

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»**

НГУЕН ВАН МИНЬ

**ПРОГНОЗ МОЩНОСТИ ЗОН РАСТЯГИВАЮЩИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ
ПРОХОДКЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ГЛУБИНЕ
СВЫШЕ 1 КИЛОМЕТРА**

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

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор РАН **Еременко Виталий Андреевич**

Москва – 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: С увеличением глубины ведения горных работ свыше 1 км регистрируются интенсивные деформационные процессы при проходке и поддержании горных выработок, возрастает количество случаев обрушений кровли и боков выработок. В условиях действия высокого горного давления изменяется напряженно-деформированное состояние массива горных пород, при этом механические процессы в условиях действия высоких напряжений на больших глубинах в настоящее время мало изучены.

Основы для изучения зон дезинтеграции и нарушенности горных пород, которые формируются в краевых частях массива вокруг выработок, заложили российские ученые: Шемякин Е. И., Фисенко Г. Л., Курленя М. В., Опарин В. Н., Миренков В. Е., Мясников В. П., Макаров В. В., Гузев М. А., Рева В. Н., Еременко В. А., Глушихин Ф. П. и др.

В настоящее время общепризнанным является тот факт, что трещины, называемые трещинами растяжения, возникают и развиваются под действием высоких сил сжатия. Данный вид механизма разрушения относится не к сдвигу, а к растяжению. Этот процесс определяется критерием растягивающей деформации, предложенным руководителем южноафриканской школы геомехаников Т. Стейси. Деформация растяжения при этом учитывает все три компоненты напряжения, и разрушение при растяжении будет происходить, даже если все компоненты напряжения являются сжимающими.

Анализ критериев разрушения горных пород позволил выявить, что разными учеными и их группами в течение длительного времени определены несколько критериев, от «классической огибающей Мора-Кулона» до более современных, таких как «обобщенный критерий разрушения Файрхурста», «критерий кривизны Франклина», «модифицированный критерий Хука–Брауна для неповрежденной породы», «критерий хрупкого разрушения Шори» и др. Главной особенностью этих критериев и методов является то, что в них используются только максимальные и минимальные компоненты главных напряжений, а горная порода разрушается преимущественно при сдвиге.

Проходка выработок на больших глубинах всегда сопровождается перераспределением исходного поля напряжений, при этом формируется вторичное поле напряжений. В условиях ведения горных работ на глубине свыше 1 км часто регистрируются трещины растяжения, которые могут развиваться и соединяться с естественными трещинами массива. При этом под действием высокого горного давления трещины растяжения зарождаются и развиваются, как правило, параллельно и субпараллельно обнажениям горных выработок.

Оценка мощности зон растягивающих деформаций при проходке и поддержании подготовительных горных выработок на рудниках России, особенно на глубинах ведения горных работ свыше 1 км, необходимая для оценки устойчивости вмещающего выработку массива горных пород, планирования горных работ, выбора параметров крепи и систем крепления выработок, в настоящее не проводится или является методически недостоверной. Поэтому прогноз мощности зон растягивающих деформаций при проходке подготовительных горных выработок на глубине свыше 1 км является актуальной задачей исследований.

Цель работы заключается в определении мощности зон растягивающих деформаций, формируемых при проходке и поддержании подготовительных горных выработок на глубине свыше 1 км.

Идея работы заключается в выявлении потенциально неустойчивых зон массива вокруг выработок в зонах растягивающих деформаций, установленных с помощью численного моделирования и экспериментальных шахтных исследований.

Задачи исследований:

1. Исследовать влияние глубины ведения горных работ, форм выработок, главных действующих напряжений в массиве, физико-механических свойств горных пород и количественных характеристик массива горных пород на формирование зоны растягивающих деформаций вокруг выработок.

2. Определить мощности зон растягивающих деформаций и критерии разрушения массива при проходке и поддержании подготовительных выработок на глубине свыше 1 км.

3. Разработать рекомендации по креплению и поддержанию горных выработок с учетом прогноза мощности зон растягивающих деформаций.

Основные научные положения и их новизна:

1. Установлены значения растягивающих деформаций ε_{c1} для начала формирования и ε_{c2} для развития трещин растяжения для известных значений модуля упругости породы E , эффективного модуля упругости для стадии распространения трещин (E^*), коэффициента Пуассона ν и предела прочности на сжатие горных пород σ_c :

$$\varepsilon_{c1} = \frac{0,434 \cdot \sigma_c \cdot \nu}{E} \quad \text{и} \quad \varepsilon_{c2} = \frac{0,814 \cdot \sigma_c \cdot \nu}{E^*},$$

2. Установлено, что мощности зон растягивающих деформаций со значениями $\mu \varepsilon \geq 350$ в массиве вокруг выработок изменяются от 1,8 до 2,4 м при квадратном, от 0,9 до 1,9 м при арочном и от 1,0 до 1,2 м при круглом сечении выработок при изменении качества породного массива со значениями индекса Бартон $Q = 2,5 \div 70$, коэффициента

Пуассона $\nu = 0,2 \div 0,3$, модуля упругости $E = 63 \div 120$ ГПа, и при гидростатическом исходном напряженном состоянии массива $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \rho g H$ ($H = 1,0 \div 1,9$ км).

3. При проходке и поддержании горных выработок в скальных массивах на глубине свыше 1 км и формировании вокруг выработок зон растягивающих деформаций со значениями $\mu \varepsilon \geq 350$ (зоной возможного обрушения массива) толщина торкретбетона на кровле и боках выработки должна быть не менее 60 мм, длина анкеров не менее 2,4 м.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: обоснованным применением критерия деформации растяжения при проходке подготовительных горных выработок на глубине свыше 1 км для прогноза и определения мощности потенциальных зон растягивающих деформаций, корректной обработкой результатов экспериментов с использованием современных методов статистики, достаточным объемом лабораторных испытаний физико-механических свойств горных пород, удовлетворительным совпадением результатов моделирования и натуральных наблюдений.

Методология и методы исследования: поставленные задачи решались с использованием комплекса методов исследований, включающих обобщение и анализ российского и международного опыта оценки механизма возникновения и формирования трещин растяжения вокруг выработок; оценку свойств массива горных пород для численной модели с использованием метода моделирования Монте-Карло; оценку критерия растягивающих деформаций на основе лабораторного определения физико-механических свойств горных пород с учетом результатов съемки трещиноватости массива вокруг выработок.

Научное значение работы состоит в определении мощности потенциальных зон обрушения массива вокруг выработок на глубине ведения горных работ свыше 1 км; установлении взаимосвязи между растягивающей деформацией и свойствами горных пород; выборе параметров крепления и систем крепления выработок с учетом установленных закономерностей развития зон растягивающих деформаций; определении длины анкеров для крепления их замковой части в устойчивой части массива.

Практическая значимость работы: получены аналитические зависимости для прогнозирования значений растягивающей деформации и зон образования и распространения трещин растяжения на основе физико-механических свойств горных пород (предела прочности на сжатие, коэффициента Пуассона и модуля упругости); предложен порядок прогнозирования мощности зон растягивающих деформаций; определены параметры крепления и поддержания горных выработок с учетом прогноза мощности зон растягивающих деформаций, разработаны «Методические рекомендации по

прогнозу мощностей зон растягивающих деформаций и креплению подготовительных горных выработок на больших глубинах», принятые к использованию на Гаштагольской и Шерегешской шахтах филиала «Евразруда – филиал АО «Евраз ЗСМК».

Апробация работы: основные положения работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (МГГУ, г. Магнитогорск, 2019 г.); международном научном симпозиуме «Неделя Горняка» (Горный Институт НИТУ «МИСИС», г. Москва, 2019-2021 г.г.); международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», (ИПКОН РАН, Москва, 2020 г.); на Техническом совете по геомеханике (Программа 1÷3, Горный Институт НИТУ «МИСИС», г. Москва, 2019-2021 г.г.); семинарах с участием ведущих геомехаников и геотехников России, Казахстана, Австралии, Канады и ЮАР в научно-исследовательском центре «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСИС» в 2018 - 2021 гг.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ, в том числе 3 в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, из них 3 – включенные в международную базу цитирования Scopus.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 112 страницы, 56 рисунков, 25 таблиц и 129 источников.

Автор выражает благодарность проф. Мяскову А.В., д.ф.-м.н., доц. Винникову В.А., д.т.н., проф. РАН Еременко В.А., преподавательскому составу кафедры ФизГео, сотрудникам научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ «МИСИС» за помощь и поддержку в процессе подготовки диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Увеличение глубины горных работ свыше 1 км при разработке рудных месторождений в скальных массивах в XXI веке происходит повсеместно как в России, так и за рубежом. Проблемы, которые возникают при проходке и поддержании горных выработок на больших глубинах, связаны с интенсивным деформированием массива, формированием зон растягивающих деформаций, размеры которых зависят от количественных характеристик массива, физико-механических свойств горных пород, действующих напряжений и формы выработок. Обозначенные проблемы, как правило, связаны с ведением горных работ в условиях действия высокого горного давления.

Формирование и развитие трещин растяжения происходит согласованно с естественными трещинами.

При проведении исследований использовался метод граничных интегральных уравнений, расчеты проводились в программном комплексе Map3D, в котором определялись зоны растягивающих деформаций (микродеформации ϵ_3) во вмещающем массиве подготовительных выработок (рис. 1).

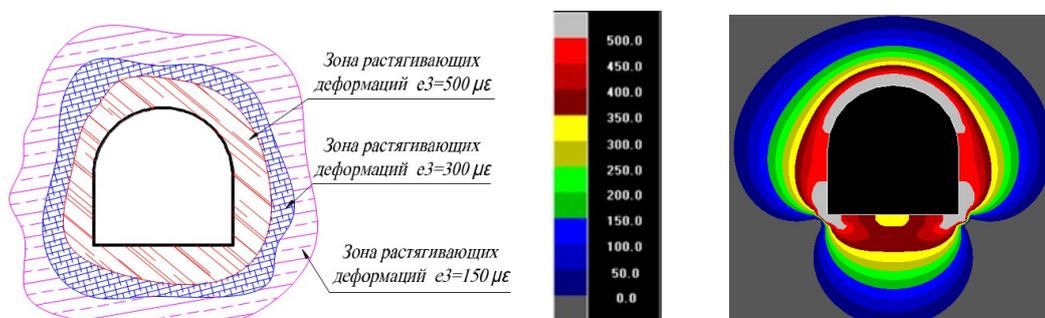


Рис. 1 - Определение зон растягивающих деформаций вокруг выработок

В данном исследовании для обеспечения высокой точности результатов прогноза мощности зоны растягивающих деформаций вокруг выработок, прежде всего, необходимо найти оптимальное решение дополнительной задачи: можно ли прогнозировать возникновение трещины растяжения (критическое значение зоны растягивающих деформаций), их ориентацию и влияние.

В первой главе рассматривается механизм возникновения и формирования трещин растяжения вокруг выработок на глубине свыше 1 км на примере проходки и поддержания их на рудниках Таймырский, Октябрьский и Интернациональный. Этот тип трещин относится не к сдвигу, а к растяжению. Рассматриваются также системы классификации качества породного массива и их сопоставление с созданными численными моделями.

Во второй главе представлено определение критерия растягивающих деформаций на основе двух методов: лабораторных испытаний физико-механических свойств горных пород и математических выражений. Если определить значение растягивающей деформации массива горных пород, при которой образуются и развиваются трещины, то можно спрогнозировать мощность зоны растягивающих деформаций вокруг выработок. Поэтому были разработаны математические выражения для определения критерия зоны растягивающих деформаций на основе порога зарождения первых трещин и их дальнейшего формирования в массиве горных пород вокруг выработок. Результаты, полученные с помощью численных моделей в программном комплексе Map3D и откалиброванные на основе натурных данных, позволили определить мощность зоны растягивающих деформаций. Математические выражения для прогноза значений на стадии

возникновения (ε_{c1}) и распространения (ε_{c2}) трещин растяжения установлены на основе определения физико-механических свойств образцов горных пород и проведены с учетом численной калибровки на исследуемых участках рудников следующим образом: моделирование → наблюдение → калибровка.

❖ **На основе лабораторных испытаний:** в качестве показателя, характеризующего состояние вторичного поля напряжений, принята величина относительной деформации растяжения горных пород (ε) или микродеформация ($\mu\varepsilon$):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (3)$$

где ΔL – величина деформации; L – исходный размер деформируемого объекта.

Микродеформация, которая оценивается в программе численного моделирования определяется по формуле:

$$\mu\varepsilon = \varepsilon \times 10^6, \quad (4)$$

При проведении лабораторных исследований установлено, что первые трещины растяжения в скальных породах регистрируются при микродеформациях, равных $\varepsilon_c = 200\mu\varepsilon$.

❖ **Разработка аналитических выражений для прогноза значения критерия растягивающих деформаций:**

Шаг 1: Определение значения критерия растягивающих деформаций ε_c .

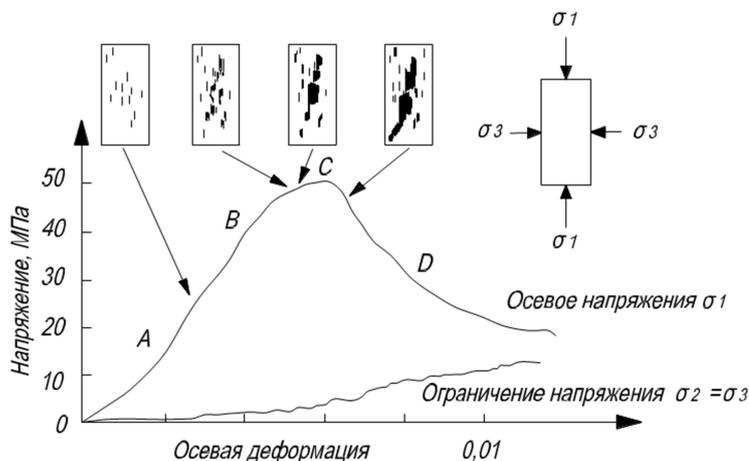


Рис. 2 – Кривая напряжение-деформация образцов кварцита и рисунки состояния микротрещин, наблюдаемых в образцах (по данным D. K. Hallbauer, H. Wagner, N. G. W. Cook.)

На рис. 2 представлена полная кривая напряжение-деформация для хрупких горных пород при сжатии, которую можно разделить на четыре области. В области АВ появляются видимые микротрещины, оси которых параллельны направлению действующей нагрузки. В области ВС количество микротрещин быстро возрастает. В точке предела прочности

образца, в центральной его части, развивается область разрушения. При дальнейшем сжатии эта область увеличивается к одному или обоим концам образца за счет роста и распространения существующих микротрещин. На завершающей стадии в области BC микротрещины начинают образовывать трещину разрушения. В области CD трещина пересекает весь образец.

Для хрупких горных пород максимальная главная деформация ε_1 должна развиваться в направлении действия главного максимального напряжения σ_1 , промежуточная главная деформация ε_2 в направлении σ_2 и минимальная главная деформация ε_3 в направлении σ_3 . В соответствии с законом Гука:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_c} \{ \sigma_1 - \nu_c (\sigma_2 + \sigma_3) \}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_c} \{ \sigma_2 - \nu_c (\sigma_1 + \sigma_3) \}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E_c} \{ \sigma_3 - \nu_c (\sigma_1 + \sigma_2) \}, \quad (7)$$

Из уравнений (5-7) можно констатировать, что деформация растяжения не всегда вызывается растягивающим напряжением.

Для хрупких горных пород до стадии разрушения отношение прочности на одноосное растяжение σ_t и критической деформации на растяжение ε_u представлено следующим образом:

$$\varepsilon_u = \frac{\sigma_t}{E_t}, \quad (8)$$

При трехосном сжатии деформации, ориентированные на σ_2 и σ_3 должны соответствовать значениям ε_2 и ε_3 , т. к. σ_1 принимает максимальное значение. В теории малых деформаций значение $\varepsilon_2 + \varepsilon_3$ - приращение площади по направлению действия σ_1 .

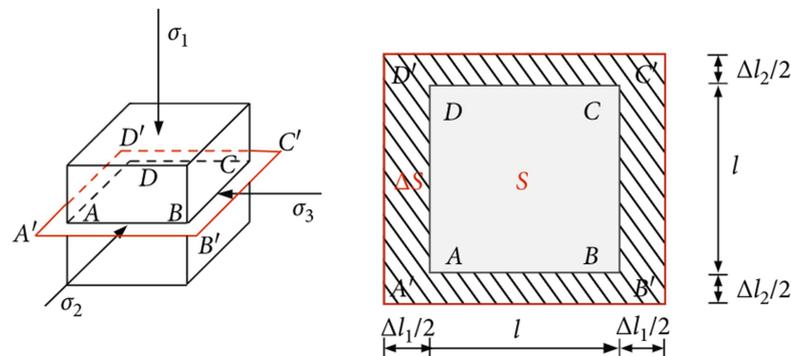


Рис. 3 – Деформация поперечного сечения образца горной породы

S – начальная площадь поперечного сечения образца до приложения нагрузки. ΔS – увеличение площади после приложения нагрузки. Приращение площади под действием σ_1 рассчитывается следующим образом:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{(1 + \Delta l_1) \cdot (1 + \Delta l_2) - 1^2}{l^2} = \frac{\Delta l_1}{l} + \frac{\Delta l_2}{l} + \frac{\Delta l_1}{l} \frac{\Delta l_2}{l} = \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 \approx \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad (9)$$

Согласно теории максимальной деформации, разрушение произойдет в том случае, когда одна из деформаций в осях превышает значение предельной допустимой деформации ε_u . В данной работе рассматриваются деформации $\varepsilon_2 + \varepsilon_3$, возникающие в плоскости главных напряжений.

Предполагается, что разрушение произойдет в случае, когда максимальная деформация при одноосном растяжении удваивается в значении:

$$\varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 2\varepsilon_u = 2 \frac{\sigma_t}{E_t}, \quad (10)$$

Подставляя уравнения (6) и (7) в уравнение (10), получаем:

$$\sigma_1 = \frac{1 - \nu_c}{2\nu_c} (\sigma_2 + \sigma_3) - \frac{E_c \cdot \sigma_t}{E_t \cdot \nu_c}, \quad (11)$$

При одноосном сжатии принимаются значения: $\sigma_1 = \sigma_c$ и $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, где σ_c – прочность на одноосное сжатие. Тогда уравнение (11) принимает следующий вид:

$$\sigma_t = -\frac{\nu_c \cdot E_t}{E_c} \sigma_c, \quad (12)$$

Для большинства образцов горных пород механические параметры, рассчитываются следующим выражением:

$$\frac{\nu_c}{E_c} = \frac{\nu_t}{E_t} = \frac{\nu}{E}, \quad (13)$$

Таким образом, уравнение (12) принимает вид:

$$\sigma_t = -\nu_t \cdot \sigma_c, \quad (14)$$

$$\sigma_t = E_t \cdot \varepsilon_t = -\nu_t \cdot \sigma_c, \quad (15)$$

$$\varepsilon_t = -\frac{\nu_t \cdot \sigma_c}{E_t} = -\frac{\nu}{E} \sigma_c, \quad (16)$$

При определении значения модуля упругости на стадии развития трещин применяется метод распределения Вейбулла для описания случайного разрушения горных пород функцией распределения плотности вероятности:

$$P(F) = \frac{a}{F_0} \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^{a-1} \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^a \right], \quad (17)$$

где $P(F)$ – функция распределения плотности вероятности; a и F_0 – морфологические параметры распределения Вейбулла; F^* – переменная случайного распределения Вейбулла.

Степень повреждения горных пород (N) определяется следующим образом:

$$N = \frac{K_d}{K}, \quad (18)$$

где K_d – количество элементов, изначально содержащих трещины; K – общее количество элементов.

При нагрузке до значения, равному величине F^* , количество разрушенных элементов определяется выражением:

$$K_d(F^*) = \int_0^{F^*} KP(F^*)dF = K \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^a \right] \right\}, \quad (19)$$

Плотность поврежденных элементов определяется степенью повреждения горных пород (N). Уравнение (19) преобразовывается выражением (18):

$$N = \frac{K \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^a \right] \right\}}{K} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^a \right], \quad (20)$$

Эффективный модуль упругости горных пород (E^*) на стадии развития трещин определяется выражением:

$$E^* = [1 - N]E = E \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^a \right], \quad (21)$$

Согласно критерию разрушения Друкера-Прагера:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K, \quad (22)$$

где F – макроскопическая прочность горных пород, т. е. номинальная прочность; α и K – параметры критерия разрушения Друкера-Прагера; I_1 – первый инвариант тензора напряжений; J_2 – вторая переменная смещения напряжения. Данные параметры выражаются следующим образом:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (23)$$

$$J_2 = 1/6 \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right], \quad (24)$$

При экспериментальных наблюдениях в испытательной лаборатории на трехосное сжатие выявлено, что элементы горной породы соответствуют значениям, подчиняющимся обобщенному закону Гука:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 + \nu(\sigma_2 + \sigma_3), \quad (25)$$

$$\sigma_2 = E\varepsilon_2 + \nu(\sigma_1 + \sigma_3), \quad (26)$$

$$\sigma_3 = E\varepsilon_3 + \nu(\sigma_1 + \sigma_2), \quad (27)$$

В механике разрушения сплошных сред трехмерная изотропная модель упругого разрушения горных пород выражается следующим образом:

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\}(1-N), \quad (28)$$

где $\{\sigma\}$ - вектор номинального напряжения; $[E]$ - матрица упругости материала; $\{\varepsilon\}$ - вектор деформации; а N - переменное разрушение.

Статистическое разрушение породы определяется распределением Вейбулла (2.15), устанавливается взаимосвязь с уравнениями (25–27):

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \exp\left[-\left(\frac{F^*}{F_0}\right)^a\right] + \nu(\sigma_2 + \sigma_3), \quad (29)$$

$$\sigma_2 = E\varepsilon_2 \exp\left[-\left(\frac{F^*}{F_0}\right)^a\right] + \nu(\sigma_1 + \sigma_3), \quad (30)$$

$$\sigma_3 = E\varepsilon_3 \exp\left[-\left(\frac{F^*}{F_0}\right)^a\right] + \nu(\sigma_1 + \sigma_2), \quad (31)$$

Согласно гипотезе эквивалентности деформаций Дж. Леметра:

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i}{(1-N)}, \quad (32)$$

где σ_i^* - эффективное напряжение, соответствующее номинальному напряжению σ_i

Следовательно:

$$F^* = \frac{F}{(1-N)} = \frac{FE\varepsilon_1}{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)} = \frac{(\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K)E\varepsilon_1}{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)}, \quad (33)$$

Ограничивающее давление, при трехосном сжатии, принимается равным $\sigma_2 = \sigma_3$, при этом значение деформации соответствует $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$. Соответственно, выражения (29), (30) и (31) принимают следующий вид:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \exp\left[-\left(\frac{F^*}{F_0}\right)^a\right] + 2\nu\sigma_3, \quad (34)$$

$$\sigma_3 = \sigma_2 = \frac{E\varepsilon_2 \exp\left[-\left(F^*/F_0\right)^a\right]}{1-\nu} + \frac{\nu\sigma_1}{1-\nu}, \quad (35)$$

При максимальном разрушении породы, под действием трехосного напряжения, принимаются значения: $\sigma_1 = \sigma_c$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_m$, где σ_c - максимальное напряжение; а ε_m - деформация, соответствующая максимальному напряжению, а именно:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = 0, \quad (36)$$

$$\sigma_c = E \varepsilon_m \exp \left[- \left(F^* / F_0 \right)^a \right] + 2\nu \sigma_3, \quad (37)$$

$$F^* = \frac{\left(\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K \right) E \varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\nu \sigma_3}, \quad (38)$$

Значения σ_1 и σ_3 являются функциями величин ε_1 и ε_3 :

$$d\sigma_1 = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} d\varepsilon_1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_3} d\varepsilon_3, \quad (39)$$

По результатам дифференциации уравнений (34) и (35) получаем:

$$d\sigma_1 = L_1 d\varepsilon_1 + L_2 dF_{\varepsilon_1}^* + L_3 da + L_4 dF_0 + 2\nu d\varepsilon_3, \quad (40)$$

$$d\sigma_3 = M_1 d\varepsilon_3 + M_2 dF_{\varepsilon_3}^* + M_3 da + M_4 dF_0 + \frac{\nu}{1-\nu} d\varepsilon_3, \quad (41)$$

По результатам дифференциации уравнения (38) получаем:

$$dF_{\varepsilon_1}^* = F_{11} d\varepsilon_1 + F_{12} d\sigma_1 + F_{13} d\sigma_3, \quad (42)$$

$$dF_{\varepsilon_3}^* = F_{21} d\varepsilon_3 + F_{22} d\sigma_1 + F_{23} d\sigma_3, \quad (43)$$

Учитывая, что a и F_0 – функции минимального напряжения, получаем выражение:

$$da = P d\sigma_3, \quad (44)$$

$$dF_0 = Q d\sigma_3, \quad (45)$$

Следовательно, преобразовав выражения, полученные из уравнений (42), (43) и (44), (45) в (40) и (41) получаем:

$$(L_2 F_{12} - 1) d\sigma_1 + (L_2 F_{13} + L_3 P + L_4 Q + 2\nu) d\sigma_3 + (L_1 + L_2 F_{11}) d\varepsilon_1 = 0, \quad (46)$$

$$\left(\frac{\nu}{1-\nu} + M_2 F_{22} \right) d\sigma_1 + (M_2 F_{23} + M_3 P + M_4 Q) d\sigma_3 + (M_1 + M_2 F_{21}) d\varepsilon_3 = 0, \quad (47)$$

Упростив данные выражения, получаем:

$$S_1 d\sigma_1 + S_2 d\sigma_3 + S_3 d\varepsilon_1 = 0, \quad (48)$$

$$V_1 d\sigma_1 + V_2 d\sigma_3 + V_3 d\varepsilon_3 = 0, \quad (49)$$

Если исключить переменную $d\sigma_3$, получим следующее выражение:

$$d\sigma_1 = \frac{S_3 V_2}{S_2 V_1 - S_1 V_2} d\varepsilon_1 + \frac{S_2 V_3}{S_1 V_2 - S_2 V_1} d\varepsilon_3, \quad (50)$$

Согласно формуле (39):

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = \frac{S_3 V_2}{S_2 V_1 - S_1 V_2} = 0, \quad (51)$$

Из формулы (50) получаем: $S_3 = 0$ или $V_2 = 0$. Если $V_2 = 0$, то

$$V_1 d\sigma_1 + V_3 d\varepsilon_3 = 0, \quad (52)$$

Если величина $d\sigma_3$ не применяется в выражении (52), необходимо дифференцировать значение σ_3 , при условии: $S_3 = 0$; тогда:

$$S_3 = L_1 + L_2 F_{11} = 0, \quad (53)$$

Из формул (34), (35) и (40), (41) получаем:

$$L_1 = E \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^a \right], \quad (54)$$

$$L_2 = -E \varepsilon_1 \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^a \right] \cdot \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^a \left(\frac{a}{F^*} \right), \quad (55)$$

$$F_{11} = \frac{\partial F^*}{\partial \varepsilon_1} = \frac{(\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K) E}{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}, \quad (56)$$

Комбинируя выражения (37), (38), (53), (54), (55) и (56), получаем:

$$\frac{1}{a} = \ln \left[\frac{E \varepsilon_m}{\sigma_c - 2\nu\sigma_3} \right], \quad (57)$$

Данное выражение (57) является параметром распределения Вейбулла, который определен в лабораторных испытаниях на трехосное сжатие. При одноосном сжатии, данный параметр выражается следующим образом (при условии, что $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$):

$$\frac{1}{a} = \ln \left[\frac{E \varepsilon_c}{\sigma_m} \right], \quad (58)$$

В формуле (58), величина ε_m – деформация, соответствующая максимальному напряжению.

Для определения эффективного модуля упругости (E^*), на стадии распространения трещины, необходимо применить выражение (57) или (58) в условии уравнения (21).

$$E^* = E \exp \left(- \frac{1}{a} \right), \quad (59)$$

В соотношении напряжение-деформация, показанном на рис. 2, σ_{ci} – уровень напряжения при возникновении трещины, а σ_{cd} – уровень напряжения развития трещины, близкий к максимальной прочности породы.

Математическое выражение для определения критической деформации растяжения на стадии образования трещин, а затем распространения трещин с использованием порога инициирования трещин (σ_{ci}) и распространение трещин (σ_{cd}) имеет вид:

$$\frac{\sigma_{ci} \cdot \nu}{E} \leq \varepsilon_c \leq \frac{\sigma_{cd} \cdot \nu}{E^*}, \quad (60)$$

Формула взаимосвязи между $\sigma_c - \sigma_{ci}$ и $\sigma_c - \sigma_{cd}$ была разработана на основе обобщения экспериментальных результатов, полученных при исследовании образцов горных пород, которые были выполнены многими авторами и опубликованы в научных журналах. Результаты корреляции σ_c и σ_{ci} представлены на рис. 4, а корреляция σ_c и σ_{cd} на рис. 5.

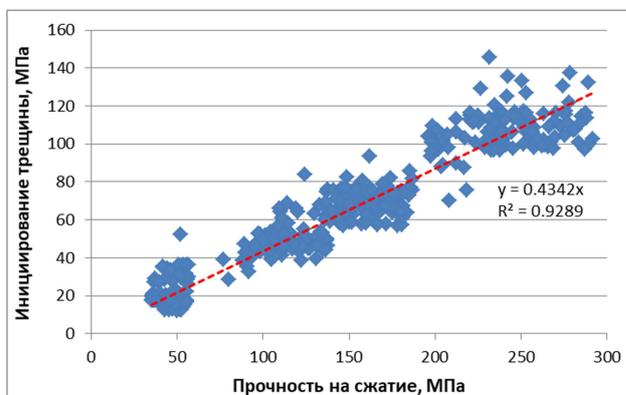


Рис. 4 - Взаимосвязь между σ_c и σ_{ci}

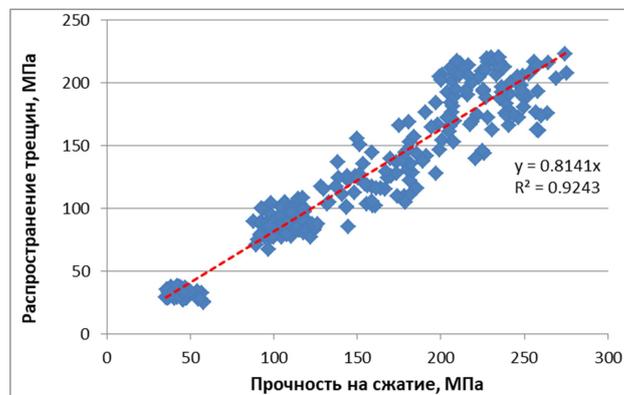


Рис. 5 - Взаимосвязь между σ_c и σ_{cd}

Таким образом, выражения, определяющие возникновение (ε_{c1}) и развитие (ε_{c2}) трещин растяжения имеют вид:

$$\varepsilon_{c1} = \frac{0,434 \cdot \sigma_c \cdot \nu}{E} \quad \text{и} \quad \varepsilon_{c2} = \frac{0,814 \cdot \sigma_c \cdot \nu}{E^*}, \quad (61)$$

Шаг 2: Прогноз мощности зоны растягивающих деформаций вокруг выработок с помощью Мар3D.

В данной работе вероятностный метод применяется для определения свойств горных пород на руднике «Таймырский» с учетом их изменчивого состояния во вмещающем массиве. Габбро–долерит такситовый, роговик, габбро–долерит пикритовый, габбро–долерит оливинный - основные типы пород на руднике. В таблице 1 в качестве примера представлены физико-механические свойства вмещающей горной породы габбро-долерита такситового, определенные в лабораторных условиях при испытании образцов.

Таблица 1 - Физико-механические свойства габбро-долерита такситового

Название породы	Номер образца	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
Габбро – долерит такситовый	1	2985	179	107	0,33
	2	2971	109	104	0,27
	3	2954	155	113	0,38
	4	2854	103	109	0,31
	5	2901	141	122	0,35
Среднее значение		2933	138	111	0,33
Стандартное отклонение		49	28	6,2	0,04

В этом исследовании GSI , σ_c , E , и m_i рассматривались как случайные величины вместо присвоения им единственного значения. Для определения диапазона каждой переменной используются функции плотности вероятности. С помощью функции плотности вероятности (PDF) можно описать относительную вероятность того, что случайная величина примет конкретное значение. В PDF среднее значение (MV) представляет собой наилучшую оценку случайной величины, а неопределенность предполагается и описывается стандартным отклонением (STDV) или коэффициентом вариации (COV).

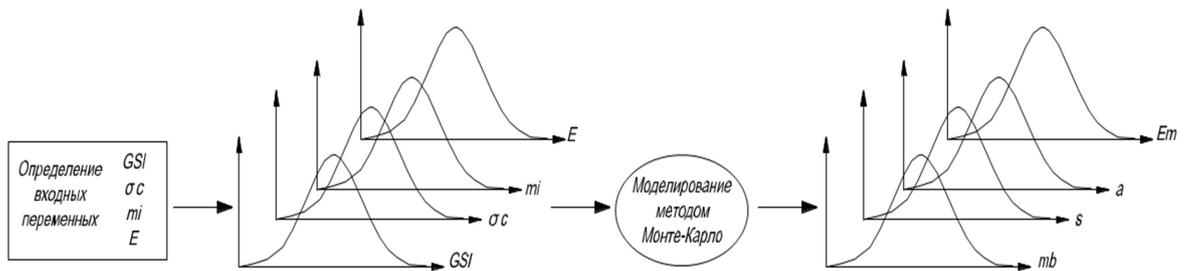


Рис. 6 - Процесс расчета распределения плотности вероятности прочностных и деформационных свойств (E_m , m_b , s и a) горного массива

Значения среднего и стандартного отклонения для PDF присваиваются на основе имеющихся данных полевых наблюдений, литературы и лабораторных исследований. Определив PDF для GSI , σ_c , E , и m_i , метод моделирования Монте-Карло был использован для расчета распределений плотности вероятности свойств прочности и деформируемости (E_m , m_b , s и a) массива горных пород.

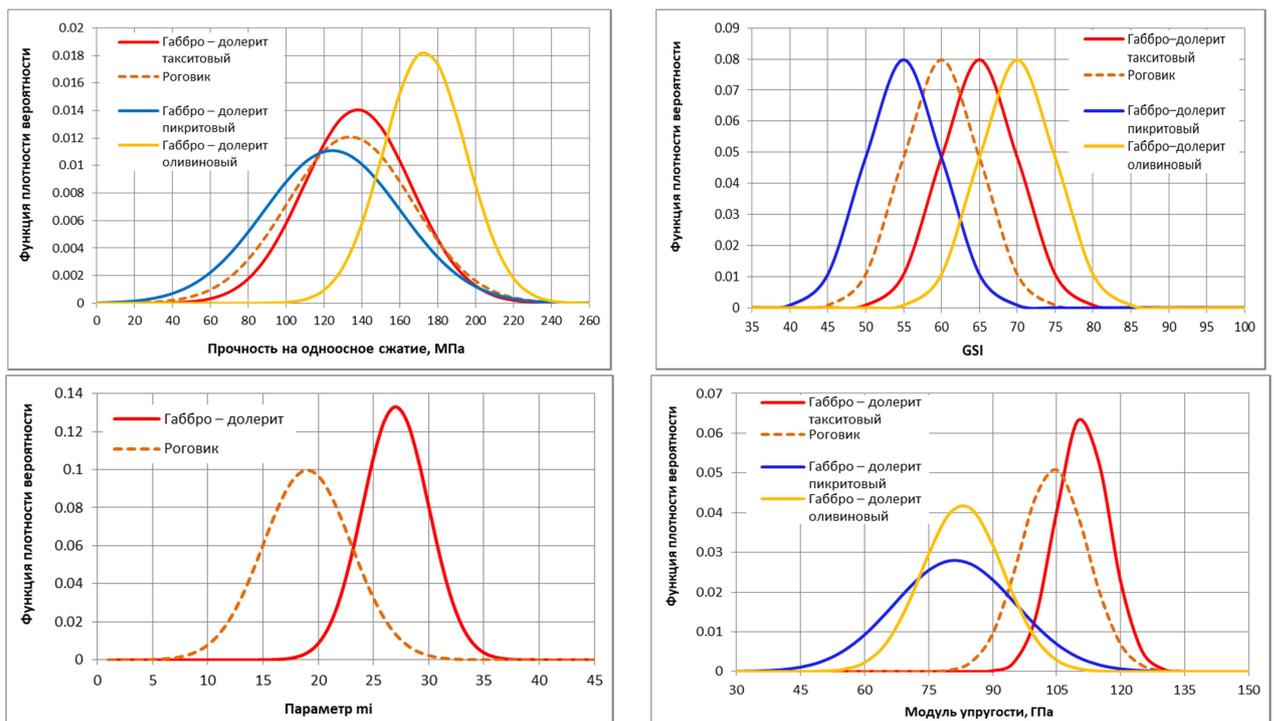


Рис. 7 - График функции плотности вероятности для σ_c , GSI , m_i и E

Моделирование методом Монте-Карло используется для расчета параметров Хука-Брауна. Для каждого расчета выполняется 15000 моделирований. Другими словами, каждый расчет дает 15000 различных результатов с учетом различных возможных комбинаций входных параметров, выбранных случайным образом из PDF.

На рис. 8 в качестве примера представлены параметры (m_b , s и a) и модуля упругости горных пород массива «габбро – долерит такситовый», определенные методом Монте-Карло.

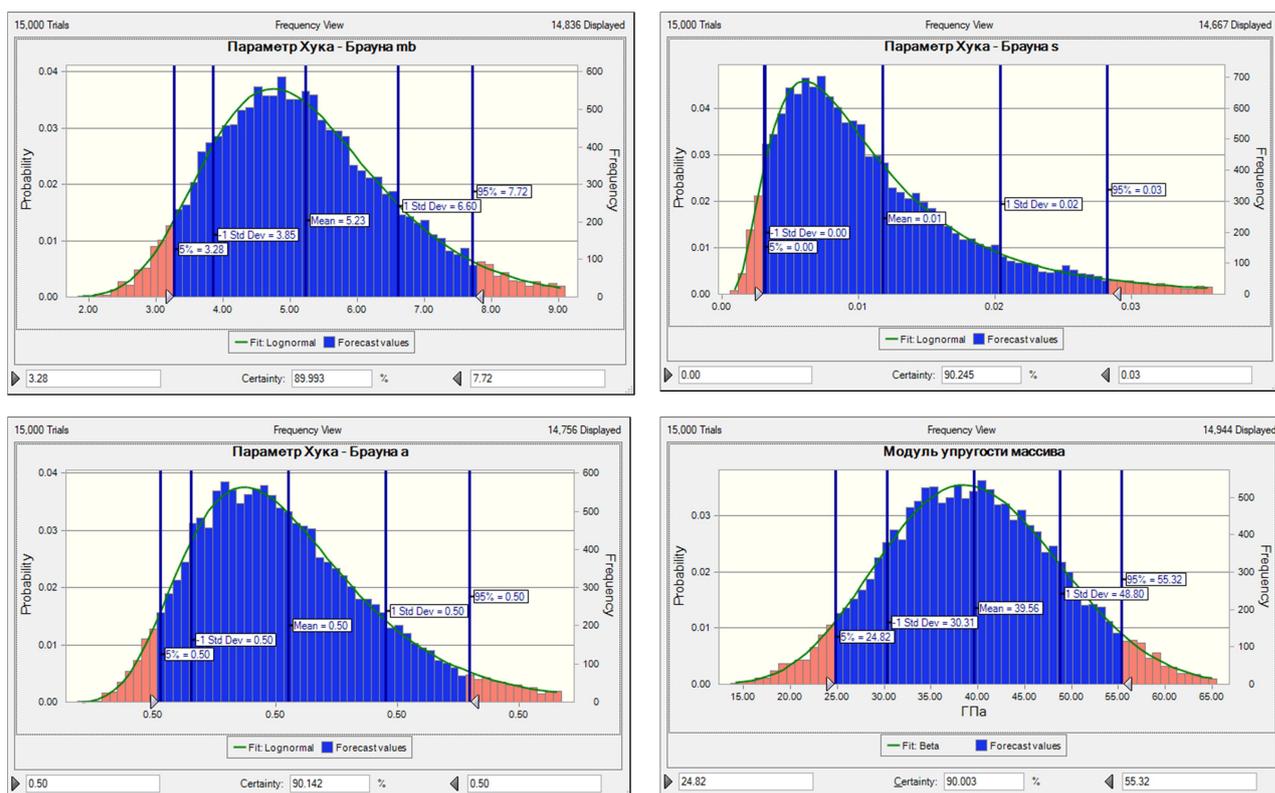


Рис. 8 - Определение параметров Хука - Брауна и модуля упругости горных пород массива «габбро – долерит такситовый»

Таблица 2 - Результаты определения свойств массива «габбро – долерит такситовый»

Параметр	Значение	Коэффициент вариации
Модуль упругости, ГПа	39,6	9,2
Параметры Хука – Брауна, m_b	5,23	1,38
Параметры Хука – Брауна, s	0,01	0,001
Параметры Хука – Брауна, a	0,5	0,001
Коэффициент Пуассона	0,33	-

Используя полученные результаты экспериментальных исследований (таблица 1) по выражениям (59), (61), установлено $\epsilon_c = 178 \div 343 \mu\epsilon$. Выбранные значения $\epsilon_{c1} = 200 \mu\epsilon$ и $\epsilon_{c2} =$

350µε будут использоваться в расчетах. На рис. 9 в качестве примера показаны результаты численного моделирования для свойств массива, представленных в таблице 2.

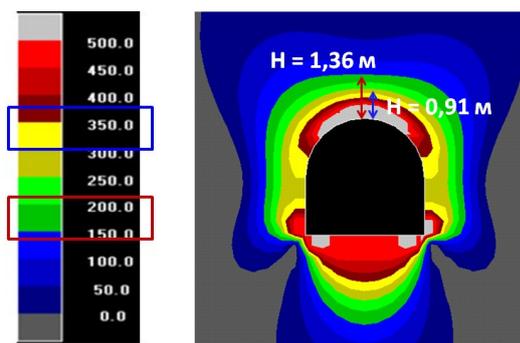


Рис. 9 - Микродеформации, определенные с помощью численного моделирования в программном комплексе Mar3D. 0.0÷500.0 – микродеформации µε.

С учетом полученных результатов численного моделирования установлено, что зоны растягивающих деформаций со значениями 350µε и 200µε, формируются в кровле выработки на глубине $H_{кр.} = 0,91$ м и $H_{кр.} = 1,36$ м, соответственно.

Результаты прогноза критерия растягивающих деформаций и мощности его зоны далее будут уточняться при калибровке численной модели.

С целью определения надежности уравнения (27) для прогноза критического значения деформации вычисленные результаты по уравнению сопоставляются с результатами численного моделирования. В численной модели изменялись показатели σ_c , ν и E при калибровке размеров зон растягивающих деформаций по результатам сопоставления наблюдаемой зоны трещин в массиве вокруг выработки.

Для определения глубины распространения зон растягивающих деформаций во вмещающем массиве выработок было проведено бурение скважин. Скважины имеют диаметр 89 мм и длину 4 м.

При этом, использовалось специализированное оборудование – видеоэндоскоп. С помощью видеоэндоскопа была выполнена съемка трещиноватости массива.



Рис. 10 - Определение глубины распространения в скважинах

На рис. 11 показаны результаты картирования трещиноватости массива и определения схемы расположения трещин на исследуемом участке выработки по сечению наблюдения.

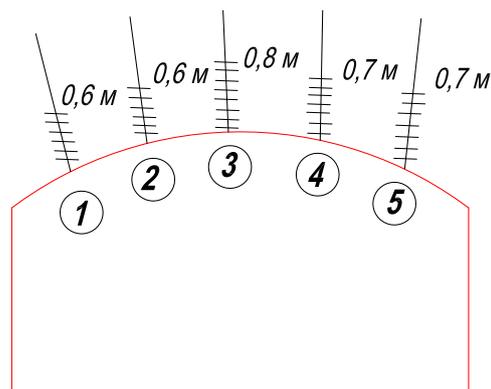


Рис. 11 - Схема расположения трещин на участке наблюдения выработки

При проведении натуральных исследований составляются планы измеренных трещин во вмещающем массиве. Скорректированные результаты численного моделирования представлены на рис. 9, а значения, полученные на основе калибровки модели, в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства горного массива после калибровки

Название пород	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Габбро – долерит	75,3	58207	0,26

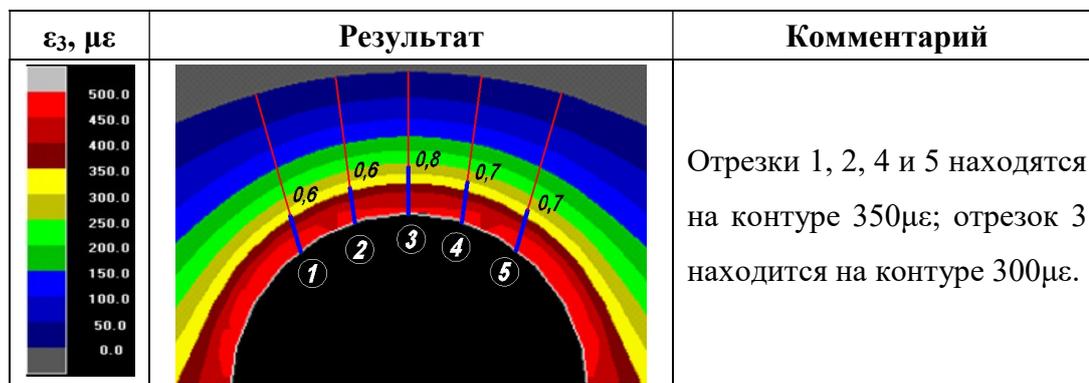


Рис. 12 - Результаты моделирования зоны растягивающих деформаций после проведенной калибровки

После калибровки схема трещин в кровле выработки согласована с зоной растягивающих деформаций, полученной с помощью численной модели, построенной в программном комплексе Mar3D. Разрушение пород может происходить в зоне растягивающих деформаций со значениями $\geq 350 \mu\epsilon$.

Результаты сравнения математических уравнений и методов численной калибровки показали, что:

1. Предельное значение деформации на стадии образования трещин составляет $178\mu\epsilon$ (принимается $\epsilon_{c1} = 200\mu\epsilon$), а на стадии развития трещин $343\mu\epsilon$ (принимается $\epsilon_{c2} = 350\mu\epsilon$); результаты калибровки численной модели показали, что значение растягивающих деформаций на стадии роста трещин составляет $350\mu\epsilon$.

2. Расстояние от кровли выработки до зоны зарождения трещины составило $0,8$ м. На основе результатов численного моделирования мощности зон растягивающих деформаций расстояние от кровли до границы зоны растягивающих деформаций со значением $350\mu\epsilon$ составляет ориентировочно $0,91$ м.

По результатам испытаний образцов горных пород в лаборатории $\epsilon_c = 200\mu\epsilon$, в шахтных условиях установлено, что при значениях $\epsilon_3 \approx 350\mu\epsilon$ в скальных массивах обнаруживаются первые трещины растяжения. Поэтому, принята величина $\epsilon_3 = 350\mu\epsilon$ в качестве численного критерия.

В третьей главе представлены результаты исследований и показано влияние основных факторов на закономерности образования зон растягивающих деформаций в массиве вокруг выработок на глубине свыше 1 км. Пример моделирования области исследуемых выработок с помощью программы Mar3D показан на рис. 13.

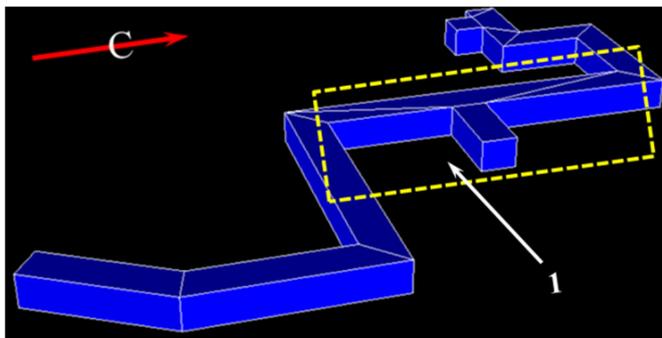


Рис. 13 - Схема рассматриваемого участка выработок на действующем руднике

Величины главных напряжений для условий гидростатического исходного напряженного состояния массива выбирались следующие: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \rho g H$

Формы выработок принимались – квадратная, круглая и арочная (рис. 14).

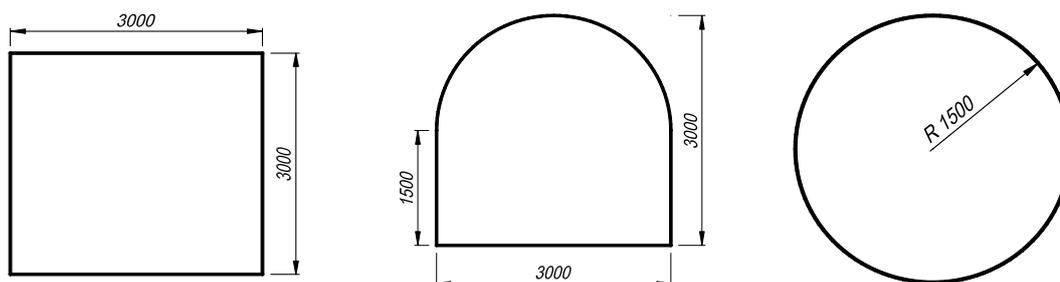


Рис. 14 - Геометрические формы выработок и их размеры

По результатам калибровки численной модели на исследуемом участке в габбро-долеритах интенсивная трещиноватость и формирование зон растягивающих деформаций развивается до границы со значениями $\epsilon_3 \geq 350\mu\epsilon$ и используется для определения расстояний от кровли ($H_{\text{кровля}}$) и боков ($H_{\text{бок}}$) выработки вчерне до границы $\epsilon_3 = 350\mu\epsilon$ (зоны вероятного разрушения массива) (рис. 15).

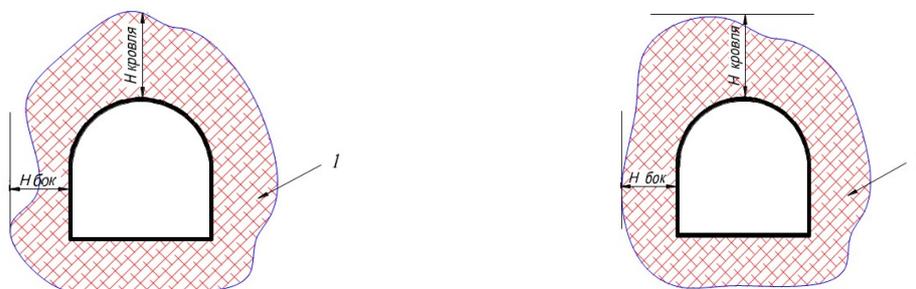


Рис. 15 - Расстояние от кровли и боков выработки вчерне до границы зоны растягивающих деформаций со значениями $\epsilon_3 \geq 350\mu\epsilon$

При проведении исследований, величины главных напряжений (в зависимости от глубины разработки), E , ν и Q -индекс варьировались, чтобы исследовать их влияние на мощность зон растягивающих деформаций.

❖ *Влияние изменения качества породного массива (индекс Q) на формирование зоны растягивающих деформаций*

Индекс Q характеризует скальный массив на основе расчетного среднего размера элементарного блока (RQD/J_n), прочности на сдвиг между блоками, оцененной как J_r/J_a и активный коэффициент напряженного состояния J_w/SRF .

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}, \quad (28)$$

С учетом полученных результатов установлено, что зоны растягивающих деформаций со значениями $\mu\epsilon \geq 350$ формируются в кровле и боках выработок. На рис. 16 показаны результаты численного моделирования расстояния от кровли и стенок арочной, квадратной и круглой выработки вчерне до границы зоны растягивающих деформаций со значениями $\mu\epsilon \geq 350$.

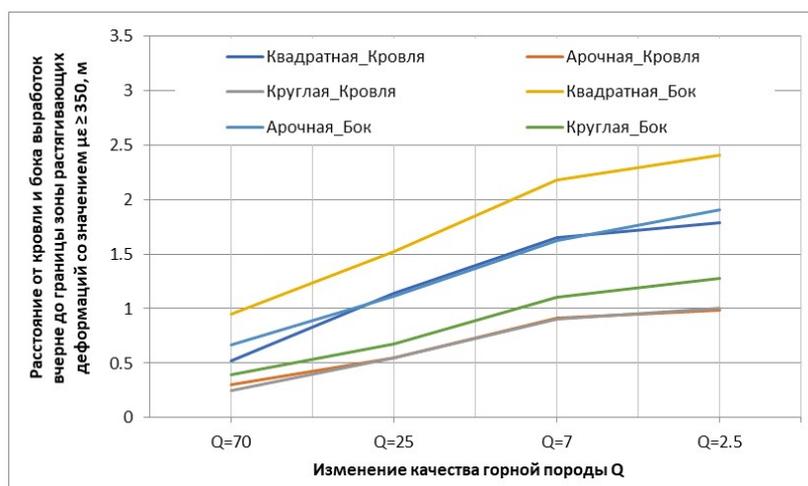


Рис. 16 - Глубина распространения зоны растягивающих деформаций в кровле и в боках выработок при изменении индекса Q

❖ *Влияние изменения коэффициента Пуассона горных пород на формирование зоны растягивающих деформаций*

На рис. 17 показаны результаты численного моделирования расстояния от кровли и стенок арочной, квадратной и круглой выработки вчерне до границы зоны растягивающих деформаций со значениями $\mu\epsilon \geq 350$.

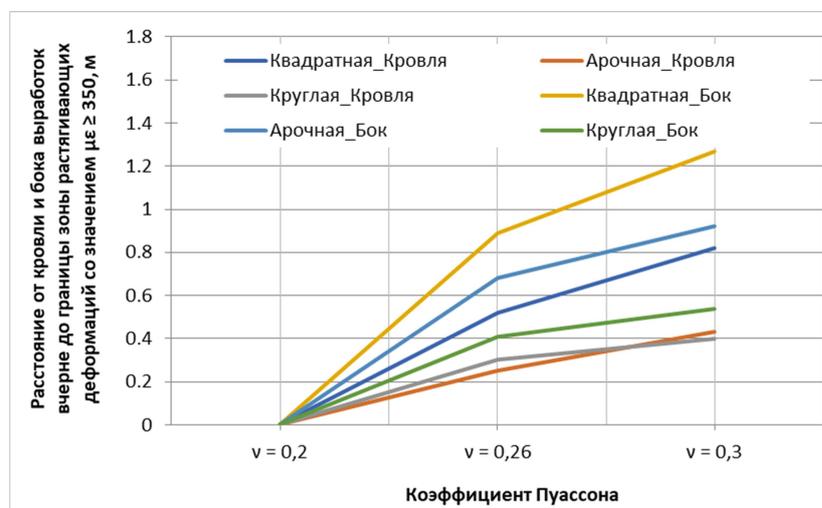


Рис. 17 - Глубина распространения зоны растягивающих деформаций в кровле и в боках выработок при изменении коэффициента Пуассона горных пород

❖ *Влияние изменения модуля упругости горных пород на формирование зоны растягивающих деформаций*

На рис. 18 показаны результаты численного моделирования расстояния от кровли и стенок выработок вчерне до границы зоны растягивающих деформаций.

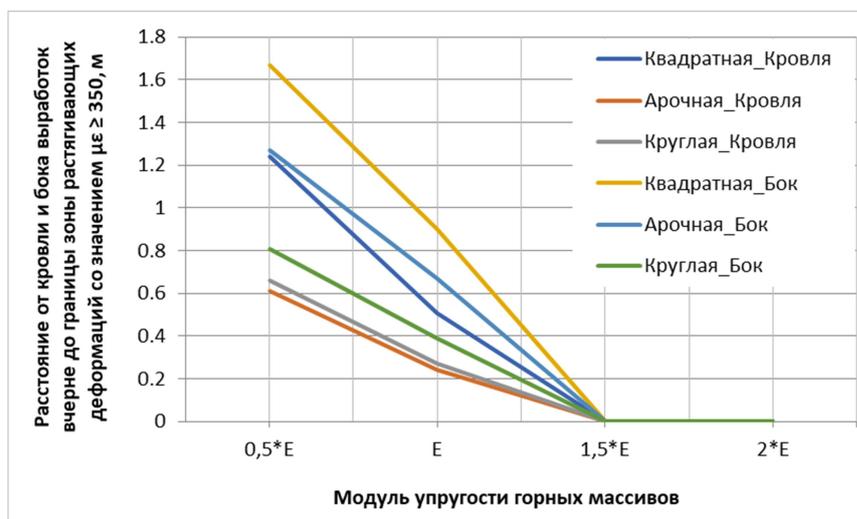


Рис. 18 - Глубина распространения зоны растягивающих деформаций в кровле и в боках выработок при изменении модуля упругости

❖ *Влияние изменения главных напряжений на формирование зоны растягивающих деформаций*

На рис. 19 показаны результаты численного моделирования расстояния от кровли и стенок выработок вчерне до границы зоны растягивающих деформаций.

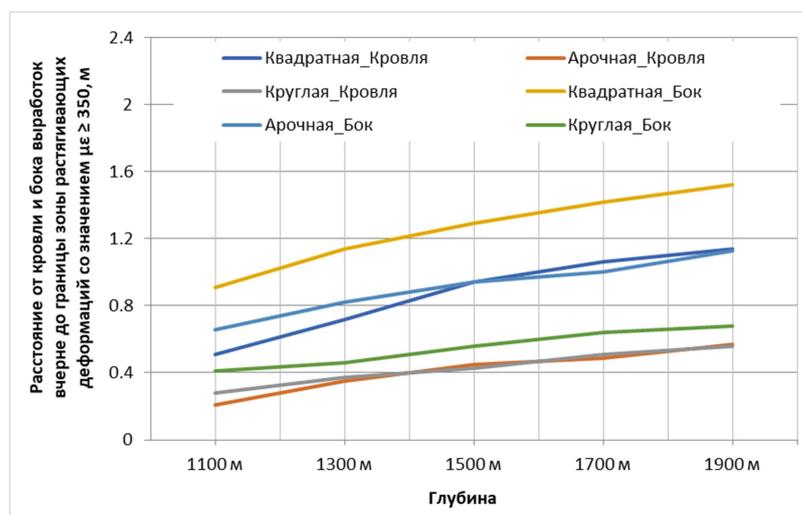


Рис. 19 - Глубина распространения зон растягивающих деформаций в кровле и в боках выработок при изменении главных напряжений с глубиной

При изменении параметров в небольшом диапазоне значений происходят значительные изменения расстояния от кровли или боков выработки до границы $\epsilon_3=350\mu\epsilon$. Сравнение степени влияния параметров на формирование зон растягивающих деформаций определяется выражением:

$$S(a_k) = \max \left\{ \left(\frac{U_{a_k \max} - U^*}{U^*} \right); \left(\frac{U^* - U_{a_k \min}}{U^*} \right) \right\}, \quad (29)$$

где $S(a_k)$ - степень влияния параметра a_k ; U^* - значение стандартной характеристики, соответствующее набору основных значений параметров; $U_{a_k \max}$ и $U_{a_k \min}$ - максимальное и минимальное значение в пределах диапазона изменения параметра a_k , соответственно.

Таблица 4 - Основные значения и вариации параметров

Название параметра	Е, ГПа	ν	Индекс Q	Глубина Н, м
Основное значение	63,1	0,26	52,5	1150
Диапазон изменения	31,5÷157,7	0,2÷0,3	2,5÷70	1100÷1900

Чтобы объяснить влияние различных параметров на зону растягивающих деформаций, гистограммы анализа степени влияния выполняются в соответствии с определением степени влияния, приведенным в уравнении (20), и каждым параметром в пределах диапазона изменения.

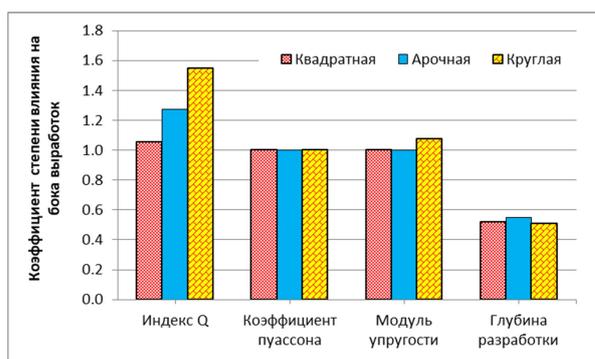


Рис. 20 - Гистограмма анализа степени влияния различных параметров на бока

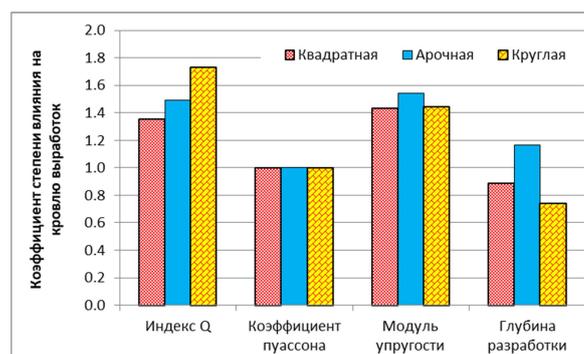


Рис. 21 - Гистограмма анализа степени влияния различных параметров на кровлю

Таблица 5 - Степень влияния параметров на формирование зоны растягивающих деформаций в кровле и боках выработок

	В кровле	В боках
Квадратная	$E > \text{Индекс } Q > \nu > H$	$\text{Индекс } Q > E > \nu > H$
Арочная	$E > \text{Индекс } Q > H > \nu$	$\text{Индекс } Q > E > \nu > H$
Круглая	$\text{Индекс } Q > E > \nu > H$	$\text{Индекс } Q > E > \nu > H$

Результаты на таблице 5 показывают, что индекс Q и модуль упругости горных пород массива оказывают наиболее значительное воздействие в образовании зоны растягивающих деформаций в боках и кровле арочной, круглой и квадратной выработки.

Четвёртая глава посвящена расчету крепления горных выработок с учетом мощности зон растягивающих деформаций.

На рис. 22 показана возможность разрушения (коэффициент прочности < 1) с параметрами хрупкости Хука-Брауна. Видно, что на кровле и боках выработок породы будут наблюдаться проблемы со стабильностью.

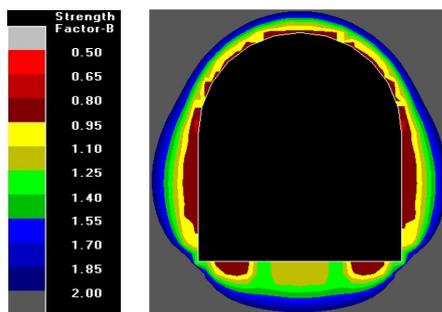


Рис. 22 - Потенциальное разрушение с параметрами хрупкости Хука-Брауна

Выбор параметров анкера: Расчет длины анкера при наличии трещин растяжения может быть выполнен с помощью программы Map3D. Этого можно достичь, если предположить, что реакцию горных пород можно описать двумя категориями: зона с нарушениями и зона с зарождением трещин, как показано на рисунке 23.

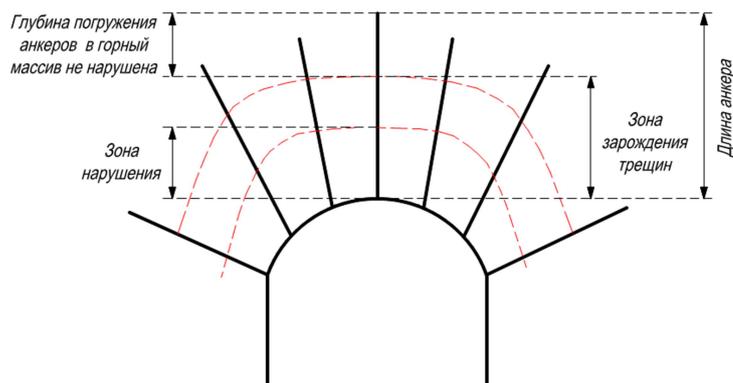


Рис. 23 - Две зоны используются для расчета длины анкеров

Глубина нарушенной породы рассчитывается от границы выработок до зоны растягивающих деформаций со значениями $\mu\epsilon \geq 350$. Длина анкерной крепи определяется зоной зарождения трещин растяжения в горном массиве. Это будет определяться путем определения расстояния от границы выработок до зоны растягивающих деформаций со значением $200\mu\epsilon$. Для погружения анкеров в монолитную породу необходимо, чтобы анкера проходили через зону растягивающих деформаций со значением $200\mu\epsilon$.

Зоны растягивающих деформаций (зоны зарождения трещин) со значениями $\mu\epsilon \geq 200$ формируются в кровле и боках выработки на глубину $H_{\text{кровля}} = 1,36$ м, $H_{\text{бок}} = 1,54$ м. Установлено, что проектная длина анкеров $2,1 \div 2,4$ м достаточна для закрепления их замковой части в устойчивой части массива за зоной действия растягивающих деформаций со значениями $\mu\epsilon \geq 350$.

Обследование трещин растяжения показало, что глубина трещинообразования при растяжении, вызванного напряжением в кровле, достигает до 1,6 м, при этом наиболее интенсивное повреждение происходит в пределах первых 0,1÷0,8 м. Объем потенциального обрушения горных пород составляет 29 м³, что соответствует массе примерно 85 т.

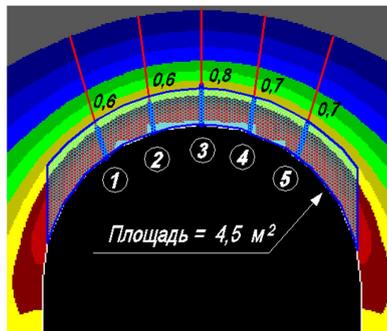


Рис. 24 - Площадь потенциальной разрушающей поверхности оценивается по зоне растягивающих деформаций со значениями $\mu\epsilon \geq 350$

Глубину распространения зон растягивающих деформаций в массиве горных пород можно контролировать, уменьшая расстояние между анкерами. Рис. 25 показывает влияние расстояния между анкерами на глубину распространения; это указывает на то, что глубина распространения зон растягивающих деформаций мало изменилась, так как расстояние между болтами было уменьшено до 1,1 м или меньше. Поэтому оптимальное расстояние между анкерами для массива горных пород было рекомендовано равным 1,1 м.

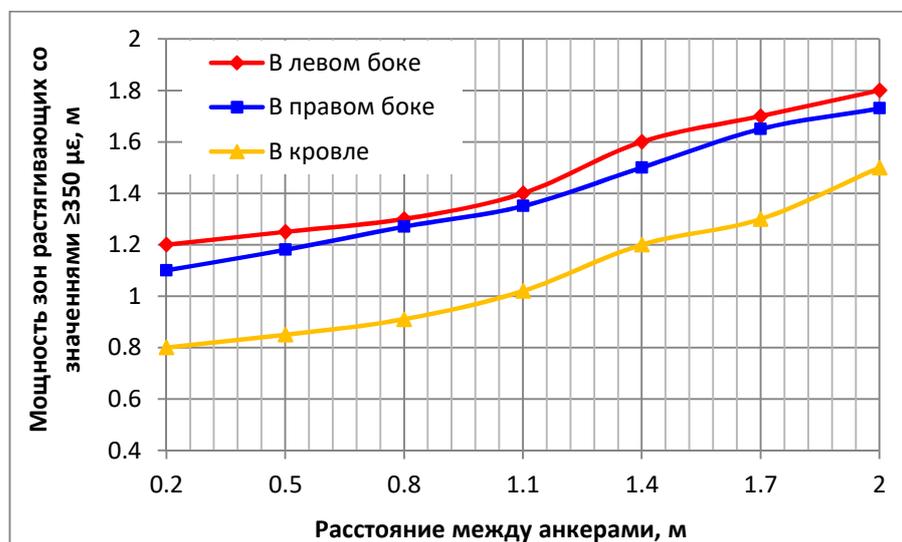


Рис. 25 - Влияние расстояния между анкерами на глубину распространения зон растягивающих деформаций вокруг выработок

Результаты расчетов для перемещения и мощность зон растягивающих деформаций со значениями $\geq 350\mu\epsilon$ для различной толщины торкретбетона в выработках показаны на рис. 26.

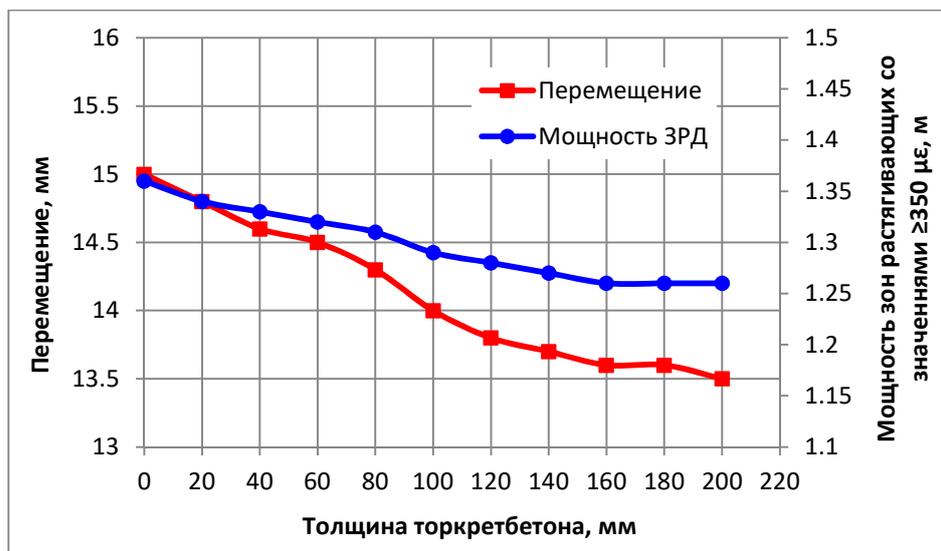


Рис. 26 - Перемещение и мощность зон растягивающих деформаций вокруг выработок в зависимости от толщины торкретбетона

Перемещение и мощность зон растягивающих деформаций уменьшались с увеличением толщины торкретбетона. Однако уменьшение перемещения было меньше, чем для мощности зон растягивающих деформаций. Это указывает на то, что торкретирование оказывает более значительное влияние на мощность зон растягивающих деформаций, чем перемещение. Если толщина торкретбетона была меньше 60 мм, то уменьшение перемещения и мощность зон растягивающих деформаций не оказывает большого влияния. Если толщина торкретбетона была больше 60 мм, перемещение и глубина распространения немного уменьшились бы. Таким образом, разумной толщиной торкретбетона было сочтено 60 мм.

Определение размеров зон растягивающих деформаций с помощью численного моделирования и дальнейшая калибровка модели позволила уточнить правильность выбранных расчетных параметров анкерной крепи выработок, представленных в таблице 6.

**Таблица 6 - Параметры крепи выработок при значении растягивающих деформаций
350με**

Типы и параметры крепи			
Временная (предохранительной)	Отставание временной (предохранительной) крепи, м	Постоянная	Отставание постоянной крепи, м
+ Толщина торкретбетона: не менее 60 мм по кровле и бокам + По кровле: сталеполимерный анкер (СПА), фрикционные анкера (ФА), длинные анкера 2,4 м с шагом 1,1×1,1 м + По бокам: СПА, ФА, длинные анкера 2,4 м с шагом 1,1×1,1 м	Торкретбетон кровля - 5,0 борта - 10,0	+ Толщина торкретбетона: не менее 60 мм по кровле и бокам. + По кровле: СПА, длинные анкера 2,4 м с шагом 1,1×1,1 м и металлическая сетка (для Swellex) с ячейкой не более 200 мм. + По бокам: СПА, длинные анкера 2,4 м с шагом 1,1×1,1 м.	Торкретбетон - 15,0 Металлическая сетка (для СПА) - 15,0
	Анкеры - 1,1	+ Толщина торкретбетона: не менее 60 мм по кровле и бокам. + По кровле: ФА, длинные анкера 2,4 м с шагом 1,1×1,1 м и армокаркас (для СЗА) 0,95×0,95 м. + По бокам: ФА, длинные анкера 2,4 м с шагом 1,1×1,1 м и армокаркас (для СЗА) 0,95×0,95 м.	Торкретбетон - 15,0 Металлическая сетка (для Swellex) - 15,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача определения мощности зон растягивающих деформаций, формируемых при проходке и поддержании подготовительных горных выработок на глубинах свыше 1 км, что имеет существенное значение для повышения эксплуатационной надежности и безопасности подземных горных работ.

Основные научные результаты и выводы по выполненным в диссертации исследованиям заключаются в следующем:

1. Проведен анализ современного состояния исследований в области обеспечения устойчивости подземных выработок в процессе их строительства на глубинах свыше 1 км. Установлено, что при расчете устойчивости проходческих выработок на таких глубинах необходимо учитывать наличие трещин растяжения даже в условиях действия только сжимающих нагрузок.

2. Получены аналитические выражения для прогнозирования образования и распространения трещин растяжения на основе физико-механических свойств горных пород (предела прочности на сжатие, коэффициента Пуассона и модуля упругости).

3. Определено влияние глубины ведения горных работ, форм выработок, главных действующих напряжений в массиве, физико-механических свойств горных пород и

качества породного массива (по системе Бартона) на формирование зоны растягивающих деформаций вокруг выработок, представленное в виде графических зависимостей.

4. Установлено, что качество породного массива (по системе Бартона) и модуль упругости горных пород оказывают наибольшее влияние на образование зоны растягивающих деформаций. Ранжирование влияния параметров на формирование зон растягивающих деформаций имеет большую значимость при расчете систем крепления.

5. Разработана методика калибровки численной модели для обеспечения соответствия расчетного расстояния от кровли выработки до участка возникновения первой трещины в массиве горных пород расстоянию от кровли выработки до участка растягивающих деформаций в массиве (участок возможного обрушения массива).

6. Определено, что в условиях ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» установку крепи следует производить для зон растягивающих деформаций со значением $\mu\epsilon \geq 350$, при этом толщина торкретбетона должна быть не менее 60 мм, или следует применять металлическую сетку с ячейкой не более 200 мм и длинные анкеры (2,4 м) по кровле и бокам выработки.

7. Разработаны «Методические рекомендации по прогнозу мощностей зон растягивающих деформаций и креплению подготовительных горных выработок на больших глубинах», принятые к использованию на Таштагольской и Шерегешской шахтах филиала «Евразруда – филиал АО «Евраз ЗСМК».

Основные положения научно-квалификационной работы (диссертации) опубликованы в следующих статьях:

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Нгуен Ван Минь, В. А. Еременко, М. А. Сухорукова, С. С. Шерматова. Оценка влияния формы выработки и действующих напряжений в массиве на формирование зоны растягивающих деформаций на глубине свыше 1 км // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Издательство «Горная книга». – №6. – 2020. – С. 65–75 (индексируется в базе данных Scopus).

2. Нгуен Ван Минь, Умаров А. Р., Янбеков А. М., Хажыылай Ч. В. Прогноз возникновения и распространения трещин растяжения на основе физико-механических свойств горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Издательство «Горная книга». № 6 – 2021. – С. 84–94 (индексируется в базе данных Scopus).

3. Нгуен Ван Минь, Хажыылай Ч. В., Умаров А. Р., Янбеков А. М. Оценка степени влияния основных параметров на формирование зоны растягивающих деформаций вокруг

выработок на глубине свыше 1 км // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Издательство «Горная книга». № 8 – 2021. – С. 104–113 (индексируется в базе данных Scopus).

В прочих изданиях:

4. Нгуен Ван Минь, Еременко В. А., Лейзер В. И., Сухорукова М. А., Шерматова С. С. Определение размеров зон растягивающих деформаций во вмещающем массиве подготовительных выработок // Инженерная физика. – № 7. – 2020. – С. 39–48.

5. Нгуен Ван Минь, Еременко В.А., Умаров А.Р., Косырева М.А. Оценка влияния формы выработки и действующих напряжений на формирование зон нелинейных деформаций в массиве горных пород в условиях сверхглубин свыше 1,5 км // Тезисы докладов X международной научно-технической конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу». Магнитогорск – 2019. – С. 106, 289–290.

6. Нгуен Ван Минь, Еременко В.А., Умаров А.Р., Косырева М.А. Оценка влияния формы выработки и действующих напряжений на формирование зон нелинейных деформаций в массиве горных пород в условиях сверхглубин свыше 1,5 км // Материалы X международной научно-технической конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу». Магнитогорск – 2019. – С. 217–224.