

*На правах рукописи*

**Корчак Павел Анатольевич**



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

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

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

Санкт-Петербург – 2024

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

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент

*Карасев Максим Анатольевич*

**Официальные оппоненты:**

*Ашихмин Сергей Геннадьевич*

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

*Румянцев Александр Евгеньевич*

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Институт Гипроникель», главный специалист.

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

Защита диссертации состоится **3 декабря 2024 г. в 11:00** 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, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 3 октября 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ  
Павел Игоревич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

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

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

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

выработок в породах, склонных к хрупкому разрушению, что предопределяет актуальность диссертационной работы.

#### **Степень разработанности темы исследования**

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

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

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности** по п. 2 и п. 5.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Научная новизна работы:**

1. Обоснованы теоретические положения прогноза хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок с учетом основополагающих положений теории

пластического течения упрочняющейся/разупрочняющейся среды.

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

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

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

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

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

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

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

уравнения из теории упругости, пластичности и аспекты механики разрушений, с соответствующим обоснованием.

**На защиту выносятся следующие положения:**

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

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

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

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

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

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

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

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

**Публикации по работе.** Результаты диссертационной работы 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 международную базу данных и систему 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 140 наименований, и 5 приложений. Диссертация изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 32 таблицы.

## **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** проанализированы возможные формы потери устойчивости контура горных выработок в условиях высоконапряженных породных массивов, характерных для условий рудников КФ АО «Апатит». Анализ существующих методических подходов оценки нарушенной зоны позволяет заключить, что единая методика сложна с математической точки зрения и требует избыточное количество геомеханических показателей. Методика должна быть уточнена и упрощена на основании натурных изысканий и математического моделирования, что позволит эффективнее обосновывать параметры мероприятий по обеспечению устойчивости горных выработок. В конце первой главы сформулированы цель и задачи научного исследования.

**Во второй главе** представлены исследования характера развития геомеханических и геодинамических процессов в окрестности горных выработок в условиях высоконапряженных породных массивов. Проведен комплекс натурных исследований, направленный на оценку взаимосвязи размеров зон хрупкого разрушения в окрестности горных выработок с факторами, влияющими на их устойчивость. Обосновано, что процесс хрупкого разрушения для рассматриваемых условий возможно описать с использованием нелинейного критерия прочности Хока-Брауна. Приведена дополненная методика оценки геомеханического состояния породного массива.

**В третьей главе** выполнено обоснование математической модели деформирования и хрупкого разрушения пород и

подбор ее параметров на основании рекомендаций, полученных по результатам натурными исследований с применением нелинейного критерия прочности Хока-Брауна. По результатам установлены характер и параметры зон хрупкого разрушения в зависимости от относительного показателя напряженного состояния породного массива и других факторов. В конце третьей главы сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

**В четвертой главе** представлены практические рекомендации по оценке и обеспечению устойчивости горных выработок в рассматриваемых условиях. Приведена дополненная методика оценки устойчивости горных выработок и их сопряжений в породах, склонных к хрупкому разрушению для условий АО КФ «Апатит».

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

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

Исследование выполнено для условий Хибинских апатит-нефелиновых месторождений. Регион имеет блочное строение, поле напряженного состояния характеризуется тектоническим характером распределения, где величины наибольших горизонтальных напряжений в несколько раз больше вертикальной компоненты напряжений. Для месторождений характерны высокие величины деформационных и прочностных характеристик пород, а также определена их склонность к хрупкому разрушению. Условия разработки месторождений относятся к сложным, удароопасным.

Горное давление в зависимости от горно-геологических условий на апатит-нефелиновых месторождениях может проявляться в виде хрупкого разрушения пород, ограниченного смещения породного контура, формирования зон локальных вывалов пород или сводообразования. В диссертационной работе рассматриваются участки с формированием зон хрупкого разрушения пород. Под такими зонами понимаются участки пород в окрестности горных выработок, где процесс разрушения сопровождается активным развитием микро- и макротрещин преимущественно в направлении, совпадающем с контуром породного обнажения, завершающим процессом которого является раскалывание пород за счет действия сжимающих напряжений и квазистатическое или динамическое обрушение пород в выработанное пространство.

Натурные наблюдения за формированием зон хрупкого разрушения пород показали, что в условиях апатит-нефелиновых месторождений динамические проявления горного давления возникают сразу же за подвиганием забоя горной выработки. С учетом преобладающей горизонтальной компоненты напряжений свод и почва выработки находятся в зоне повышенных сжимающих напряжений, что приводит к формированию трещин растяжения на микроструктурном уровне и проявляется в виде раскалывания пород.

Прогноз параметров зон хрупкого разрушения и характера их развития может осуществляться на основании численного моделирования в рамках механики сплошной среды, положения теории пластического течения и модели хрупкого разрушения пород, которые косвенным образом позволяют описать переход от сплошной среды к дискретной. Моделирование реализовано в программном комплексе Simulia Abaqus.

Прочность породы характеризуется переходной огибающей прочности, формирующейся по нижнему и

верхнему пределам прочности породы. Если напряжения располагаются ниже переходной огибающей прочности, то все деформации упругие и разрушения не происходит. При низких значениях бокового обжатия, микротрещины, формируемые на контакте между частицами породы, могут легко распространяться и вырасти до макротрещин, что и приводит к возникновению процессов хрупкого разрушения в окрестности горных выработок, даже когда напряжения в породном массиве ниже предела прочности на одноосное сжатие образца.

Процесс хрупкого разрушения происходит при постепенном снижении показателя сцепления пород (рисунок 1), вызванном формированием микротрещин на начальной стадии нагружения и мобилизации величины угла внутреннего трения по мере истощения прочности цементационных связей. То есть, прогноз напряженного состояния должен основываться на моделях упрочняющейся / разупрочняющейся среды, где показатели величин сцепления или угла внутреннего трения задаются в виде функциональной зависимости от достигнутой величины пластических деформаций.

В качестве законов упрочнения/разупрочнения среды могут применяться зависимости (1) и (2), предложенные Renami H.R. и Martin C.D:

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

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

Типовая диаграмма упрочнения/разупрочнения среды представлена на рисунке 1.

Результаты прогноза зон хрупкого разрушения пород согласно предложенной модели упрочняющейся/разупрочняющейся среды показали хорошее согласие как по форме, так и по размеру (рисунок 2). Наблюдается хорошая сходимость между результатами численного моделирования, фактической картиной формирования зоны хрупкого разрушения пород в приконтурной зоне горной выработки и данными, представленными в научных исследованиях (Н. Rafiei и др.). Сходимость между результатами натурных наблюдений за формированием зон хрупкого разрушения в условиях КФ АО «Апатит» и результатами прогноза по представленной методике удовлетворительная (рисунок 3).

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

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

Особенности формирования зон хрупкого разрушения пород на рассматриваемых месторождениях изучены в окрестности горных выработок и их сопряжений различного поперечного сечения на основании данных маркшейдерской съемки.

Основными естественными факторами, влияющими на размер зоны хрупкого разрушения, являются прочность

массива при одноосном сжатии  $\sigma_c$  и максимальное значение напряжений на контуре горной выработки  $\sigma_d$ . По результатам натурных наблюдений и численного моделирования определена зависимость между соотношения этих параметров ( $\sigma_d/\sigma_c$ ) и величиной размера нарушенной зоны. Исследования велись в течение 5 лет (2017-2021 г.г.) и включали в себя:

1. Сбор натурных данных о фактических размерах зон хрупкого разрушения на различных рудниках КФ АО «Апатит» и их сопоставление с параметрами сечения горных выработок.

2. Сбор информации о свойствах вмещающего массива, в первую очередь определение прочности пород по геологическому описанию участков.

3. Оценку напряженного состояния на участках измерений на основе регламентирующей документации предприятия, данных службы прогноза и предотвращения горных ударов, данных локальных измерений напряжений методами торцевой и щелевой разгрузок.

4. Уточнение значений напряженного состояния методом численного моделирования.

На рисунке 4 представлена зависимость на основе выполненного комплекса изучения натурных данных, полученных для выработок Кукисвумчоррского, Юкспорского месторождений и месторождения Апатитовый цирк.

Как можно заметить, линейная функция с достаточной точностью описывает получившуюся зависимость, что согласуется с исследованиями других авторов по схожим тематикам. Характер зависимости не меняется от формы и размеров горных выработок и их сопряжений.

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

Приведенную зависимость можно описать следующим образом (3):

$$k_d = 0,58 \frac{\sigma_d}{\sigma_c} - 0,24 \quad (3)$$

Стоит отметить, что для практического использования формулы при определении прогнозных зон хрупкого разрушения необходимо учитывать возможный разброс результатов, коэффициентом запаса не менее 1.15.

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

1. Определение геометрических параметров горной выработки, сопряжения горных выработок.

2. Численное определение относительного показателя напряженного состояния породного массива ( $\sigma_d/\sigma_c$ ).

3. Прогноз зоны хрупкого разрушения с учетом определяемого показателя  $k_d$  и геометрических параметров горной выработки.

Апробация проведена на более чем сорока участках горных выработок Куисвумчоррского, Юкспорского месторождений и месторождения Апатитовый Цирк (рисунки 5, 6). Из представленного сравнения видно, что прогнозная характеристика на основе выведенной зависимости (3) практически совпадает с результатами маркшейдерской съемки, небольшое различие связано с погрешностью методов измерений, но в целом в рамках решения инженерной задачи показана достаточная сходимость с натурными данными.

Проведенные натурные наблюдения позволили установить, что параметры прогнозной зоны хрупкого разрушения, получаемые по зависимости (3), дают приемлемый результат при учете использования достоверных данных о напряженном состоянии горного массива.

**3. Граница зоны хрупкого разрушения над сопряжением горных выработок представляет собой**

**поверхность с  $\Lambda$ -образным поперечным сечением, размер этой зоны обусловлен геометрией сопряжения горных выработок и направлением действия главных напряжений, при этом высота зоны в сравнении с одиночными выработками больше в 1.4-1.8 раз при куполообразном своде сопряжения и до 2.5 раз – при плоском своде сопряжения.**

Для анализа характера формирования зоны хрупкого разрушения в окрестности одиночных выработок и сопряжений горных выработок использованы приведенные ранее данные (рисунок 5, размер зоны хрупкого разрушения выражен в абсолютных единицах). Полученные закономерности позволяют заключить, что в аналогичных условиях размеры зон хрупкого разрушения несколько выше на участках сопряжений горных выработок. В среднем наблюдается увеличение размера зон хрупкого разрушения в 1.4–2.5 раза. Необходимо отметить, что данные не учитывают тип сопряжения и размер породного обнажения, что объясняет больший разброс значений относительно линии тренда по сравнению с результатами для одиночных выработок. Влияние типа сопряжения и его пролета на размер зоны хрупкого разрушения изучено на основании моделирования напряженно-деформированного состояния пород в окрестности породного обнажения с применением, численного в пространственной постановке. Рассмотрено четыре формы сопряжений горных выработок (рисунок 7).

При выполнении расчетов условно принято, что главное минимальное нормальное напряжение совпадает с величиной вертикального напряжения, в то время как главное среднее и максимальное соответствуют наименьшему и наибольшему горизонтальным напряжениям.

Картины формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок приведены на рисунке 8. Размер зоны хрупкого разрушения постепенно

увеличивается по мере приближения к центру сопряжения, в центре сопряжения расширяется и переходит на выработку, расположенную в направлении действия максимальных главных напряжений. Граница зоны хрупкого разрушения формируется в виде поверхности с  $\Lambda$ -образным поперечным сечением. Ее размер обусловлен геометрией сопряжения горных выработок и направлением действия напряжений, что подтверждается результатами моделирования (рисунок 8, таблица 1). Максимальный размер зоны хрупкого разрушения пород формируется в окрестности сопряжения, характеризуемого плоской кровлей (Тип Б). При сводчатой кровле (Тип В) этот размер меньше. Однако, если принять во внимание высоту подъема свода такого сопряжения, формируемого на стадии ведения проходческих работ, можно отметить, что положение верхней границы зоны хрупкого разрушения пород в сопряжениях типа Б и В сопоставимы.

Таблица 1 – Размеры зоны хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжения

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

Размер зоны в сравнении с одиночными выработками больше в 1.4-1.8 раз при куполообразном своде сопряжения, до

2.5 раз – при плоском своде сопряжения это подтверждено численным моделированием и натурными измерениями.

В целом можно заключить, что предложенная модель упругопластической среды с разупрочнением позволила повысить достоверность прогноза деформаций в зоне хрупкого разрушения и ее параметров. Полученные результаты численного моделирования достаточно хорошо как качественно, так и количественно повторяют механизм формирования зоны хрупкого разрушения, наблюдаемый на практике и полученные в натуральных условиях (рисунок 9).

На основании проведенных исследований для определения прогнозного размера зоны хрупкого разрушения пород  $h_{хр}$  на участке горных выработок рекомендуется зависимость (4):

$$h_{хр} = 0.64k_d b s \sqrt{H}, \quad (4)$$

где  $k_d$  – относительный показатель напряженного состояния определяемый по зависимости (3);  $b$  – ширина одиночной горной выработки (для сопряжений – размер наибольшей из сопрягающихся выработок);  $H$  – высота горной выработки / сопряжения;  $s$  – коэффициент формы сопряжения: может принимать значение от 1.4 до 1.8 для сопряжений с куполообразным сводом, и до 2,5 с плоским сводом.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

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

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Получен характер проявления геомеханических процессов в высоконапряженных породных массивах месторождений КФ АО «Апатит» и установлено различие в размерах зон хрупкого разрушения в одиночных выработках и на их сопряжениях.

2. Получены зависимости параметров зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжений различной геометрической конфигурации от их размеров и геомеханического состояния породного массива.

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

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

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

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

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Баранов С.В. Продуктивность техногенной сейсмичности / С.В. Баранов, С.А. Жукова, **П.А. Корчак**, П.Н. Шебалин // Физика Земли. – 2020 – Т. 56(3), С. 326–336.

2. Абрашитов А.Ю. Опыт взаимодействия с горным предприятием при решении проблем геодинамической безопасности / А.Ю. Абрашитов, А.Н. Шабаров, **П.А. Корчак**, А.Д. Куранов // Горный журнал. – 2023. - №5. – с. 40-48. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.06.

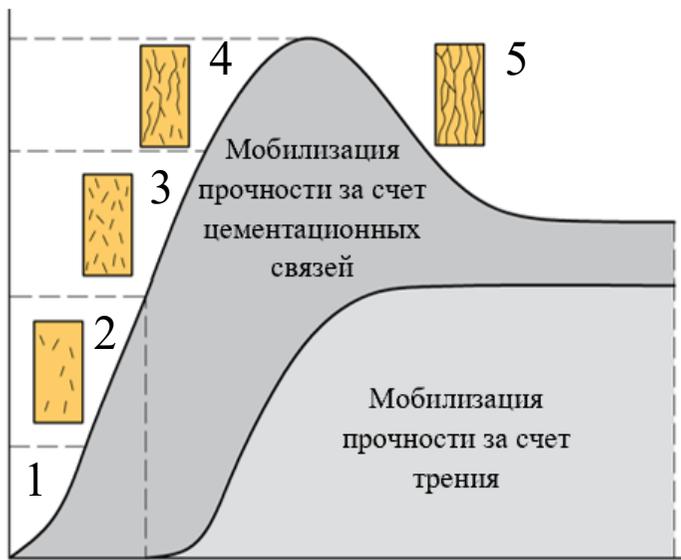
*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

3. **Корчак П.А.** Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 85–98. DOI: 10.25018/0236 1493 2021 5 0 85.

4. **Корчак П.А.** Геомеханическое обоснование формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок рудников АО «Апатит» / П.А. Корчак, М.А. Карасев // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15, № 1. С. 67–80. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80.

*Патенты:*

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619358. Российская Федерация. Программа для расчета критерия JRC для единичного нарушения на основе анализа растрового изображения: № 2024619358: заявл. 03.04.2024: опубл. 23.04.2024 / заявитель СПГУ – 1 с.



1 – зона закрытия существующих микротрещин; 2 – зона начала развития микротрещин; 3 – зона интенсивного развития микротрещин; 4 – пиковая прочность; 5 – зона разупрочнения пород

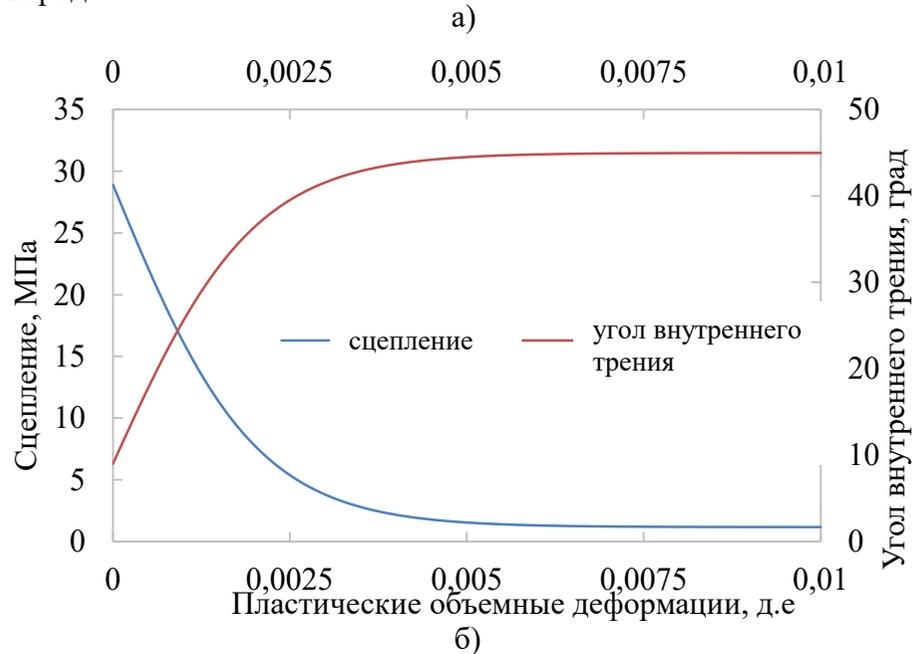


Рисунок 1 – Структурная модель деформирования и разрушения пород по Martin C.D. (а) и характерные законы пластического упрочнения/разупрочнения пород для условий КФ АО «Апатит» (б)

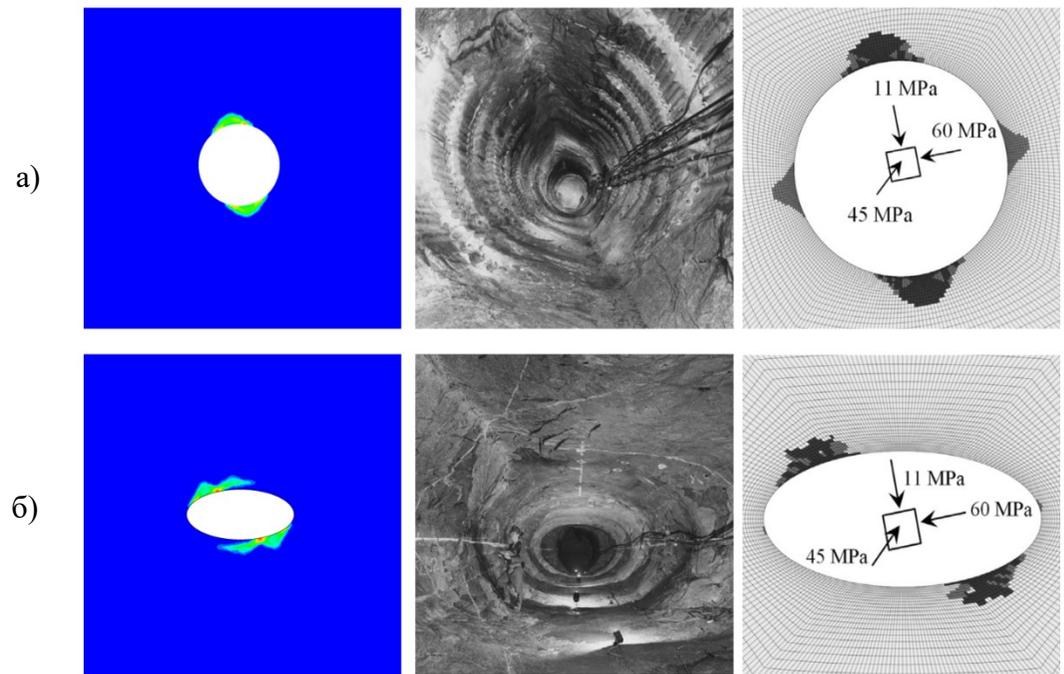


Рисунок 2 – Формирование зон хрупкого разрушения пород в окрестности горной выработки кругового очертания (а) и эллиптической формы (Rafiei и др.) (б), согласно разработанной модели деформирования горных пород

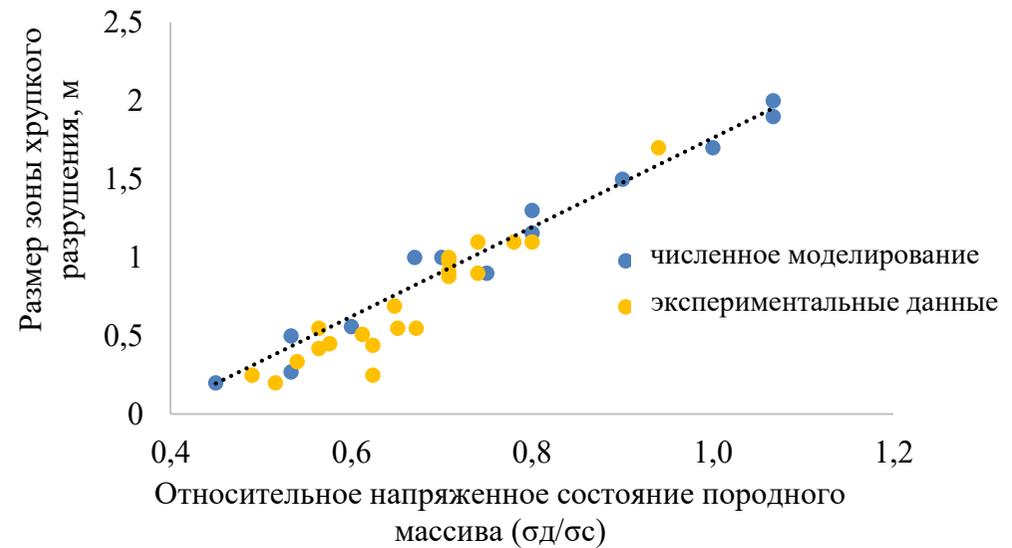


Рисунок 3 – Сравнение результатов численного моделирования прогноза зон хрупкого разрушения и натуральных наблюдений в окрестности одиночной выработки для условий КФ АО «Апатит»

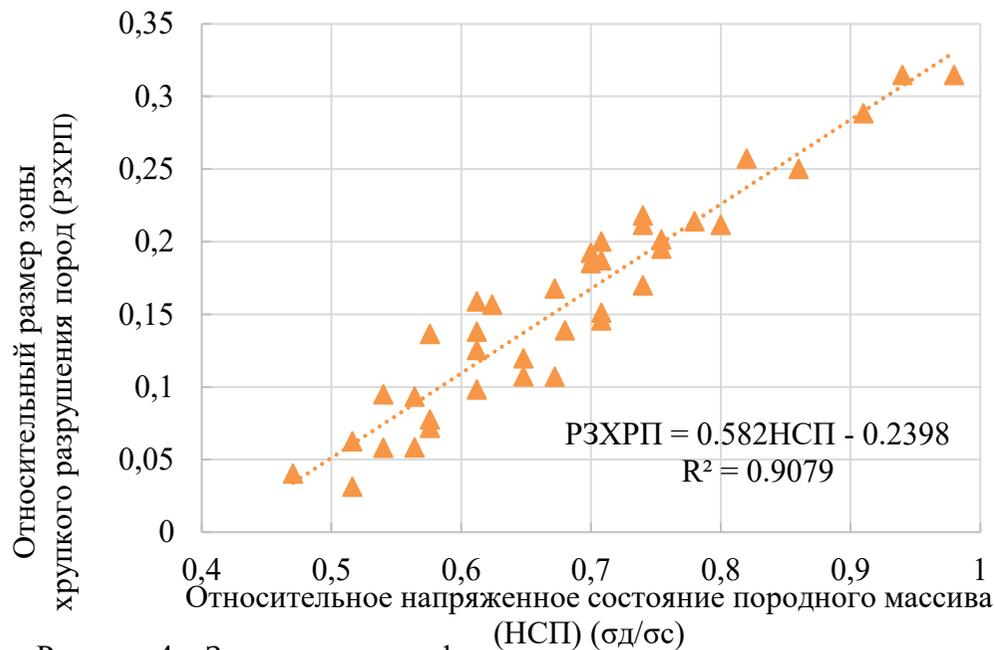


Рисунок 4 – Закономерности формирования зон хрупкого разрушения пород для различных горно-геологических и геомеханических условий в зависимости от типа выработки

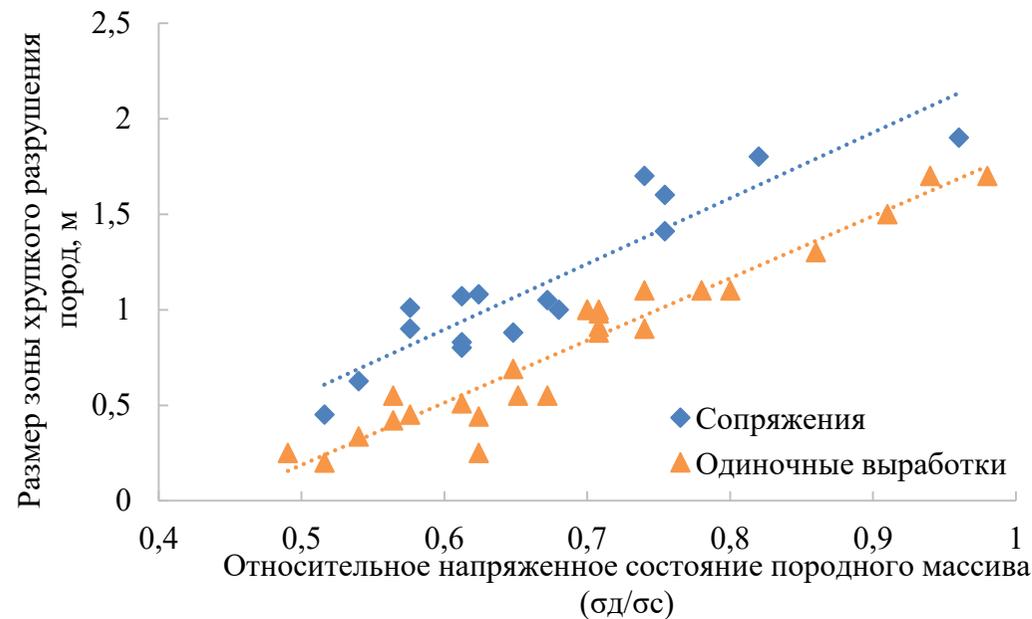


Рисунок 5 – Размеры зон хрупкого разрушения для сопряжений и одиночных выработок при различном напряженном состоянии массива

а)



б)

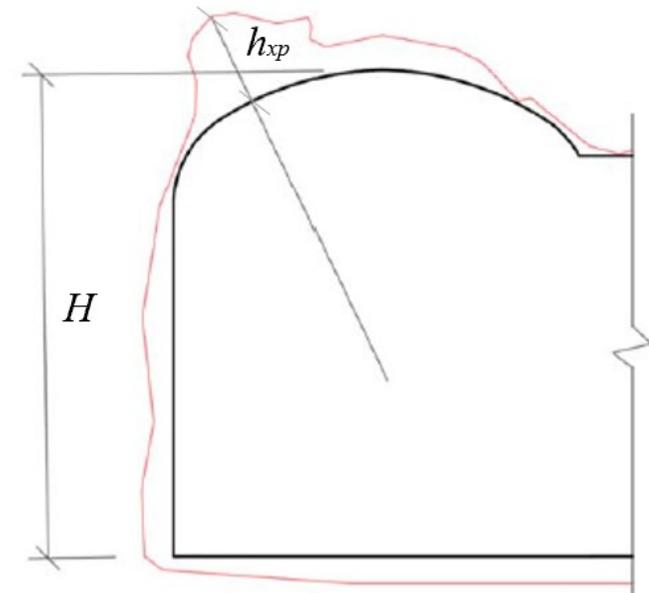


Рисунок 6 – Характер формирования зон хрупкого разрушения на участках сопряжения горных выработок для условий КФ АО «Апатит» (а) и оценка зоны хрупкого разрушения по результатам маркшейдерской съемки (б)

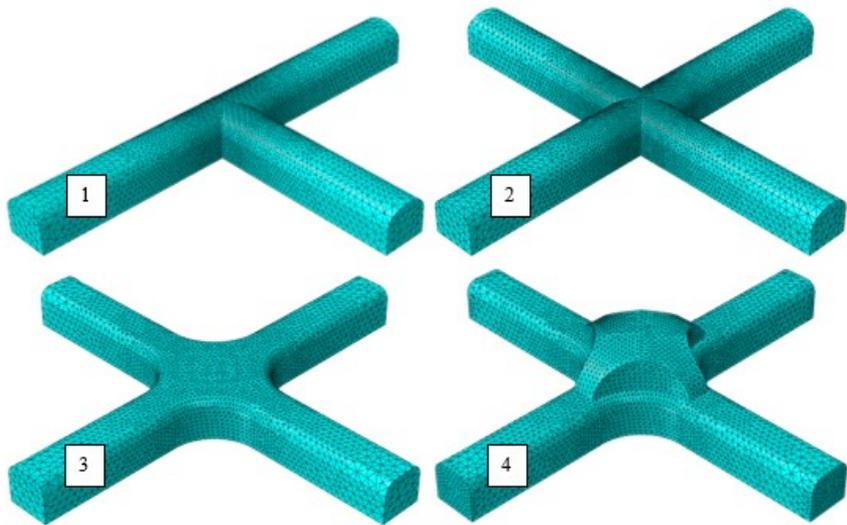


Рисунок 7 – Модели сопряжений для прогноза напряженно-деформированного состояния: 1 - одностороннее сопряжение; 2 – двухстороннее сопряжение – Тип А; 3 – двухстороннее сопряжение – Тип Б; 4 – двухстороннее сопряжение – Тип В

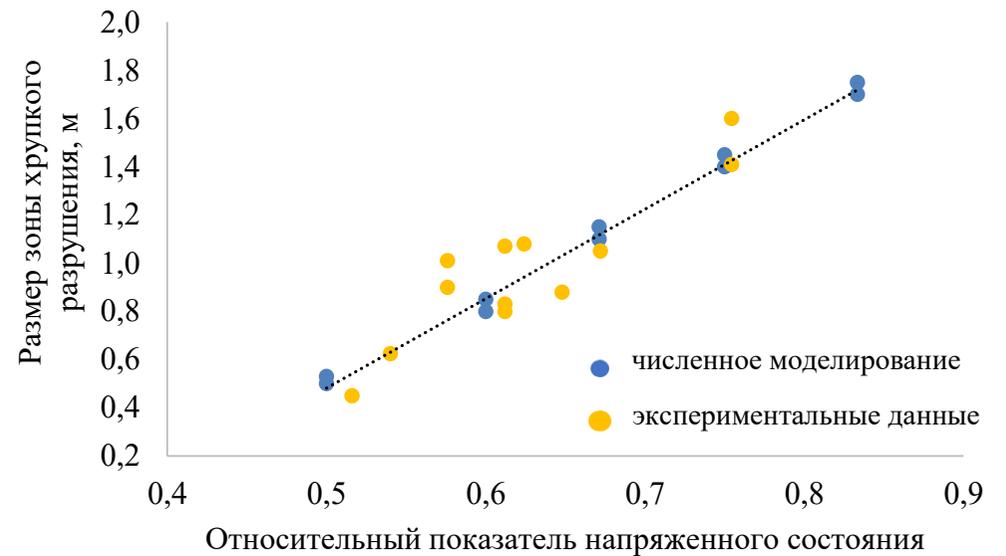


Рисунок 9 – Сравнение результатов численного моделирования и данных природных наблюдений

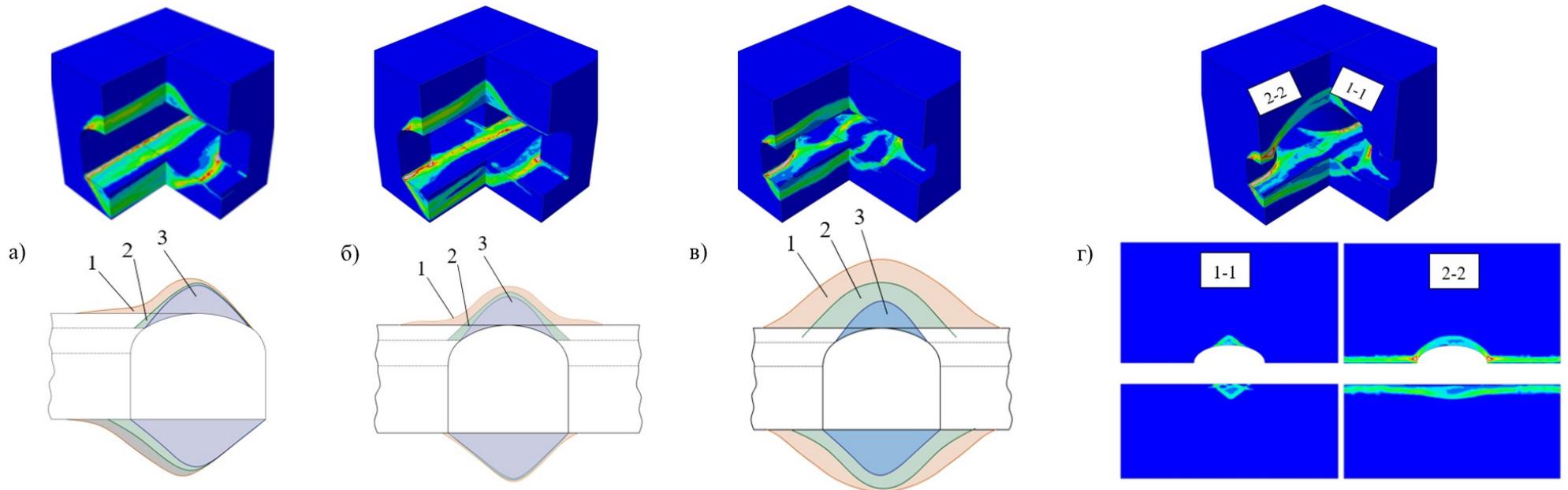


Рисунок 8 – Картины формирования зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжений горизонтальных горных выработок: а – одностороннее сопряжение; б – двухстороннее сопряжение, тип А; в – двухстороннее сопряжение, тип Б; г – двухстороннее сопряжение, тип В: 1 – граница зоны хрупкого разрушения пород на участке сопряжения; 2 – граница зоны хрупкого разрушения пород на участке подхода к сопряжению; 3 – граница зоны хрупкого разрушения на удалении от сопряжения