны хрупкого разрушения увеличивается. Для разработки прогнозной модели была выведена зависимость размера зоны хрупкого разрушения от геометрических параметров дайки и напряженного состояния массива (3):

$$h_{\text{хр}} = (1,15 + 0,03m^{0,5})(0,5k)^{0,6-0,07m}(1 - 0,022(\alpha - 15)) \quad (3)$$

где m – мощность дайки, м, k – коэффициент, учитывающий напряженное состояние массива, который определяется из соотношения $k = \sigma_d / \sigma_c$; α – угол падения дайки, град.

Для инженерных расчетов рекомендуется следующая зависимость (4).

$$h_{\text{хр}} = 1,15(0,5k)^{0,6}(1 - 0,022(\alpha - 15)) \quad (4)$$

Данную методику оценки размеров зоны хрупкого разрушения следует применять в качестве предварительной оценки зоны хрупкого разрушения. Полученная в ходе исследования зависимость может использоваться при мощностях дайки до 1В и углах падения от 15° до 90°.

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

Зона влияния дайки определяется как линейный размер от места перераспределения напряжений в связи с приближением к дайке до контакта дайки и вмещающего массива

Оценка зоны влияния дайки производилась для выработок, пересекающих дайку мощностью от 0.1В до 1В, под углами падения и простирания в пределах 30° до 90°, как наиболее вероятный согласно геологическим условиям, так же изменялось направление пересечения дайки со стороны висячего и лежащего бока.

Для прогноза зоны влияния было произведено поэтапное моделирование с целью анализа формирования зоны влияния дайки. Принципиальная диаграмма формирования напряженного состояния при приближении к дайке отображена на рисунке 2. Из диаграммы видно, что перераспределение напряженно-деформированного состояния происходит ещё до непосредственного пересечения дайки. При приближении к дайке напряжения на контуре выработки постепенно нарастают, а непосредственно перед контактом с дайкой происходит резкое повышение напряженного состояния, что создает благоприятные условия для начала хрупкого разрушения.

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 (рисунки 3 и 4).

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.

Направление пересечения дайки влияет на формирование зоны влияния дайки только относительно угла падения (рисунок 5). Согласно результатам, полученным в диссертации, зону влияния можно рассчитать по формуле 5:

$$Z = 1,2 Z_{\alpha 90} D k_{\alpha d} k_{\alpha s} \quad (5)$$

где $Z_{\alpha 90}$ – зона влияния дайки при угле 90° , м; D – коэффициент, характеризующий направление подсечки дайки, определяется при направлении пересечения со стороны висящего бока $D = 1$ и со стороны лежащего бока соответственно по таблице 2 в зависимости от напряженного состояния массива.

Таблица 2 – Определение коэффициента D

$\alpha, ^\circ$	$k_\sigma = 2$	$k_\sigma = 3$	$k_\sigma = 4$
0	3,03	3,20	4,36
15	2,60	2,75	3,64
30	2,17	2,30	2,96
45	1,74	1,85	2,19
60	1,31	1,39	1,47
75	1,17	1,21	1,26
90	1,02	1,02	1,04

где $k_{\alpha d}$ – коэффициент, зависящий от угла падения и определяемый по зависимости (6):

$$k_{\alpha d} = -2,1 \cdot 10^{-5} \alpha^2 + 4,4 \cdot 10^{-3} \alpha + 0,78 \quad (6)$$

$k_{\alpha s}$ – коэффициент, учитывающий угол простирания дайки и определяемый по зависимости (7):

$$k_{\alpha s} = 1,52 \cdot 10^{-4} \beta^2 - 2,47 \cdot 10^{-2} \beta + 2 \quad (7)$$

Предлагаемая методика оценки зоны влияния дайки применима к тектонически напряженным массивам горных пород, в которых величины действующих напряжений превышают $k = 0,5$, что обуславливает возможность возникновения хрупкого разрушения, а также проявлений горного давления.

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.

В ходе исследования были проанализированы данные по оценки устойчивости выработок, пересекающих дайку, а также разработаны меры обеспечения устойчивости в данных горно-геологических условиях.

При пересечении горной выработкой дайки значительное изменение напряженно-деформированного состояния является одним из основных факторов является угол наклона дайки.

Для оценки влияния наклона дайки рассматривалось 3 направления вращения дайки: Типа А (рисунок 6а), Типа Б (рисунок 6б), Типа В (рисунок 6в).

На эпюре пластических деформаций, представленной на рисунке 7, видно, что формирование зоны хрупкого разрушения для всех трех ориентаций изменяется в зависимости от направления пересечения дайки. Сравнительный анализ показывает, что различия между типами пересечений дайки достигают 20–30% по максимальным значениям коэффициентов напряженного состояния (рисунок 8-10) и характеризуются различной степенью локализации зон хрупкого разрушения.

Для определения размера зоны хрупкого разрушения, рекомендуется использовать формулу 8.

$$h_{\text{хр}} = \frac{0,64k_{\text{д}}b\sqrt{H}sk_m}{k_{\alpha}} \quad (8)$$

где k_m – коэффициент, учитывающий мощность дайки; k_{α} – коэффициент, учитывающий угол падения дайки.

Для эффективного восприятия нагрузки в зонах концентрации напряжений, таких как дайки, рекомендуется использовать анкерное крепление, причем при анализе деформационно-силовых характеристик (рисунок 11) было выявлено, что наиболее восприимчивыми к процессам, происходящим в зоне влияния даек, являются динамические анкера. Их механическое

поведение на предельном режиме работы соответствует требуемой несущей способности, способности достигать достаточных значений смещения, а также поглощать энергию разрушения. Также в зонах концентрации массива рекомендуется производить бурение строчек с целью разгрузки массива.

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 0.5В, напряжение в дайке перераспределяется таким образом, что зона влияния дайки уменьшается.

4. При пологих углах залегания даек происходит асимметричное 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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

2. 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

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus):

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

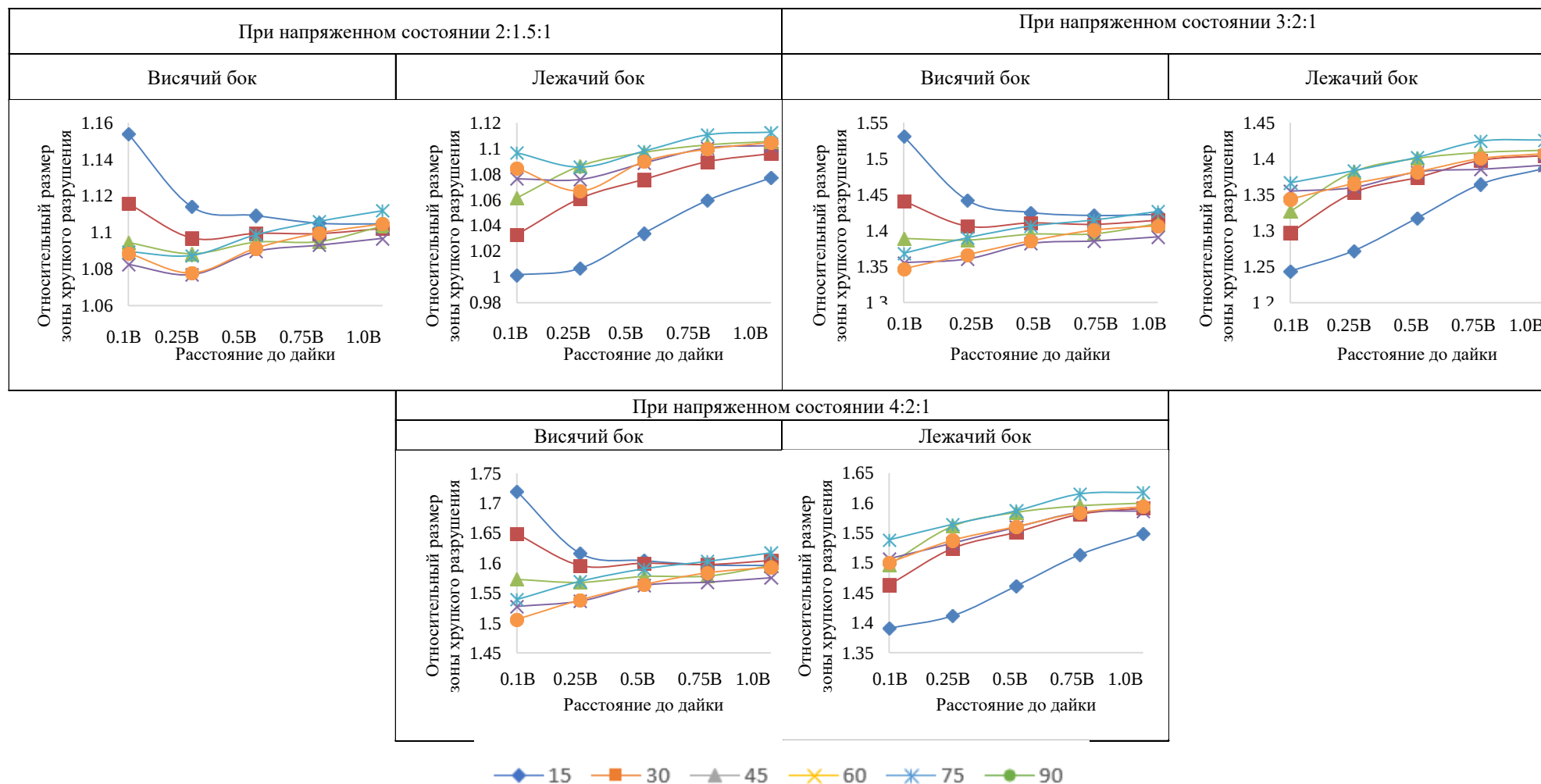
бюллетень. – 2024. – № 3. – С. 17–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_0_17.

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

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. 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.

Таблица 1 - Относительный размер зоны хрупкого разрушения в зоне влияния дайки, в зависимости от угла наклона дайки в лежащем боку и в висячем боку при различном напряженном состоянии



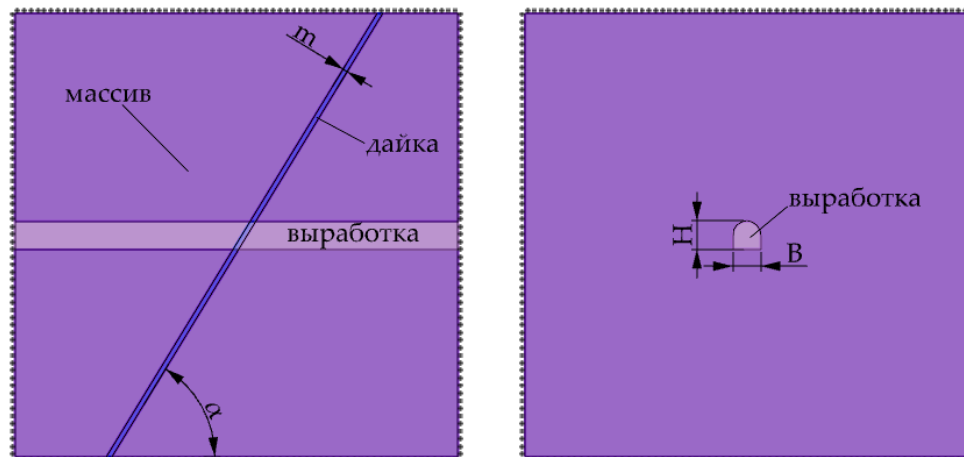


Рисунок 1 - Геометрическая схема к численному моделированию

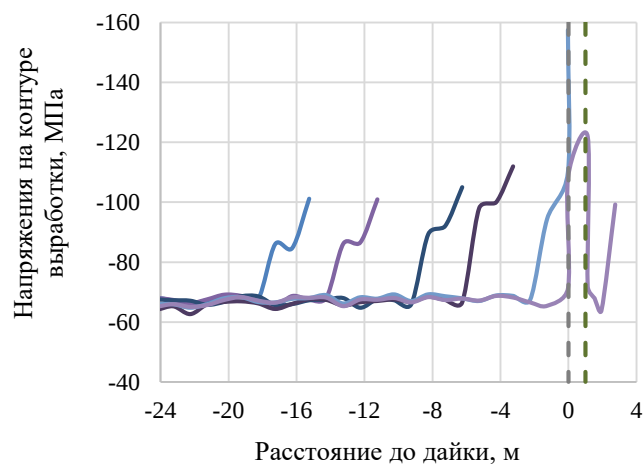


Рисунок 2 - Формирование напряжений на контуре горной выработки при приближении забоя горной выработки к дайке

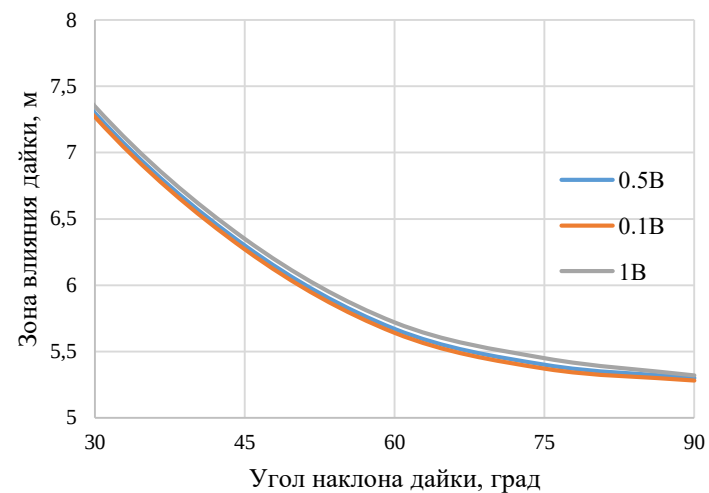


Рисунок 3 – Зависимость зоны влияния дайки от мощности и угла простираия

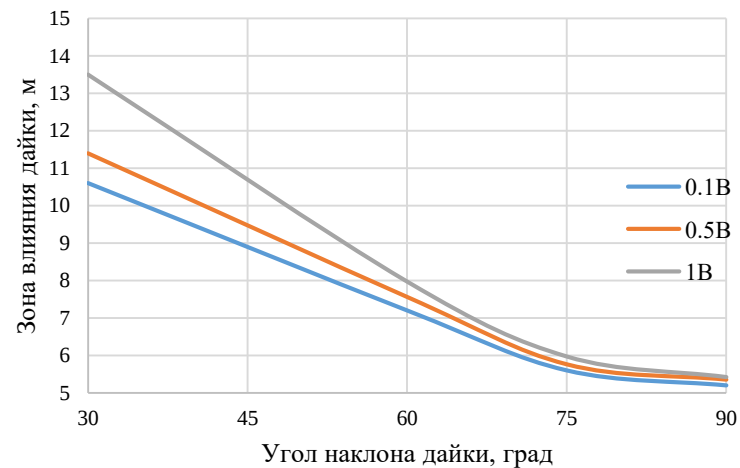


Рисунок 4 - Зависимость зоны влияния дайки от мощности и угла падения

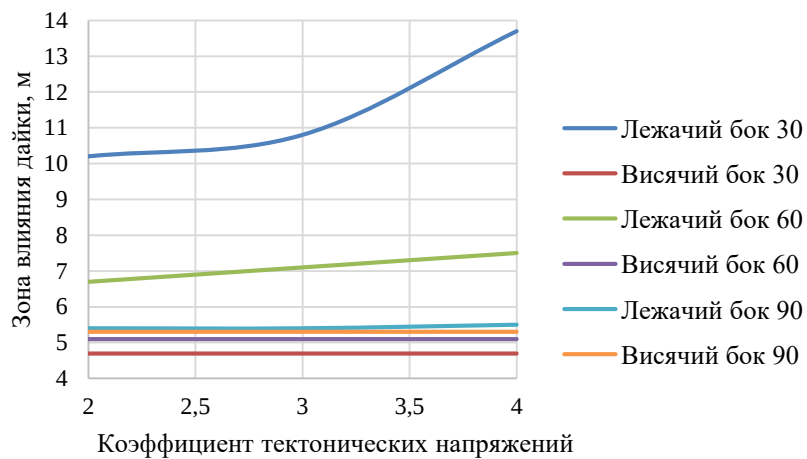


Рисунок 5 – Зависимость зоны влияния дайки от направления проходки, а также от напряженного состояния массива

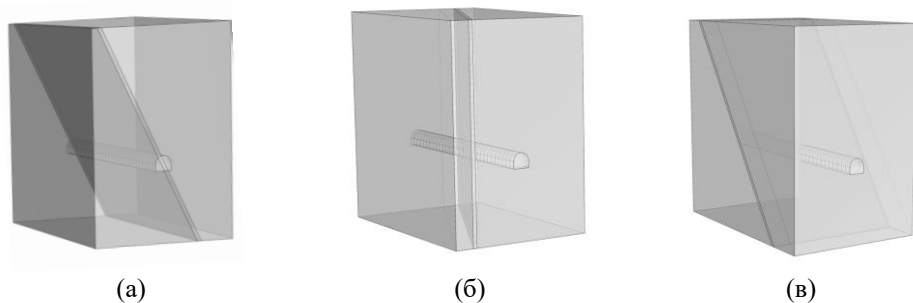


Рисунок 6 – Примеры направления пересечения дайки: а, б, в – Тип А, Б, В соответственно

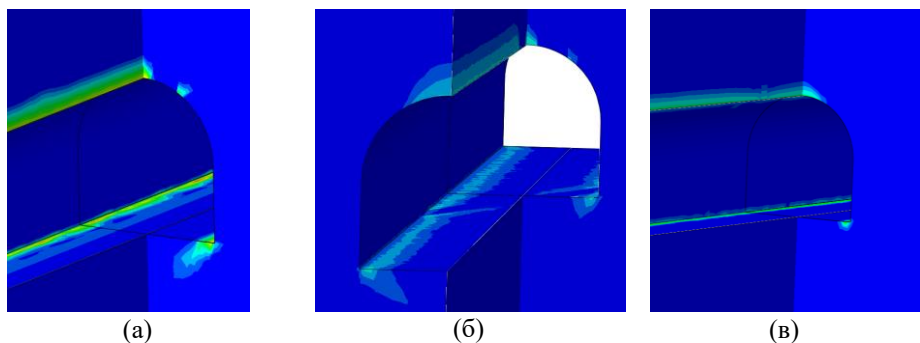


Рисунок 7 - Картина формирования зоны хрупкого разрушения

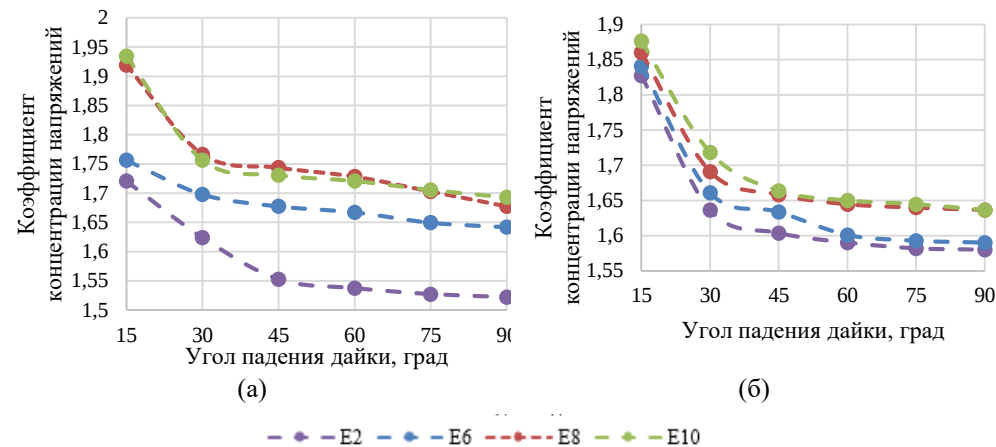


Рисунок 8 - Зависимость концентрации напряжений для Типа А от залегания дайки и E_d/E_m в массиве (а) и в дайке (б)

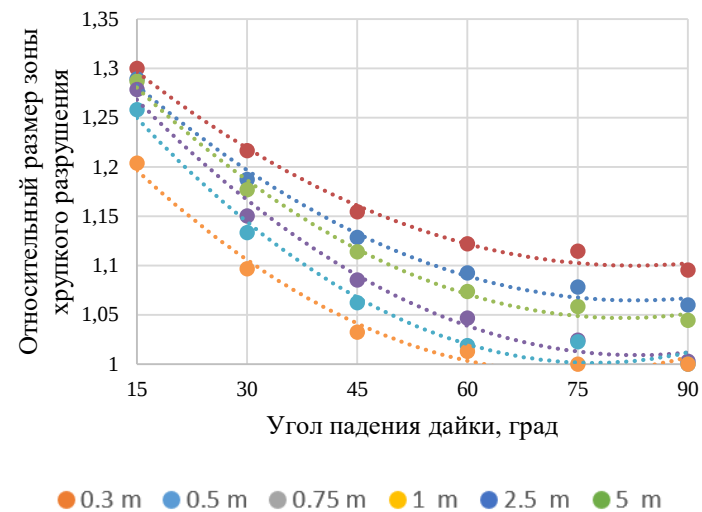


Рисунок 9 - Диаграмма формирования напряженно-деформированного состояния на контуре выработки в зависимости от мощности дайки и угла ее наклона для Типа В

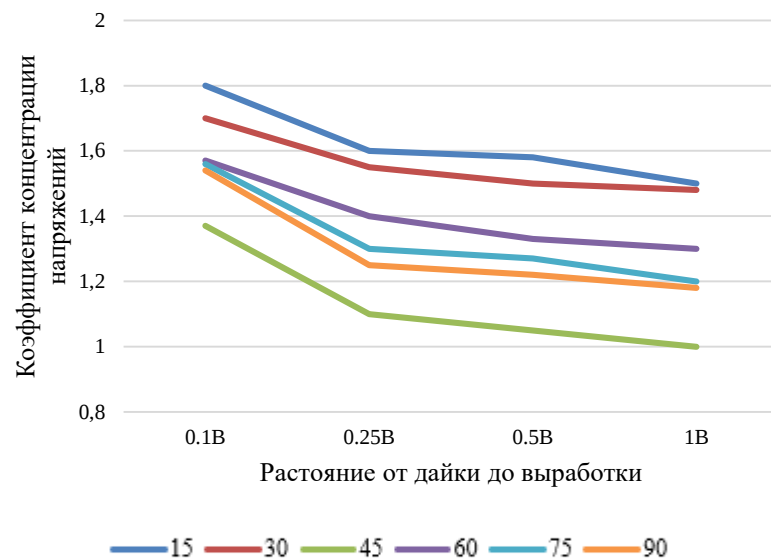


Рисунок 10 - Зависимость напряженного состояния от залегания дайки и угла падения для Типа Б

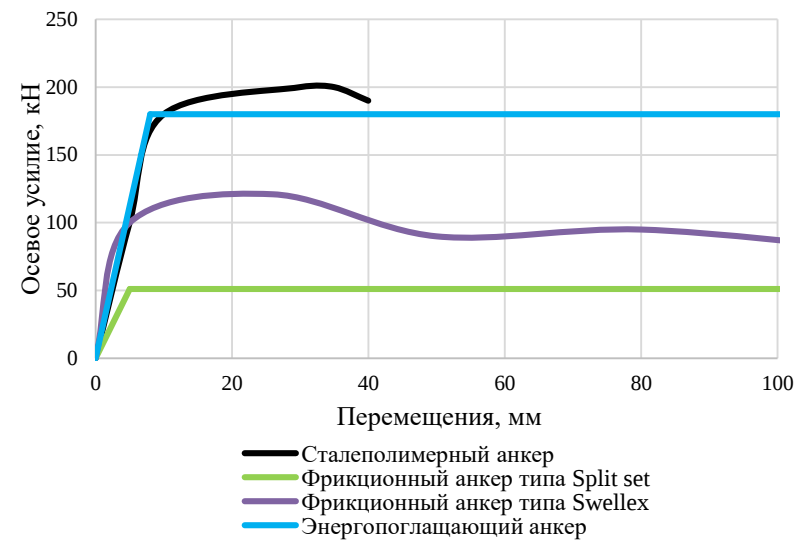


Рисунок 11 – Деформационно-силовые характеристики сталеполимерного, фрикционного и динамического анкеров