

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)»



На правах рукописи

ГАРИФУЛИНА Ирина Юрьевна

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДЭТАЖНО-КАМЕРНОЙ
СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ С ФОРМИРОВАНИЕМ РАЗНОПРОЧНЫХ
ЗАКЛАДОЧНЫХ МАССИВОВ НА ОСНОВЕ БУТОБЕТОННОЙ И
ПОРОДНОЙ ЗАКЛАДКИ**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор Габараев О.З.

Владикавказ – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение	4
1.	АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ РАЗРАБОТКИ МАЛОМОЩНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ РУДНЫХ ТЕЛ	10
1.1	Условия залегания маломощных месторождений	10
1.2	Структурные особенности строения месторождения	16
1.3	Опыт отработки Дукатского месторождения	19
1.4	Анализ теории и практики отработки маломощных жильных месторождений	24
1.5.	Цель, задачи и методы исследований	36
2.	ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ МАЛОМОЩНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ РУДНЫХ ТЕЛ	39
2.1.	Исследование структурных особенностей строения массива	39
2.2	Изучение влияния трещиноватости массива на устойчивость обнажений горных пород	42
2.3.	Особенности технологии отработки месторождения	46
2.4.	Исследование параметров напряжений в зоне очистных работ	49
2.5.	Определение высоты этажа и предельных пролетов обнажений	52
2.6.	Определение предельного пролета обнажений горных пород	58
	Выводы по 2 главе	60
3.	ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАССИВОВ ИЗ ТВЕРДЕЮЩЕЙ БУТОБЕТОННОЙ ЗАКЛАДКИ И СЫПУЧИХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД	62
3.1.	Технология приготовления закладочных смесей на руднике	62
3.2.	Разработка составов закладочных смесей	65
3.3.	Влияние крупности пород на прочность бутобетонной смеси	67

3.4. Расчет параметров междуэтажных и междукамерных целиков	72
3.5 Исследование степени уплотнения массива из породной закладки	80
Выводы по 3 главе	84
4. ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ МАЛОМОЩНЫХ РУДНЫХ ТЕЛ С ФОРМИРОВАНИЕМ РАЗНОПРОЧНЫХ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАССИВОВ	86
4.1. Технология подэтажно-камерной выемки маломощных рудных тел с использованием комбинированной бетообетонной и породной закладки	86
4.2 Отработка запасов на опытном участке	89
4.3 Оценка экономической эффективности использования технологических рекомендаций	96
Выводы по 4 главе	100
Заключение	101
Список использованной литературы	104

Введение

Актуальность работы. Для реализации программных задач «Стратегии развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» на горнорудных предприятиях АО «Полиметалл» предусмотрено увеличение мощности по добыче золотосеребряных руд с вовлечением в разработку рудных залежей нижних горизонтов, характеризующихся сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями.

Основной объем запасов золотосеребряных руд месторождений Дукат, Лунное, Арылах разрабатывается слоевыми и подэтажно-камерными системами разработки с породной и льдопородной закладкой, что обуславливает значительные потери и разубоживание ценных руд. Повысить полноту и качество выемки полезных ископаемых возможно за счет совершенствования систем разработки с применением инновационных видов закладочных смесей. Широкое применение технологий с закладкой выработанного пространства твердеющим смесями на основе цементных вяжущих сдерживается высокими инвестициями на строительство дорогостоящих закладочных комплексов, инфраструктуры трубопроводов, высокой себестоимостью закладочных работ.

Одним из наиболее перспективных путей снижения затрат на закладочные работы при отработке маломощных крутопадающих рудных залежей, является использование твердеющей породной бутобетонной закладки, которая не требует строительства специального закладочного комплекса и позволяет вести приготовление бутобетонной смеси на месте её размещения в выработанном пространстве подземного рудника. Расширение возможностей и условий применения бутобетона для закладки выработанного пространства сдерживается отсутствием закономерностей формирования прочностных свойств бутобетонных смесей для обоснования технологических параметров систем разработки. Обоснование параметров подэтажно-камерной системы разработки с формированием разнопрочных закладочных массивов на основе использования различного сочетания бутобетонной и породной закладки является актуальной научно-практической и технологической задачей.

Цель работы – обоснование параметров подэтажно-камерной системы разработки с формированием разнопрочных закладочных массивов на основе бутобетонной и породной закладки, обеспечивающих повышение показателей качества и полноты извлечения руды из недр при отработке маломощных крутопадающих рудных тел.

Идея работы заключается в использовании закономерностей изменения прочностных свойств и особенностей формирования комбинированного закладочного массива из твердеющей бутобетонной закладки и сыпучих скальных пород при обосновании конструктивных параметров подэтажно-камерной системы разработки для повышения показателей качества и полноты извлечения руды из недр в различных горно-геологических и геомеханических условиях разработки месторождения.

Задачи исследования:

- анализ современного состояния технологии разработки маломощных крутопадающих рудных тел в мировой и отечественной горнорудной практике;
- исследование структурных особенностей и закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород;
- установление влияния крупности заполнителя на прочностные свойства твердеющей бутобетонной закладки;
- исследование влияния геометрических параметров выработанного пространства камеры на степень уплотнения закладки из сыпучих скальных пород;
- разработка технологии и обоснование параметров формирования разнопрочных закладочных массивов на основе сочетания бутобетонной закладки различного состава с сыпучими скальными породами;
- технико-экономическая оценка эффективности разработанных технологических решений.

Предмет исследования – параметры технологии формирования разнопрочных закладочных массивов на основе сочетания бутобетонной

закладки различного состава сыпучими скальными породами при разработке маломощных крутопадающих рудных тел подэтажно-камерной системой разработки.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели использован комплексный метод исследований, в том числе: анализ и обобщение опыта подземной разработки месторождений руд цветных металлов на отечественных и зарубежных рудниках, моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород методом конечных элементов, оценка состояния массива методом дискования керна, физическое моделирование на эквивалентных материалах, натурные исследования свойств и процессов формирования разнопрочного закладочного массива на основе бутобетонной породной закладки, обработка результатов исследований и технико-экономический анализ.

Положения, защищаемые в работе:

1. Технологии отработки маломощных крутопадающих рудных тел подэтажно-камерными системами разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства путём формирования бутобетонных закладочных массивов в шахматном порядке и закладки оставшейся части выработанного пространства камер скальными породами от проходческих работ позволяют управлять напряженно-деформированным состоянием массивов и обеспечивать устойчивость бутобетонного массива действующим статическим и динамическим нагрузкам.
2. Сформированные в шахматном порядке через каждые 25-40 м массивы из твердеющей бутобетонной закладки, при разработке маломощных крутопадающих рудных тел, способствуют увеличению несущей способности всей горнотехнической конструкции обрабатываемого этажа, за счет уменьшения вертикального пролета погашенного очистного пространства.
3. В условиях отработки маломощных крутопадающих месторождений подэтажно-камерными системами разработки с комбинированной закладкой

выработанного пространства увеличение доли фракции крупного заполнителя +50-200 мм с 20% до 60% в составе твердеющих бутобетонных смесей обеспечивает приращение прочности закладки на 0,5-0,7 МПа на 28 сутки твердения.

Научная новизна работы:

1. Обоснован способ формирования разнопрочных закладочных массивов при подэтажно-камерной системе разработки на основе сочетания бутобетонной и породной закладки, заключающийся в возведении в выработанном пространстве в шахматном порядке бутобетонных твердеющих массивов и закладки оставшейся части камер скальной породой от проходческих работ, что обеспечивает снижение потерь и разубоживания руды соответственно на 3-5% и 12-17% за счет повышения устойчивости формируемых горнотехнических конструкций действующим нагрузкам.

2. Выявлены закономерности формирования закладочного массива из твердеющей бутобетонной смеси при применении подэтажно-камерных систем разработки при отработке маломощных крутопадающих рудных тел, включающие логарифмически зависимости прочности твердеющей бутобетонной смеси от содержания крупного заполнителя.

3. Установлена нелинейная зависимость коэффициента уплотнения породной закладки от геометрических характеристик закладываемой камеры $K_u = 0,343964 + 0,018556H_s + 0,010990\alpha - 0,007014M_o - 0,000221H_s^2 - 0,000053\alpha^2 + 0,000508 M_o^2 - 0,000004H_s\alpha + 0,000043 H_sM_o + 0,000104\alpha M_o$ (где H_s и M_o – высота и ширина камеры; α – угол наклона стенок камеры).

4. Выявлено, что величина предельного пролета обнажения (l_o), при подэтажно-камерных системах разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства, зависит от средней глубины разработки (H_{cp}) и коэффициента крепости горных пород (f) и может быть определена по регрессионной зависимости $l_o = 40,56 - 15,55 H_{cp} - 0,18H_{cp}^2 + 12,78f - 3,88f^2$.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечиваются корректностью постановки цели и задач

исследований, сопоставимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, не противоречием их известным теориям подземной геотехнологии, их качественной и количественной сходимостью с практикой подземной отработки месторождений полезных ископаемых системами разработки с закладкой выработанного пространства.

Практическая значимость работы: заключается в разработке технологических рекомендаций по совершенствованию поэтажно-камерной системы разработки на Дукатском руднике АО «Полиметалл» с формированием комбинированного разнопрочного и разномодульного массивов из твердеющей бутобетонной закладки и сыпучих скальных пород, обеспечивающей повышение полноты отработки и снижение разубоживания руды, утилизацию отходов производства и экономическую эффективность ведения горных работ.

Реализация работы. Основные научные положения и практические рекомендации использованы при подготовке и реализации проектов отработки месторождений Дукатского рудного узла АО «Полиметалл». Методы обоснования параметров подземной геотехнологии отработки маломощных крутопадающих месторождений использованы в учебном процессе в СКГМИ (ГТУ) при изучении курсов «Подземная геотехнология» и «Управление состоянием массива горных пород».

Личный вклад соискателя состоит в выборе цели и постановке задач исследования, непосредственном проведении теоретических и экспериментальных исследований, разработке технологии и способов формирования разнопрочных закладочных массивов с использованием бутобетонной и породной закладки различного состава, статистической обработке полученных результатов, расчете технико-экономических показателей, формулировании выводов и подготовке 25 публикаций по выполненной работе.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, 2020-2023 гг.), Международном научном форуме «Наука и инновации -

современные концепции» (Москва, 2020г.), XXXI Всероссийской научно-практической конференции «Естественно-научные и гуманитарные исследования: теоретические и практические аспекты» «Ростов-на-Дону, 2021г.), X Международной научно-практической конференции «Мировые тенденции развития науки и техники: пути совершенствования» (Москва, 2022г.), IV Международной научно-практической конференции «На перекрестке Севера и Востока» (Красноярск, 2023г.). ежегодных научно-технических конференциях СКГМИ (ГТУ) (Владикавказ, 2019-2023гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ, из них 6 в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 115 с. машинописного текста, содержит 51 рис., 33 табл., список использованной литературы из 110 наименований.

1. АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ РАЗРАБОТКИ МАЛОМОЩНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ РУДНЫХ ТЕЛ

1.1. Условия залегания маломощных месторождений

Основной особенностью разработки сложноструктурных месторождений является их тектоническая нарушенность, обусловленная системой различных разрывных нарушений и разломов (Рисунок 1.1).

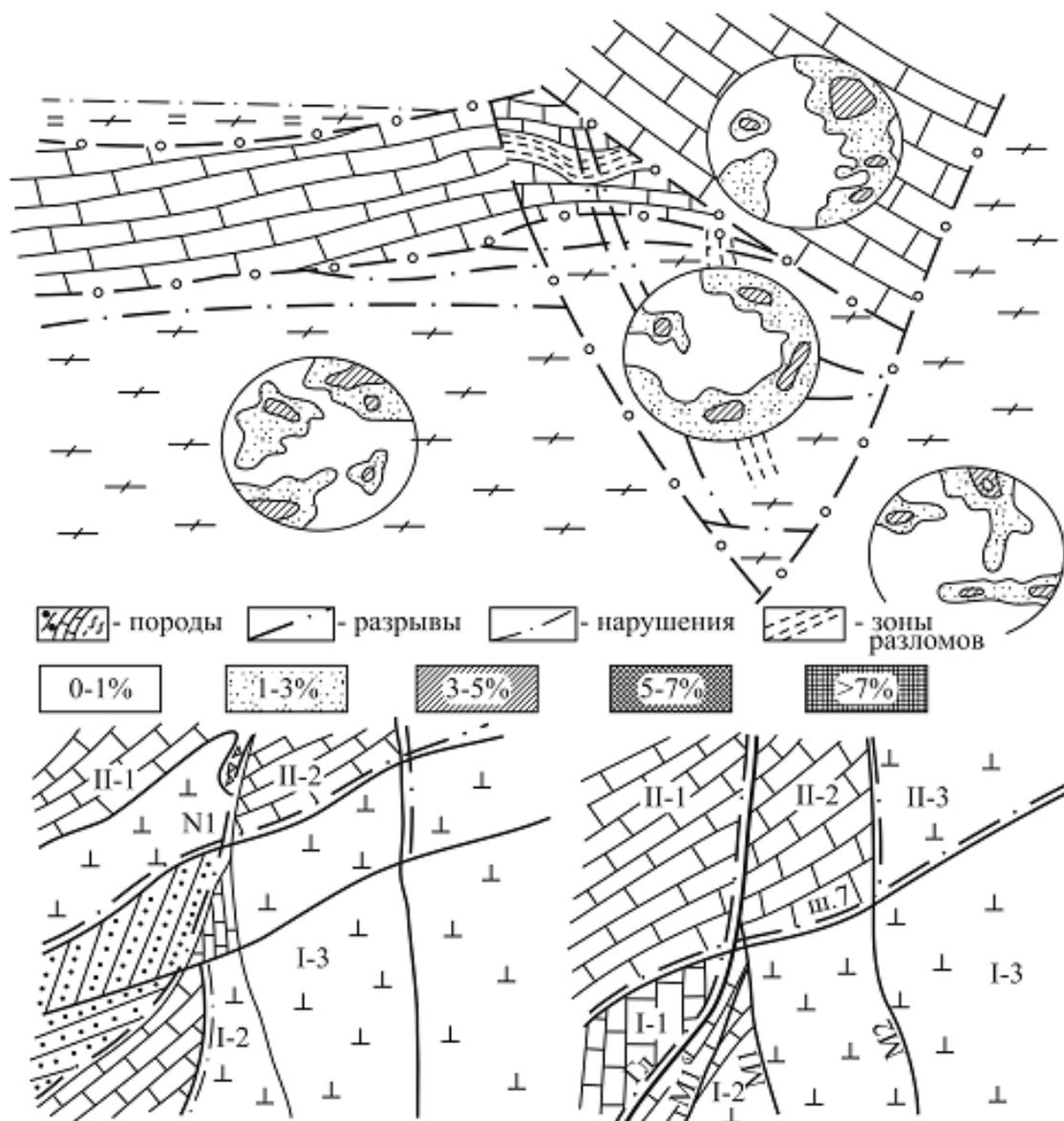


Рисунок 1.1 – План и разрезы месторождения с высокой тектонической нарушенностью

Вмещающими породами рудных локализаций в сложноструктурных месторождениях являются метаморфические, осадочные и осадочно-

вулканогенные породы. Степень трещиноватости пород на отдельных участках месторождений изменяется от средне до сильно трещиноватых, в местах вскрытия осадочных пород до интенсивно трещиноватых. Категория устойчивости пород на данных участках зависит от степени трещиноватости и сцепления пород. Категория устойчивости пород варьируется от устойчивых до неустойчивых.

Золотосеребряное месторождение «Дукат», на примере которого выполнены исследования настоящей диссертационной работы является типичным представителем сложноструктурных месторождений. Месторождение «Дукат» расположено на территории Омсукчанского района в 14 км от посёлка Дукат и эксплуатируется АО «Серебро Магадана» (Рисунок 1.2) [34].



Рисунок 1.2 – Карта Омсукчанского района

Географические координаты Дукатского месторождения: $62^{\circ} 33' - 62^{\circ} 35'$ СШ; $155^{\circ} 14' - 155^{\circ} 19'$ ВД. Площадь участка недр по лицензии составляет $1,13 \text{ км}^2$, площадь горного отвода – $33,7 \text{ км}^2$.

В орографическом отношении Дукатское месторождение находится в северной части Охотско-Колымского нагорья, Совмещенного с Охотско-Чукотским вулканогенным поясом и локализовано в Центральной части Омсукчанского хребта в пределах водосборных бассейнов ручьев Брекчия, Непонятный и ручьев Смелый, Каховка. Для района месторождения характерны типичные для Охотско-Чукотского вулканогенного пояса геоморфологические условия.

Рельеф района резко расчлененный, превышение водоразделов над днищами долин достигает 350 м и более. Крутизна склонов в среднем $25-30^{\circ}$, на отдельных участках, обычно в нижней части склонов, достигает $35-40^{\circ}$. Гребни склонов имеют слабо сглаженную форму, на некоторых участках ширина гребня не превышает нескольких участков метров. Максимальные абсолютные отметки в районе месторождения более 1400 м . Относительные превышения водоразделов над днищами долин составляют $400-500 \text{ м}$.

По технологической схеме переработка руды с Дукатского месторождения осуществляется один раз в квартал на Омсукчанской ЗИФ.

Ореолы потоков рассеяния серебра в пределах Дукатского рудного узла представлены на 1.3.

Дукатское месторождение относится к нагорно-глубинному типу и представлено наклонными (от 50° до 60°) и крутопадающими (от 60° до 85°) малой и средней мощности ($0,5-10 \text{ м}$) рудными телами, залегающими в породах средней крепости ($\sigma_{сж}=800-1000 \text{ кг/см}^2$) и крепких ($\sigma_{сж}=1000-1200 \text{ кг/см}^2$). Наибольшая мощность рудных тел и наиболее высокие содержания серебра наблюдаются под пачками туфогенно-осадочных пород или на участках широкого развития оперяющих трещин. На флангах рудных тел мощность и содержание серебра резко уменьшаются. Рудные зоны в структурном отношении

представляют собой сложные образования, контролируемые тектоническими нарушениями типа сбросов и взбросов.

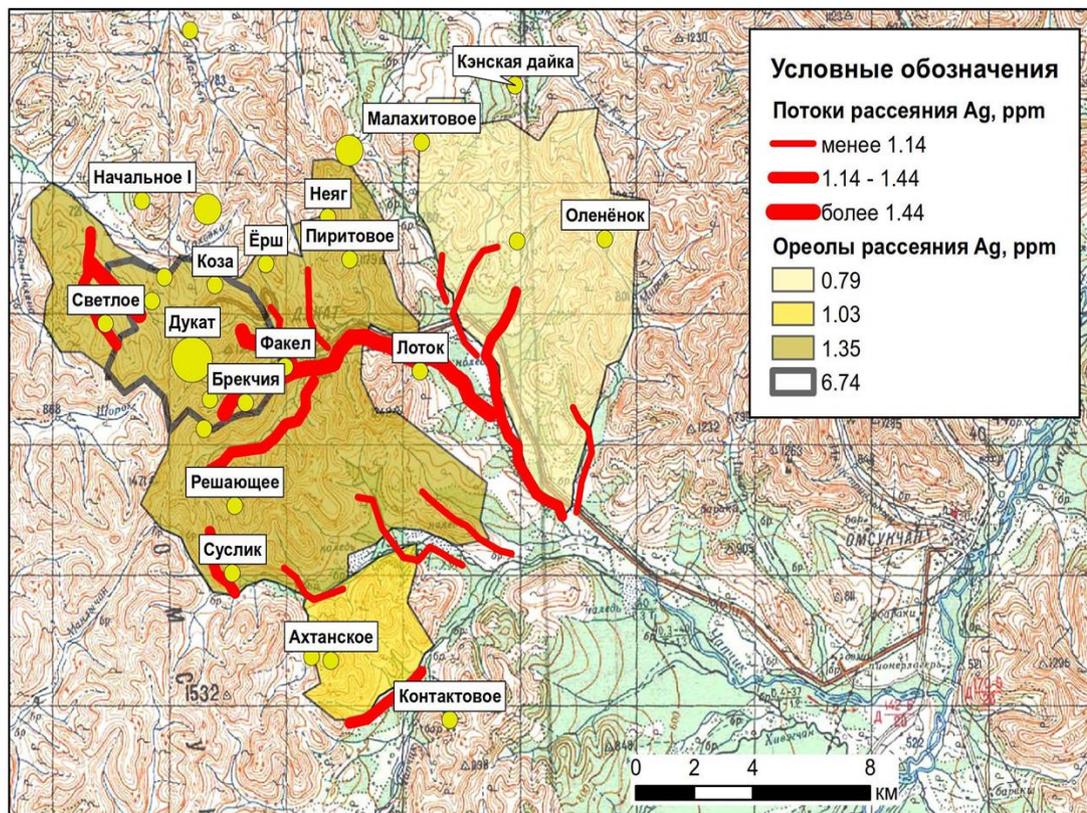


Рисунок 1.3 - Ореолы потоков рассеяния серебра

Формирование стволых жил сопровождалось образованием разно ориентированных систем прожилков различной мощности и многочисленных апофиз. Длительность и многостадийность формирования рудовмещающих структур и минералообразования обусловили сложное внутреннее строение рудных зон. По морфологическим особенностям, качественным и количественным параметрам оруденения рудные зоны разделяются на две группы: первая объединяет сложные тела существенно кварц-хлорит-адулярового состава, вторая объединяет тела более простой формы кварц-родонитового состава. Всего на месторождении выявлено 34 рудных зоны, в том числе 21 зона кварц-хлорит-адулярового состава и 13 зон кварц-родонитового состава.

Балансовые запасы месторождения «Дукат» для условий подземной отработки, с учетом отработки и погашения запасов на 01.01.2021 г., представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Балансовые запасы месторождения «Дукат»

Участок	Запасы руды, тыс.т	Содержание, г/т		Запасы металла	
		Au	Ag	Au, кг	Ag, т
Центральный	6299,6	1,1	576,4	7065,6	3631,2
Смелый	2471,0	1,2	686,6	3077,7	1696,6
Восточный	1839,4	1,7	693,9	3134,6	1276,4
Итого	10610,0	1,3	622,4	13278,0	6604,2

Месторождение расположено в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты. Мощность сезонного оттаивания не превышает 1,5 метра. Нижняя граница многолетнемерзлых пород под долинами крупных водостоков обнаружена на глубине от 70 до 160 метров. На самом месторождении нулевая изотерма вскрыта скважинами на глубине 400 метров от дневной поверхности. Температура мерзлых пород составляет -4-5°С.

Мощность многолетнемерзлой толщи достигает наибольших значений под водоразделами, а минимальных - под руслами ручьев Смелый, Светлый, Левая Брекчия, Шорох. С глубиной температура мерзлых пород закономерно повышается, в зависимости от гипсометрического положения и экспозиции склонов величина геотермической ступени для месторождения Дукат в среднем составляет 55-60 на 1°С. Лед, находящийся внутри трещин горных пород является цементирующим веществом в многолетнемерзлом массиве месторождения. При повышении температуры в горном массиве происходит таяние льда в трещинах, которое способствует снижению устойчивости горных пород, т.е. наступает «растепление» массива. Источниками повышения температуры горных пород в массиве является: климатический фактор (сезонное оттаивание верхней части многолетнемерзлой толщи); технологический фактор (взрывные работы, воздействие самоходного оборудования при проходческих и очистных работах).

Для контроля изменения температурного состояния горного массива на руднике Дукат проводится мониторинг температуры горных пород:

- гор.1000м – НТС №1000-1 и НТС №1000-2 температура в горном массиве изменялась в пределах от -14 до -2 °С, в среднем составила - 5°С, минимальная отметка температуры приходилась на зимний период времени;

- гор.930м – НТС №930-1 и НТС № 930-2 температура в массиве изменялась в пределах от -10 до -2°С, в среднем составила -4,8°С;

- гор.862м – НТС №862-1 температура в массиве изменялась незначительно, от -3 до -2°С;

- гор.810м – НТС №810-1 и НТС №810-2 температура в массиве составляет +1°С.

Основные физико-механические свойства горных пород представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2- Свойства горных пород месторождения [34]

Наименование пород	Крепость	Плотность, т/м ³	Коэффициент Пуассона	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.
Афировые липариты	11,7	2,56	0,17	11,4	36
Туфолавы липарит-дацитов	10,6	2,50	0,17	16,6	37
Риолиты	11,0	2,65	0,17	15,3	37

Исходные данные, характеризующие месторождение представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Исходные данные характеризующие месторождение [89]

Параметр	Значение
Глубина разработки (Н), м	0 ÷ 500 м
Коэффициент крепости вмещающих пород, f	8 ÷ 11
Углы падения рудных тел, град.	50 ÷ 85°
Нормальная мощность рудных тел (m_n), м	0,5 ÷ 10
Коэффициент структурного ослабления, $K_{стр}$	0,7
Коэффициент бокового распора, λ	1

1.2 Особенности строения месторождения

Месторождение расположено в центральной части рудного поля, в блоковой структуре, осложняющей куполовидное поднятие, и сформированной пересечением разломов северо-восточного и северо-западного простирания, (Рисунок 1.4) [62].

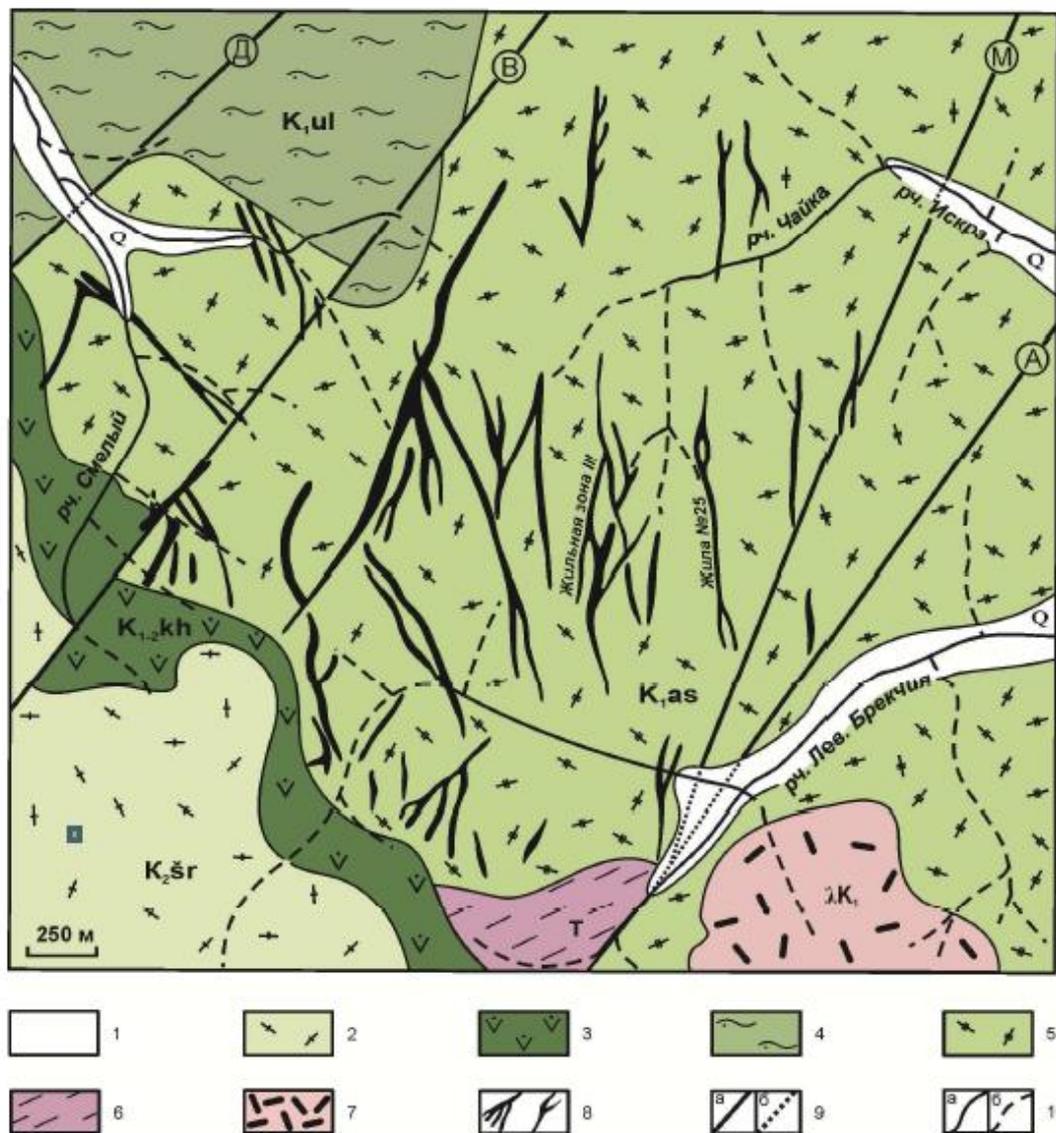


Рисунок 1.4 - Строение Дукатского Au-Ag месторождения:

1 – осадочные отложения; 2 – риолиты и риодациты; 3 – андезиты; 4 – конгломераты; 5 – риодациты; 6 – алевролиты, известняки; 7 – невадиты; 8 – рудные тела; 9 – разломы; 10 – водоносные участки

Область пересечения Омсукчанского субмеридионального и Буюндино-Гижигинского глубинных разломов является основным структурным элементом

блоковой структуры месторождения. Размещение рудных тел в пределах месторождения определяется разрывной тектоникой различного генезиса и возраста. Существенную роль в локализации оруденения играет трещинная тектоника вмещающих пород.

Многочисленные тектонические нарушения на месторождении по возрасту своего формирования сгруппированы пострудные, дорудные и внутрирудные.

Дорудные нарушения. По соотношению с рудными телами в группе дорудных нарушений выделены рудоконтролирующие и рудовмещающие структуры. Рудоконтролирующие разломы по отношению к интрузивно-купольному поднятию являются сквозными и расчленяют ее на ряд блоков. По возрасту они имеют доэффузивное заложение, характеризуются значительной протяженностью и крупными сбросовыми смещениями крыльев.

Основное промышленное оруденение сконцентрировано в Центральном блоке, ограниченном Амплитудным и Восточным разломами, к северо-западу блоки ограничены Восточным и Диагональным, Диагональным и Начальным разломами. Промышленное оруденение на месторождении затухает, к юго-востоку, где на поверхность выходят наиболее эродированные эпидот-содержащие породы купольной структуры, оруденение отсутствует.

Северо-восточные разломы имеют простирание $40-45^\circ$, падение крутое северо-западное и представляют собой сбросо-сдвиги с амплитудами перемещения крыльев до 50-300м. Прослеженная длина от первых до 15км, мощность тектонитов достигает 20-30м, в местах ветвления - до 100м.

Северо-Западный разлом прослежен на 4 км, имеет простирание 300° , погружается к северо-востоку под углами $75-80^\circ$. Смещение по разлому сбросовое - северо-восточный блок опущен на расстояние до 200м.

К категории рудоконтролирующих разломов отнесены мощные сколовые зоны северо-восточного простирания (60°), в послерудное время залеченные дайками базальтов. Выделено две зоны: северная, мощностью 120м, и южная, мощностью 60м. Прослеженная длина зон 9км, падение вертикальное,

перемещения по ним незначительные. С северо-востока зоны ограничены северо-западным нарушением.

Рудовмещающие разломы сконцентрированы в Центральном блоке рудного поля, ограниченном Амплитудным, Восточным и Северо-Западным нарушениями. Рудовмещающие разломы различаются по пространственным параметрам, морфологии, характеру вещественного выполнения, времени заложения и генезису. Выделено два структурно-генетических класса разрывов: класс А крутопадающие разрывы (60-90%) и класс Б пологопадающие разрывы (45-55°). Крутопадающие разрывы имеют доэффузивное заложение и относятся к сколовому типу нарушений. Пологопадающие разрывы являются оперяющими отрывными нарушениями крупно амплитудных сбросов и имеют постэффузивный возраст заложения. В структурно-генетических классах разрывов выделено по четыре структурных типа, различающихся своим простиранием: северо-восточные (35-45°), субмеридиональные (346-10°), северо-западные (315-345°) и комбинированные, составленные трещинами разной ориентировки и угла падения. Наибольшим распространением пользуются разрывы субмеридионального простирания, резко уступают им разрывы иных направлений.

Внутрирудные разрывные нарушения. Внутри- и межстадийная тектоническая активность характерное свойство рудообразования на месторождении. Следы внутрирудной тектонической активности присутствуют повсеместно и проявлены в формировании кокардовых текстур, текстур пересечений, смещения и т.д.

Межстадийная тектоническая активизация привела к наложению более поздних минеральных ассоциаций на более ранние и обусловила совмещение разных минеральных парагенезисов в одних и тех же трещинах.

Пострудные тектонические нарушения. Пострудная тектоническая активность широко проявлена на месторождении и протекала в два этапа: преддайковый и последайковый. Преддайковый этап заключается в раскрытии ранее заложённых сколовых систем северо-восточного (60%) простирания и

последующим заполнением их базальтовым расплавом. Базальтовые дайки, рассекая жилы практически без смещения, обуславливают блоковое строение последних. Блоки участки жил разделенные дайками, часто имеют разные углы падения. Размеры блоков достигают десятков метров по простиранию.

Постдайковый этап тектонической активности проявился на отдельных участках в виде смещений даек и жил и формированием зон лимонитизированных брекчий мощностью до нескольких десятков метров. Зоны брекчий, дробленые породы и тектонические швы имеют крутое падение, согласное, реже секущее простирание по отношению к дайкам. Протяженность зон трещиноватости сотни метров, отдельных разрывов десятки метров. По характеру проявления последайковые разрывы являются сдвигами, с максимальными смещениями крыльев до 20-25м, но чаще амплитуда смещения не превышает долей метра. Относительно рудовмещающих жил пострудные разрывы делятся на поперечные, диагональные и продольные. Поперечные и диагональные разрывы встречаются чаще и выражены прямолинейными крутопадающими трещинами, группирующимися в зоны шириной до десятков метров. Продольные разрывы располагаются в плоскости жил и выражены системой мелких, коротких, криволинейных трещин, которые вызывают проявление катаклаза жил с обильной их лимонитизацией и омарганцеванием.

Изучение особенностей строения месторождения относит его к группе сложноструктурных, что определяет необходимость использования, при разработке нижних горизонтов месторождения, технологических решений обеспечивающих сохранность рудовмещающего массива от разрушения.

1.3 Опыт отработки Дукатского месторождения

Разработка запасов месторождения велась открытым и подземным способами, в настоящее время только подземным. Первоначально отрабатывалась верхняя часть месторождения карьерами, дальнейшая выемка запасов на глубину производится только подземным способом.

На планируемой к отработке части месторождения предусматривается проходка горно-подготовительных выработок по рудным зонам I, Ia, VIII, VIIIv,

VIIIг, XIIа, XIII, XIIIбис, XV, XVv, XVI, XVIII, 32, 33, 37, 38, 38а, 39. Технология выемки запасов основана на системе с подэтажной отбойкой руды со следующими параметрами усредненной выемочной единицы (Рисунок 1.5): длина блока по простиранию – 50 м; высота этажа – 50 м; ширина междуэтажных целиков (потолочины) – 5 м; ширина междукамерных целиков – 7 м.

Запасы руды на подэтажах обрабатывают в нисходящем и отступающем порядке. На каждом подэтаже проходятся буровые штреки. При отработке рудных тел средней мощности штреки проходятся сечением $16,5 \text{ м}^2$ и $12,1 \text{ м}^2$, исходя из габаритов самоходных буровых установок Simba L6C, Simba S7D и Simba H1257-DST. Подэтажные штрека при отработке маломощных рудных тел проходятся буровыми установками сечением $8,7 \text{ м}^2$ исходя из габаритов самоходных буровых установок Sandvik DL 210-5 и Sandvik DL 331-5C. Отрезные и вентиляционно-ходовые восстающие выработки сечением $5,25 - 6,0 \text{ м}^2$.

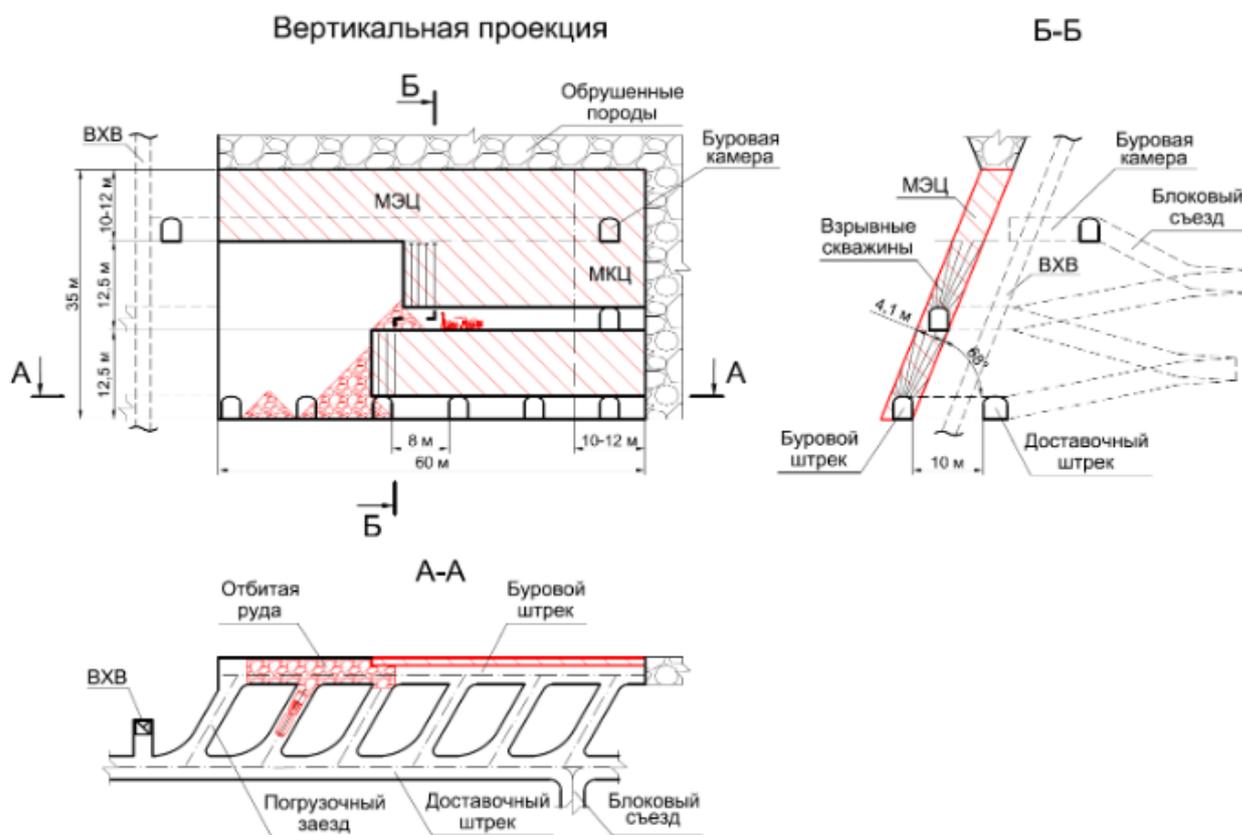


Рис. 1.5 - Вариант отработки Дукатского месторождения

Горно-подготовительные и нарезные работы при этой системе разработки включают проходку буровзрывным способом следующих выработок: полевой доставочный штрек; блоковый автосъезд; блоковый вентиляционно-ходовой восстающий; рудный штрек; подэтажные буровые штошки; отрезной восстающий; погрузочные орты-заезды.

После производства подготовительно-нарезных работ в блоке начинается очистная выемка. Бурение скважин производится с буровых штошек. Расположение скважин, их диаметр и расстояние между веерами или рядами скважин определяется типом применяемого оборудования, ВМ и паспортом БВР.

Скважины бурятся буровой установкой типа Simba S7D либо ее техническим аналогом. Отбойка руды производится отдельными секциями. Диаметр взрывных скважин – 51-76 мм. Взрывание производится гранулированными взрывчатыми веществами типа игданит. Зарядка скважин производится при помощи зарядной машины Charmec 1605B.

Руда выпускается под действием силы тяжести, через выработки в днище блока – орты-заезды. Отбитая руда с днища камеры убирается через погрузочные орты-заезды погрузочно-доставочными машинами ST-1030 и доставляется в камеру перегрузки, где перегружается в автосамосвалы МТ-431В или МТ-42. Далее руда доставляется автосамосвалами по транспортным выработкам на поверхность.

Очистные работы на руднике достигли нижней границы многолетней мерзлоты, и ведутся в зоне переходных температур и ниже. При ведении очистных работ ниже зоны многолетней мерзлоты в результате повышения температуры массива и горного давления снижается устойчивость вмещающих пород. Это показывает резко отрицательное влияние на эффективность применяемых на этих рудниках традиционных системы с подэтажной отбойкой руды. Вследствие снижения устойчивости массива увеличивается заколообразование кровли отслоение пород висячего бока, что производит к снижению производительности труда, увеличению потерь и разубоживания

руды, а также к опасным аварийным ситуациям в обрабатываемых блоках. Потери руды в этих условиях составили 7,1 - 12%. Разубоживание руды при ведении очистной выемки достигало в некоторых блоках 35 - 40%, с учетом прихвата пустых пород при отбойке; проходке отрезных восстающих и подэтажных штреков.

Для улучшения качественных показателей добычи на руднике были проведены испытания намораживаемой закладки при отработке двух очистных блоков на верхних горизонтах. Закладочные материалы подавали с вентиляционного горизонта засыпкой мерзлой породы в отработанное пространство и поливом водой в соотношении 10:1 [64].

При отработке запасов на верхних горизонтах применялась слоевая система разработки с льдопородной закладкой (Рисунок 1.6) [94].

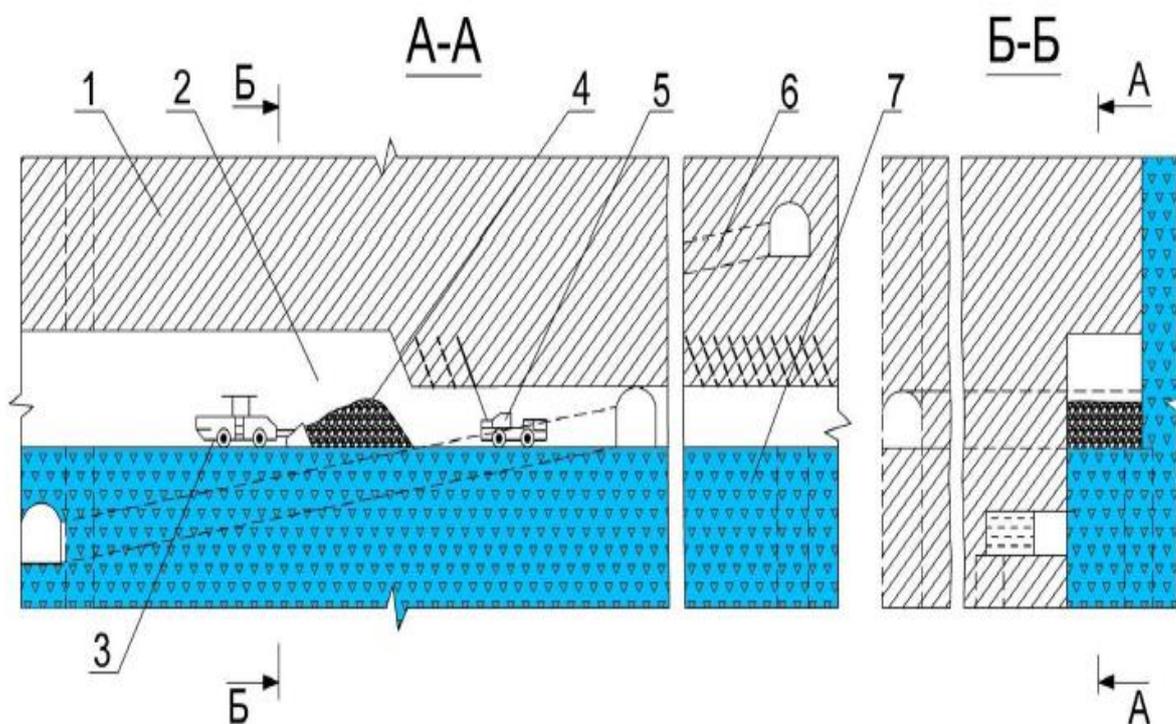


Рисунок 1.6 – Отработка рудных тел со слоевой выемкой: 1 – рудовмещающий массив; 2 – очистная лента; 3 – ПДМ; 4 – отбитая руда; 5 – буровая установка; 6 – транспортный уклон; 7 – льдопородная закладка

На участках месторождения малой и средней мощности использовалась сплошная камерная система разработки с погашением выработанного пространства льдопородной закладкой (Рисунок 1.7) [94].

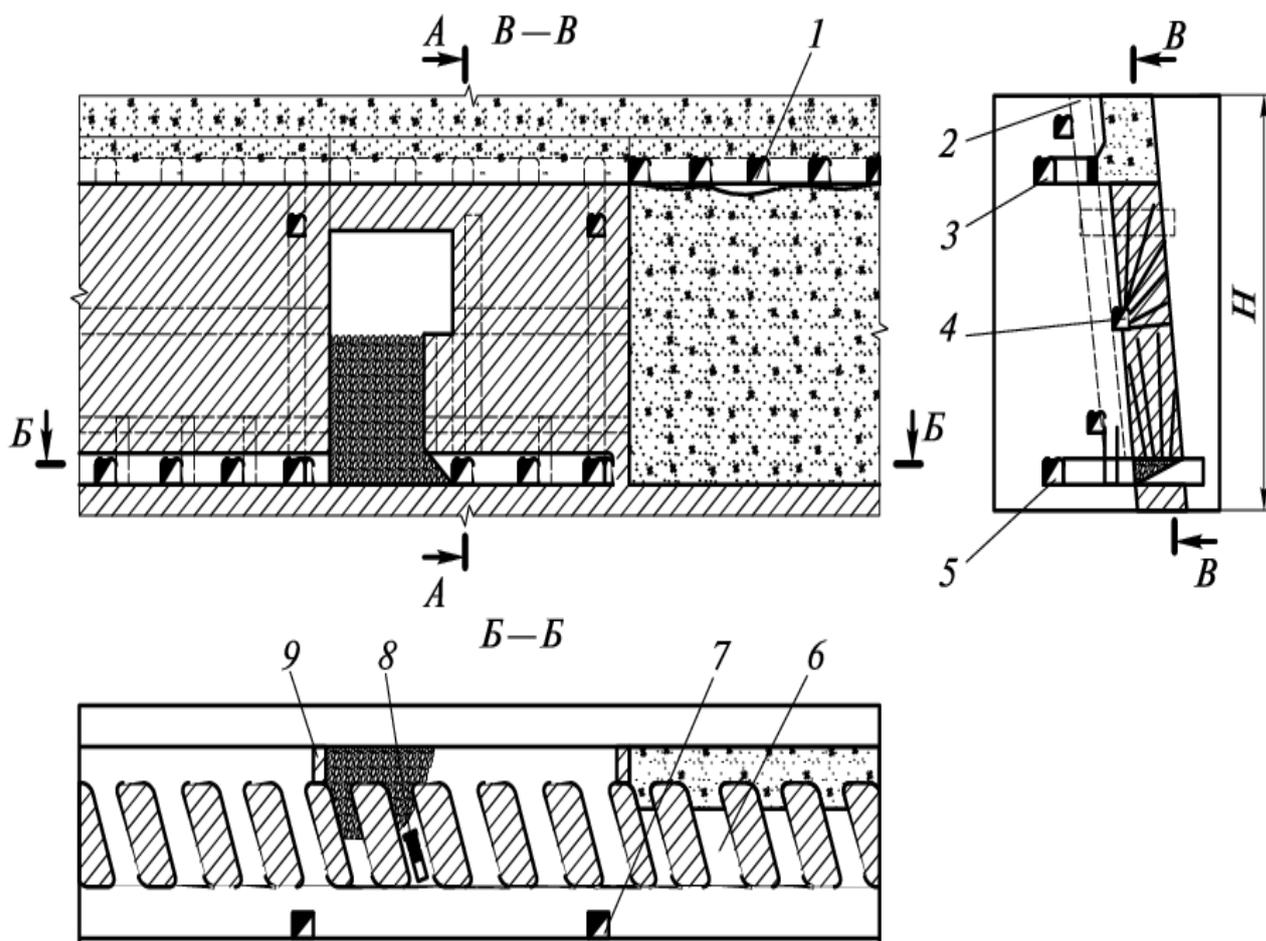


Рисунок 1.7 –Камерная система разработки и льдопородной закладкой: 1 – вентиляционно-закладочный орт; 2 – восстающий; 3 – штрек; 4 – буровой штрек; 5 – полевой транспортный штрек; 6 – орт-заезд; 7 – блоковый рудоспуск; 8 – доставочная машина с дистанционным управлением; 9 –перемычка

Анализ опыта технологии ведения очистных работ показал, что применяемые на руднике варианты слоевых и подэтажно-камерных систем разработки с породной и льдопородной закладкой обладают повышенными потерями и разубоживанием руды. Применение ледяной и льдопородной закладки сдерживается большой продолжительностью затвердевания закладочного массива, отставанием объема высокопроизводительных очистных работ, вместе с тем при использовании льдопородной закладки возникают большие сложности со схемой регулирования теплового режима предприятия, которая одновременно должна обеспечивать допустимую температуру рудничного воздуха для работы людей и сведение процессов оттаивания рудовмещающих пород и льдопородной закладки к минимуму. Высокая

стоимость закладки твердеющим смесями на основе цементных вяжущих и сложность ее формирования при отрицательных температурах являются основными сдерживающими факторами использования твердеющей закладки.

1.4 Анализ теории и практики отработки маломощных жильных месторождений

На горнорудных предприятиях, разрабатывающих крутопадающие жильные месторождения в условиях криолитозоны, технология добычи руд усложняется из-за мерзлого состояния и последующего в процессе эксплуатации оттаивания массива горных пород. Такие условия характерны для рудников «Двойное» ООО «Северное золото», «Купол» ЗАО «Чукотская ГГК», АО «Полюс Магадан», АО «ЗРК Павлик», «Агат», «Нявленга», «Тэутэджак» концерна «Арбат», «Штурмовской» ОАО «Сусуманзолото», «Нежданский» ПО «Якутзолото», «Лунное» и «Дукат» АО АО «Полиметалл» [20,46-50,55,61,72], также на зарубежных рудниках «Стеуби», «Рэнкин», «Нью-Брансуик» (Канада), «Болиден» (Швеция), «Биджовагге» (Норвегия). «Космос» и «Балларат» (Австралия) [108-110] и др.

Опыт отработки маломощных жильных месторождений показывает, что наиболее эффективными способами управления устойчивостью вмещающих пород являются технологии с закладкой выработанного пространства. В отечественной и зарубежной практике используют различные способы возведения искусственных массивов из твердеющих смесей (Рисунок 1.8-1.11) [2]. В качестве частичного заменителя вяжущего используют породы от проходческих работ, отходы обогатительного и металлургического производства, котельные шлаки.

Для снижения затрат на закладочных работах при отработке Учалинского [96], месторождения используют комбинацию породной и твердеющей закладки (Рисунок 1.12).

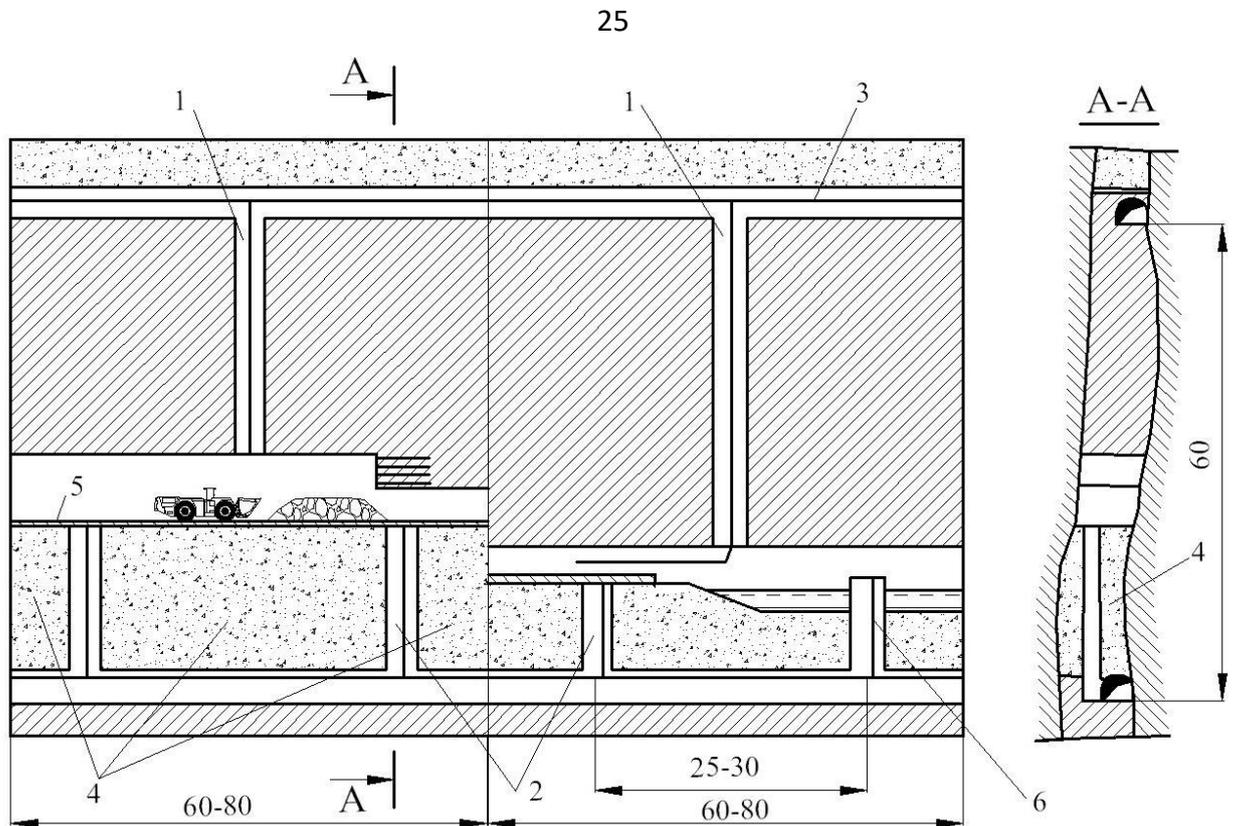


Рисунок 1.8 –Способ разработки с гидрозакладкой и бетонным настилом:

1 – восстающие; 2 – наращиваемые рудоспуски; 3 – пульповод; 4 – закладка; 5 – настил; 6 – дренажная труба

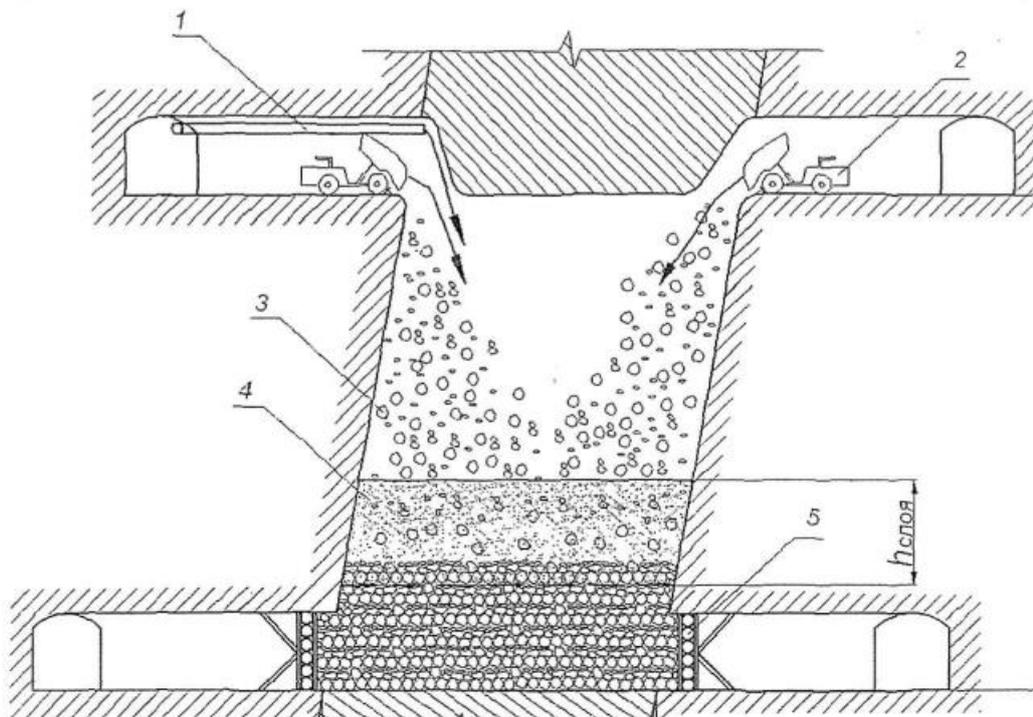


Рисунок 1.9 – Раздельный способ формирования закладочного массива: 1 – трубопровод для подачи песчано-цементной смеси; 2 – ПДМ; 3 – пустая порода; 4 – слой из цементно-породной смеси; 5 –перемычка

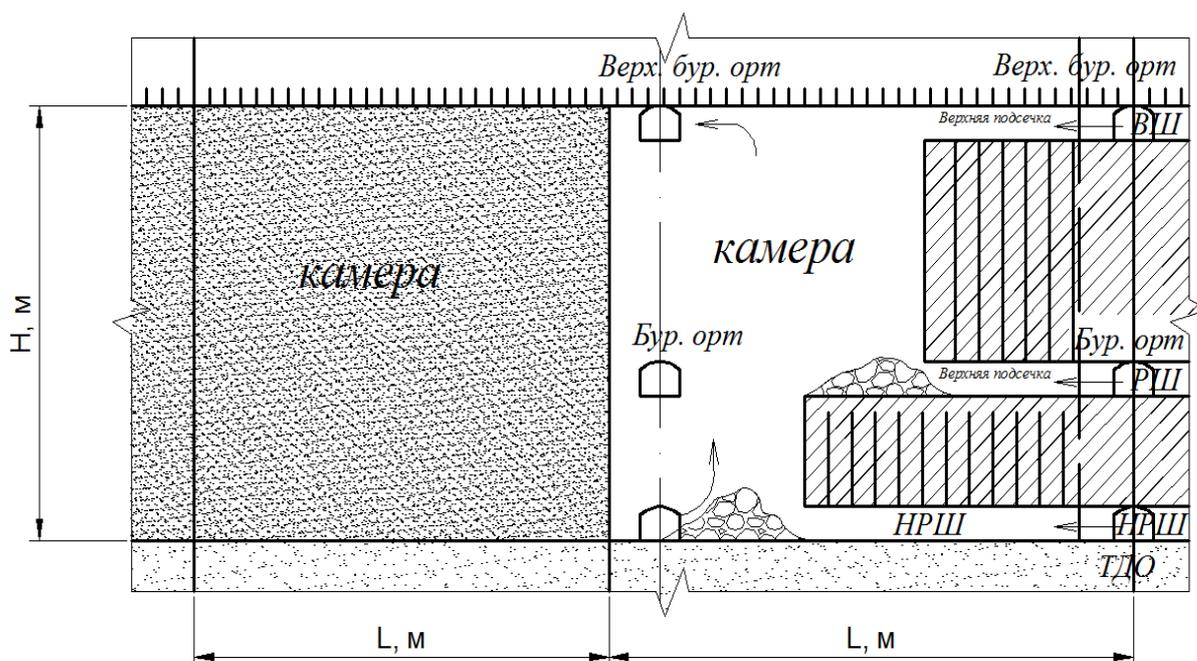


Рисунок 1.10 – Литой способы возведения закладочного массива из твердеющих смесей

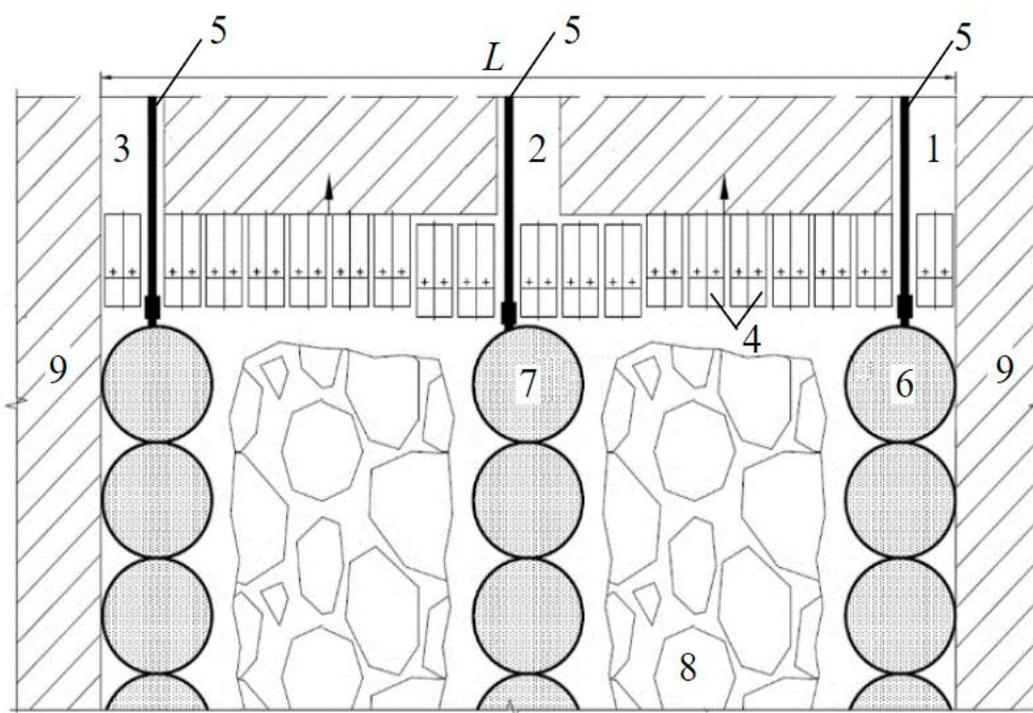


Рисунок 1.11 –Формирование массива из комбинации породной и твердеющей закладки: 1 – доставочный штрек; 2 – закладочный штрек; 3 – вентиляционный штрек; 4 – передвижная крепь; 5 – трубопровод; 6 – емкость для размещения твердеющей смеси; 7 – закладочная смесь; 8 – выработанное пространство, заполненное породой; 9 – разделительный целик

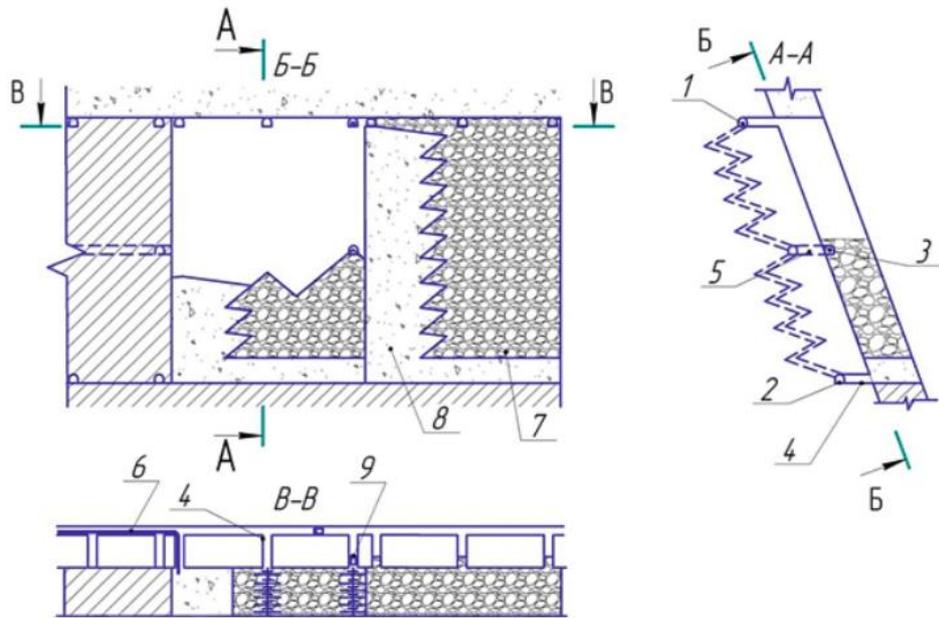


Рисунок 1.12 – Вариант отработки Учалинского месторождения: 1 – вентиляционно-закладочный штрек; 2 – доставочный штрек; 3 – буровой штрек; 4 – орт; 5 – заезд; 6 – трубопровод; 7 – бесцементная закладка; 8 – твердеющая закладка; 9 – самосвал с механизмом метания

Практика показывает, что нормативы по допустимой усадке закладочного материала с увеличением глубины ведения горных работ могут достигать 40–60% от расчетных (Рисунок 1.13) [97].

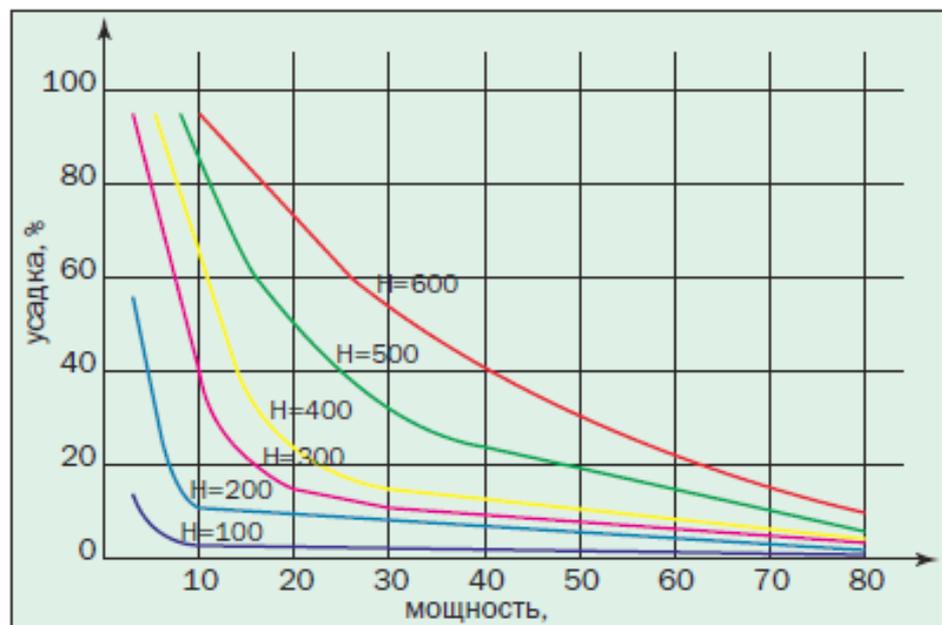


Рисунок 1.13 – Влияние глубины разработки на величину усадки закладочного материала [59]

Комбинированные способы формирования массивов из твердеющей закладки используют на рудниках Заполярного филиала «ГМК «Норильский никель» (Рисунок 1.14) [60].

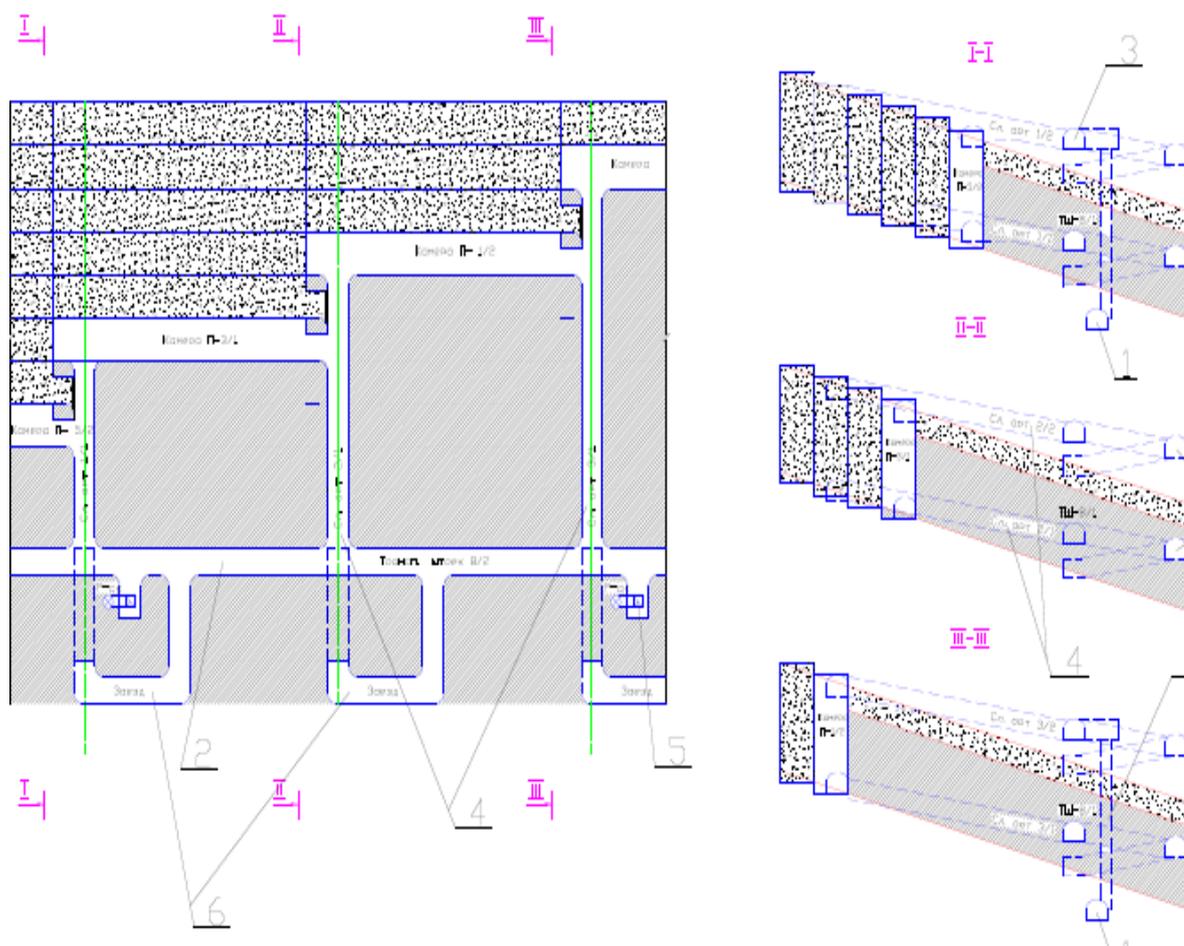


Рисунок 1.14 – Камерная система разработки со сплошной выемкой руды

За счет изменения расхода вяжущего и использования разных марок закладочной смеси в выработанном пространстве формируют участки из твердеющей закладки с различной несущей способностью. По периметру очистной камеры создаются более прочные массивы и менее прочные во внутренних зонах закладываемого пространства.

При отработке месторождения на руднике «Космос» системой поэтажных штреков, вследствие снижения устойчивости массива, выросли заколообразование кровли и отслоения пород висячего бока. Для снижения потерь и разубоживания руды, опасных аварийных ситуации в обрабатываемых блоках было принято решение перейти на систему разработки с твердеющей, породной и цементно-породной закладки (Рисунок 1.15) [59].

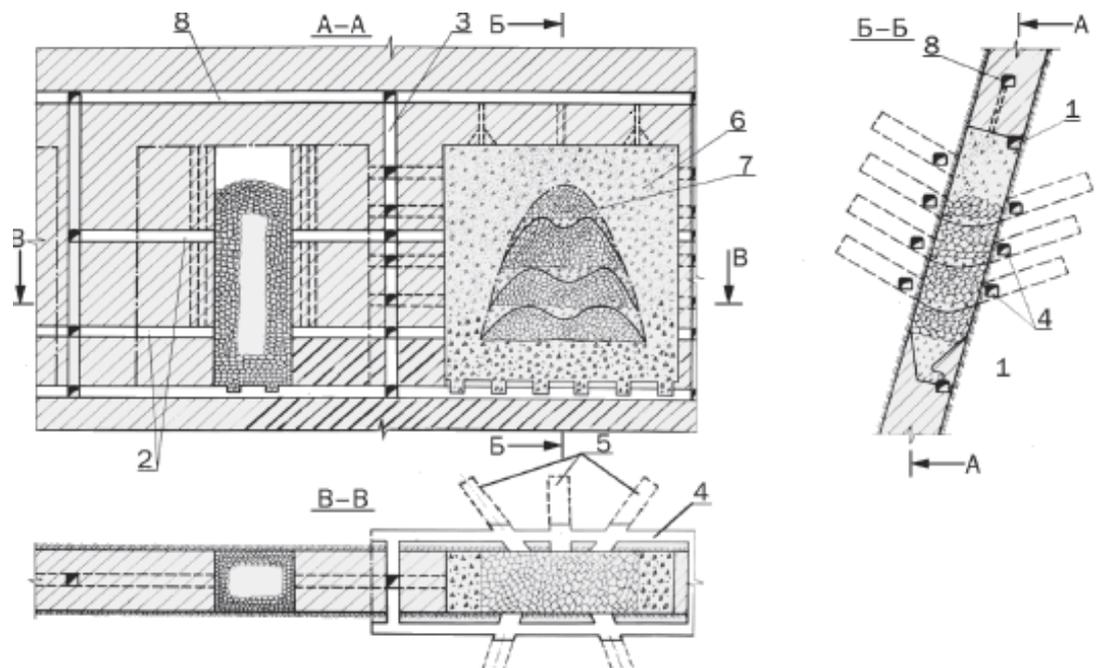


Рисунок 1.15 – Комбинация твердеющей, породной и цементно-породной закладки : 1,8 - штреки; 2-буровой штрек; 3-восстающий; 4-закладочный штрек; 5 - рассечки для добычи породной закладки; 6-твердеющая закладка; 7-породная закладка

При отработке маломощных рудных жил на ОАО «ППГХО» применяется разновидность системы нисходящей слоевой выемки (Рисунок 1.16) [51].

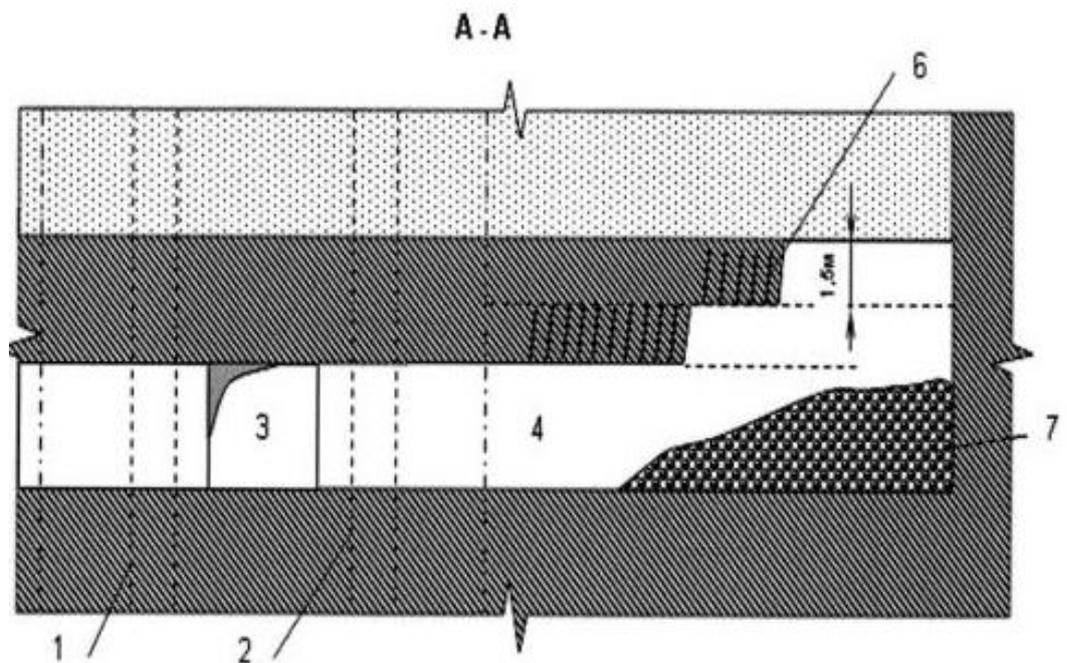


Рисунок 1.16 – Вариант нисходящей слоевой выемки: 1 – восстающий; 2 – рудоспуск; 3 - нарезная выработка; 4 - заходка; 5 - рудное тело; 6 - шпур; 7 – временно замагазинированная рудная масса

Для снижения себестоимости закладочных работ на рудниках «Майском», «Биркачан», «Албазино» расположенных в криолитозоне используют бутобетонную закладку [96]. Разработка запасов Ведугинского месторождения планируется вести с заполнением выработанного пространства бутобетонной и породной закладкой (Рисунок 1.17) [19].

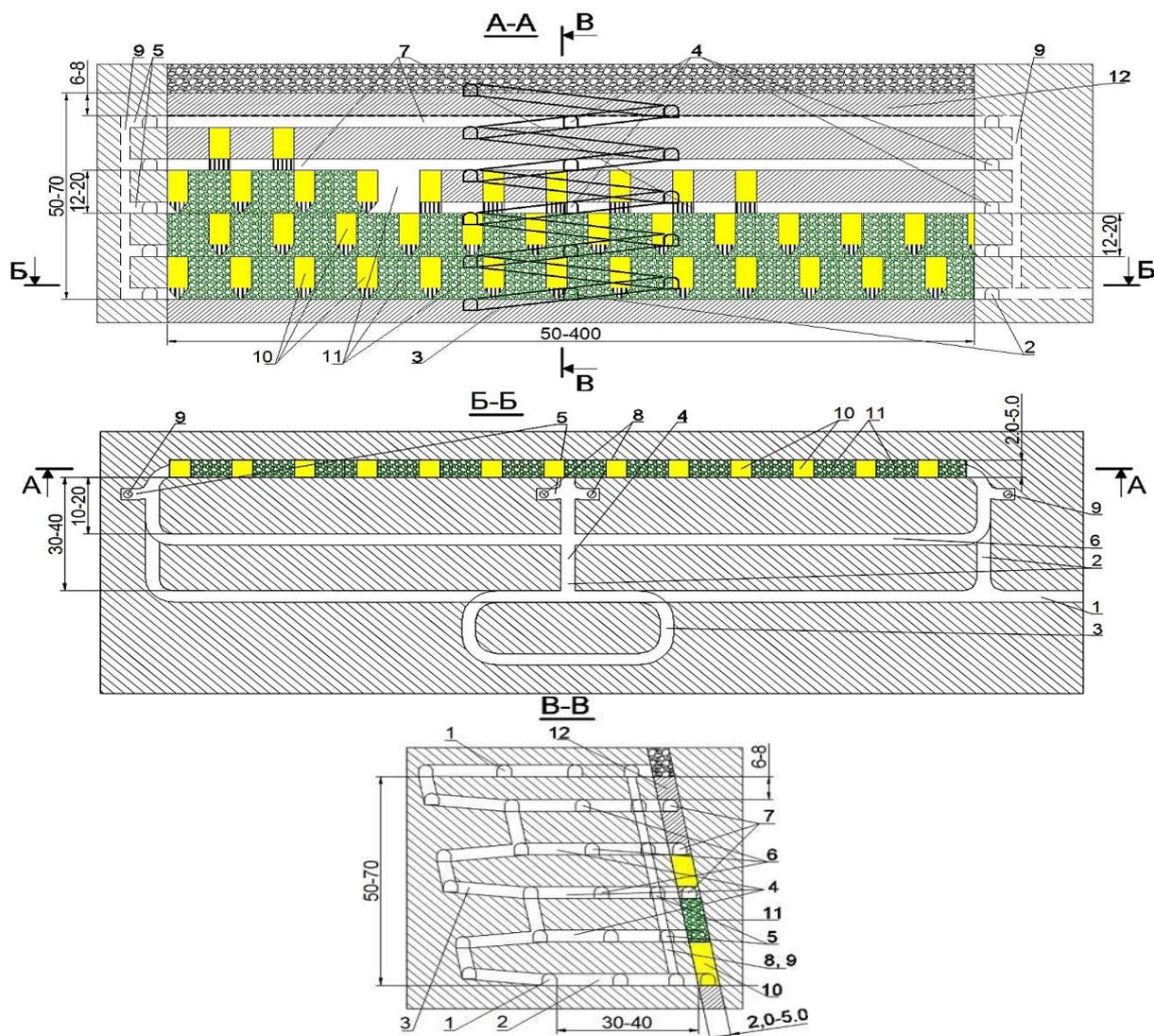


Рисунок 1.17 - Вариант камерной системы разработки: 1 - штрек; 2 - орт; 3 - наклонный съезд; 4,5 - заезды; 6 - подэтажи; 7 - штреки; 8 - наращиваемые рудоспуски; 9 - восстающие; 10 - целики; 11 - породная закладка; 12 - потолочина

Изучение вопросов технологии формирования закладочных массивов для управлению устойчивостью рудовмещающих пород показало, что все предложенные идеи и решения ведущих отечественных ученых академиков М.И. Агошкова [1], К.Н. Трубецкого [104], член-корреспондента РАН Д.Р. Каплунова [58], докторов технических наук И.И. Айнбиндера [2], Д.М. Бронникова [9], Н.Г.

Валиева [11], О.З. Габараева [14], Ю.П. Галченко [18], В.И. Голика [34], Н.Ф. Замесова [9], О.А. Зотеева [51], В.Н. Калмыкова [98], Е.А. Котенко [61], Е.В. Кузьмина [67], А.А.Неверова [111], И.А. Пыталева [17], М.В. Рыльникова [56], И.Н. Савича [97], М.Н. Цыгалова [109], Ю.Н. Шапошника [111] и других внесли значительный вклад в развитие горной науки и производства.

Исследования показали, что создание разнопрочных конструкций в выработанном пространстве технологически осуществимо в любых горнотехнических условиях [2].

Напряжение в массиве из твердеющей закладки (Рисунок 1.18) [50]:

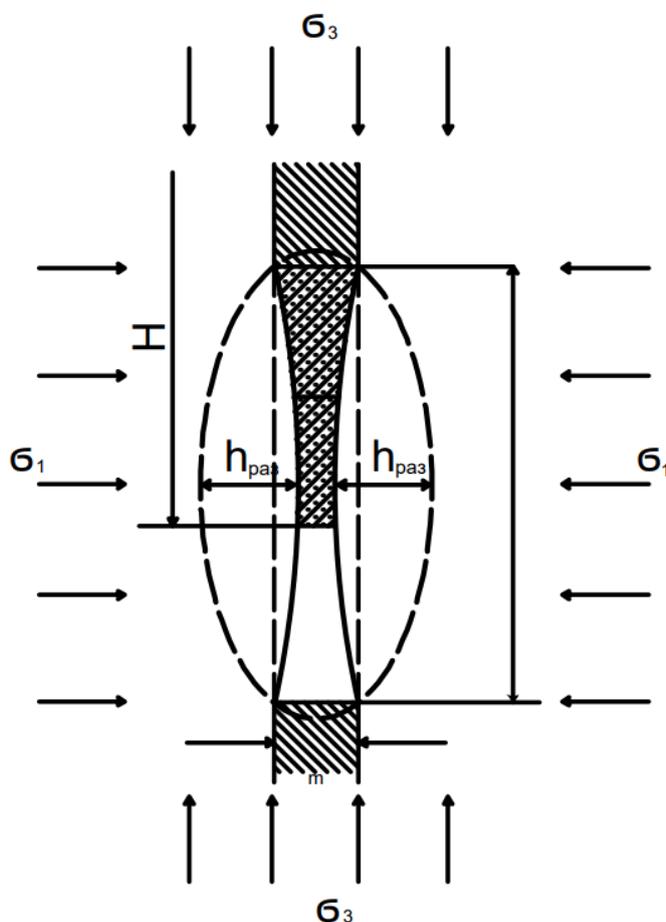


Рисунок 1.18 – Напряжение в массиве из твердеющей закладки

$$\sigma_1^{\text{зак}} = \frac{K\alpha\gamma_{\text{п}}H_{\text{пр}}S_{\text{кр}}}{10^8 S_3} + 10^{-6} \gamma_3 h_{\text{ц}} \quad (1.1)$$

где: $\gamma_{\text{п}}$, γ_3 - вес пригруженных пород и закладки;

$H_{\text{пр}}$ – высота пригружающей толщи, м;

$S_{\text{кр}}$, – площадь кровли;

S_3 – площадь поперечного сечения целика;

$h_{ц}$ – высота искусственного целика;

K_{α} – коэффициент, учитывающий влияние угла наклона залежи на величину нагрузки,

α – угол падения месторождения;

$$\eta = \sigma_{Г} / \sigma_{В}.$$

С учетом деформаций рудных целиков до подачи закладки

$$\sigma_1^{\text{зак}} = \frac{K_{\alpha} \gamma H E_3}{10^6 E_p} \left[\frac{S_{кр}}{S_p} - (1 - 2\mu_h) \right] + 10^{-6} \gamma_p h_{ц} \quad (1.2)$$

Где H – глубина расположения кровли камеры от поверхности, м;

E_p ; E_3 – модули деформаций соответственно руды и закладки.

В случае передачи части нагрузок на искусственные целики:

$$\sigma_1^{\text{зак}} = \frac{K_{\alpha} \gamma S_{кр}}{10^6 (S_3 + 0,77 S_p \frac{E_p}{E_3})} + 10^{-6} \gamma_3 h_{ц} \quad (1.3)$$

где: S_3 , S_p – площадь целиков соответственно искусственного и рудного, m^2 ;

μ_p – коэффициент Пуассона массива руды.

На стадии выемки вторичных камер нормативная прочность составит (Рисунок 1.19) [50]:

$$\sigma_{н2}^{\text{зак}} = \frac{\sigma_2^{\text{зак}} K_3}{K_{\phi} K_d} \quad (1.4)$$

где: $\sigma_2^{\text{зак}} = \frac{K_{\alpha} K_n \gamma H L_{ц}}{10^6 L_3}$ – напряжение в целиках из закладки, МПа;

K_n – коэффициент, учитывающий степень нагружения искусственного массива налетающими породами;

$L_{ц}$, L_3 – ширина блока и искусственного целика, м.

Для не исследованных условий $K_n = 0,5 \frac{L}{H} \leq 1$, если камеры между искусственными целиками не заполнены, то $K_n = \frac{L}{H} \leq 1$,

где: L – пролет подработки, м.

$$\sigma_2^{\text{зак}} = \frac{q K_{\alpha} L_1}{10^6 \alpha_3 L_p} + 10^{-6} \gamma_p h_{ц} \quad (1.5)$$

где: L_1 пролет подработки;

α_3 – ширина целиков из твердеющей смеси;

q – вес пород свода давления.

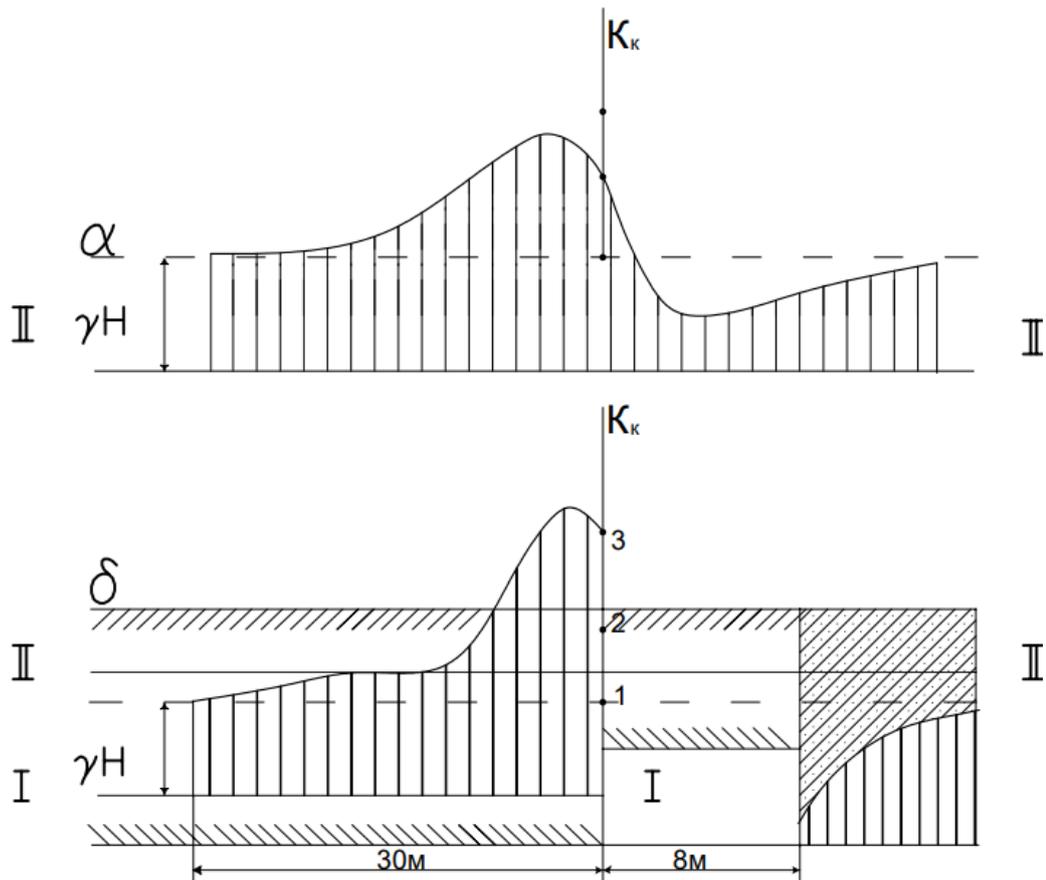


Рисунок 1.19 – График изменения коэффициент концентрации напряжений в рудном и закладочном массивах

Приведенные напряжения при объемном напряженном состоянии массива закладки

$$\sigma_{\text{пр}}''' = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (1.6)$$

при плоском напряженном состоянии

$$\sigma_{\text{пр}}''' = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (1.7)$$

Необходимая прочность твердеющей закладки по условию поддержания подработанного массива устойчивом состоянии

$$\sigma_{\text{н}}^{\text{зак}} = K_3 \sigma_{\text{пр}}''' \quad (1.8)$$

Напряжение в искусственном массиве при обработке запасов в целиковой части массива

$$\sigma_y = \frac{\gamma \sin \alpha_{cp}}{3 \cdot 10^6} \left[\frac{17}{8} K H_K + \frac{91}{20} (1 - K) b \right]; \quad (1.9)$$

$$\sigma_x = \frac{\gamma \cos \alpha_{cp}}{4 \cdot 10^6} \left[K H_K + \frac{2}{3} (1 - K) b \right]; \quad (1.10)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\gamma \cos \alpha_{cp}}{4 \cdot 10^6} \left[K H_K + \frac{2}{3} (1 - K) b \right]; \quad (1.11)$$

где: b - ширина подработки, м; K – коэффициент концентрации напряжений.

Компоненты напряжений в закладочном массиве:

$$\sigma_y = \frac{\gamma \sin \alpha_{cp}}{2 \cdot 10^6} [2,125 K H_K + 0,612 (1 - K) b] + \frac{h_3 \gamma_{пр} \left(h_{пр} - \frac{h_3}{2} \right)}{10^6 b}; \quad (1.12)$$

$$\sigma_x = \frac{K_p \gamma \sin \alpha_{cp}}{2 \cdot 10^6} [2,125 K H_K + 0,612 (1 - K) b] + \frac{\gamma_{пр} \left(h_{пр} - \frac{h_3}{2} \right)}{10^6 b}; \quad (1.13)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{40 \cdot 10^6} \gamma \cos \alpha_{cp} \left[K H_K + \frac{2}{3} (1 - K) b \right]; \quad (1.14)$$

где: K_p – коэффициент бокового отпора; $\gamma_{пр}$ - удельный вес пригрузки от налегающих пород, Н/м³.

В расчете нормативной прочности участвует коэффициент упрочнения твердеющей закладки [65]:

$$\sigma = \frac{n(P_{уд} + 0,5\gamma_3 h)k_0}{100k_{tm}k_{упр}k_{\partial}}, \quad (1.15)$$

где $P_{уд}$ - нагрузка налегающих пород;

k_0 - коэффициент влияния взрывов;

n - запас прочности;

k_{ϕ} - коэффициент формы;

$k_{упр}$ - коэффициент упрочнения твердеющей закладки;

k_{∂} - коэффициент длительной устойчивости.

Коэффициент компрессии закладочного массива при незаполненных первичных камерах:

$$B = \frac{1}{E_3} \gamma H^1 k_k \left(1 - \frac{\mu^2}{1 - \mu} \right), \quad (1.16)$$

где k_k - коэффициент концентрации напряжений в закладке;

H^1 – высота налегающих пород,

μ - коэффициент Пуассона закладки.

- при боковом подпоре σ'_x в смежных камерах]:

$$B = \frac{1}{E_3} \left[\gamma H^1 k_k \left(1 - \frac{\mu^2}{1 - \mu} \right) - \mu \sigma'_x \right] \quad (1.17)$$

При формировании массива из комбинации породной и твердеющей смесей, несущая способность искусственного массива зависит от соотношения бокового распора $m\sigma_z$ и бокового давления σ'_x [15, 20]:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_3} (\sigma_z - \mu \sigma_y - \mu \sigma'_x); \quad (1.18)$$

В этом случае коэффициент упрочнения комбинированной закладочной смеси находят из выражения:

$$k_{\text{упр}} = 1 + \frac{\mu \sigma_x}{\sigma_z \left(1 - \frac{\mu^2}{1 - \mu} \right)}. \quad (1.19)$$

Коэффициент упрочнения твердеющей закладки при камерно-целиковом порядке отработки запасов определяется из соотношения [57]:

$$k_{\text{упр}} = \frac{\left(1 - \frac{\mu^2}{1 - \mu} \right)}{\left(1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu} \right)}. \quad (1.20)$$

Анализ теории и практики отработки маломощных жильных месторождений позволяет сделать следующие выводы:

-высокая стоимость вяжущих заполнителей снижает эффективность применения систем разработки с твердеющей закладкой;

-технологии погашения выработанного пространства с заполнением пустот породной массой вызывают разрушения в рудовмещающем массиве в различных формах, вследствие высокой компрессионности;

-снижение затрат на закладочные работы возможно за счет возведения каркаса вокруг несвязанного заполнителя [106];

- использование пород от проходческих работ в качестве компонентов закладочных смесей позволит повысить эффективность отработки маломощных крутопадающих месторождений;

- научные основы процесса пока разработаны недостаточно полно и мало внимания уделяется комбинированию монолитных твердеющих и несвязанных закладочных смесей.

1.5. Цель, задачи и методы исследований

Разработка маломощных крутопадающих рудных тел в условиях криолитозоны в основном ведется слоевыми и поэтажно-камерными системами разработки с породной или льдопородной закладкой, которые сопровождаются значительными потерями и разубоживанием ценных руд при их добыче. Повысить полноту выемки полезного ископаемого и снизить разубоживание руды возможно за счет внедрения систем разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства. Применение твердеющих смесей на основе цементных вяжущих сдерживается необходимостью строительства дорогостоящих закладочных комплексов и высокой себестоимостью закладочных работ.

Одним из наиболее перспективных путей снижения затрат на закладочные работы при отработке маломощных крутопадающих рудных залежей, является использование твердеющей породной бутобетонной закладки, которая не требует строительства специального закладочного комплекса и позволяет вести приготовление бутобетонной смеси на месте её размещения в выработанном пространстве подземного рудника.

Расширение возможностей и условий применения бутобетона для закладки выработанного пространства сдерживается отсутствием

закономерностей формирования прочностных свойств бутобетонных смесей для обоснования технологических параметров систем разработки. Обоснование параметров поэтажно-камерной системы разработки с формированием разнопрочных закладочных массивов на основе использования различного сочетания бутобетонной и породной закладки является актуальной научно-практической и технологической задачей.

В результате анализа аналогов определена цель работы – обоснование параметров поэтажно-камерной системы разработки с формированием разнопрочных закладочных массивов на основе бутобетонной и породной закладки, обеспечивающих повышение показателей качества и полноты извлечения руды из недр при отработке маломощных крутопадающих рудных тел.

Поставленная цель диссертационной работы достигается решением следующих задач:

- анализ современного состояния технологии разработки маломощных крутопадающих рудных тел в мировой и отечественной горнорудной практике;
- исследование структурных особенностей и закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород;
- установление влияния крупности заполнителя на прочностные свойства твердеющей бутобетонной закладки;
- исследование влияния геометрических параметров выработанного пространства камеры на степень уплотнения закладки из сыпучих скальных пород;
- разработка технологии и обоснование параметров формирования разнопрочных закладочных массивов на основе сочетания бутобетонной закладки различного состава с сыпучими скальными породами;
- технико-экономическая оценка эффективности разработанных технологических решений.

В диссертационной работе при решении поставленных задач использован комплексный метод исследований. Лабораторные исследования проводятся на моделях из эквивалентных материалов. Технологические процессы исследуются в ходе промышленных экспериментов.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ МАЛОМОЩНЫХ РУДНЫХ ТЕЛ

2.1. Исследование структурных особенностей строения массива

Дукатское рудное поле располагается в верховьях рек Брекчия и Каховка, занимая площадь 40 кв. км. В структурном отношении поле приурочено к интрузивно-купольному поднятию (Рисунок 2.1) [62].

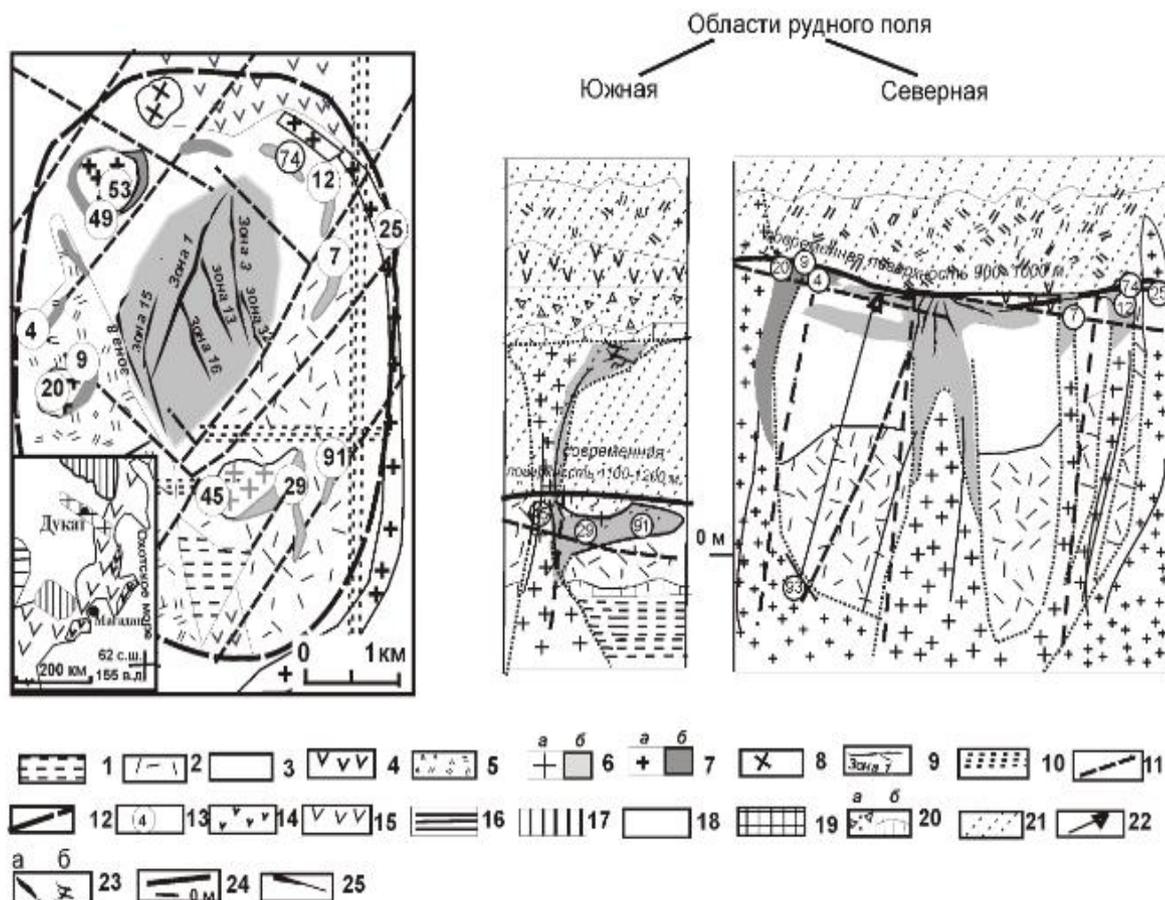


Рисунок 2.1 - Схема геологического строения и размещения минерализации Дукатского рудного поля: 1 - 5 – осадочные породы; 6–7 – субвулканические породы; 8 – габброиды; 9 – рудные тела; 10–11 – разломы; 12 – внешние контуры рудного поля; 13 – номера образцов; 14–15 – вулканические пояса; 16 – Сибирская платформа; 17 – Омолонский и Охотский срединные массивы; 18 – мезозойский Вилигинский террейн; 19 -Балыгычан-Сугойский прогиб; 20 – конгломераты; 21 – вулканогенно-осадочные толщи; 22 – скважины; 23 – рудные тела; 24 – абсолютные отметки субвулканических тел; 25 – направление движений флюидов.

В ядре поднятия залегают позднемеловые гранитоиды, перекрытые раннемеловыми вулканитами аскольдинской свиты и частично, терригенными отложениями омсукчанской свиты и вулканитами позднемелового возраста.

В геологическом строении месторождения принимают участие преимущественно вулканиты мелового возраста. Резко подчиненную роль играют морские отложения верхнего триаса, залегающие в основании разреза и представленные монотонной толщей алевролитов повсеместно пиритизированных и ороговикованных.

Раннемеловые образования представлены преимущественно вулканитами Аскольдинской свиты, являющиеся основными рудовмещающими породами, которые на севере и востоке перекрыты континентальными отложениями омсукчанской свиты и на западе осадочно-вулканогенными образованиями таватумской свиты.

Дукатское золотосеребряное месторождение расположено в центральной части рудного поля, в блоковой структуре, осложняющей куполовидное поднятие, и сформированной пересечением разломов северо-восточного и северо-западного простирания. Размещение рудных тел в пределах месторождения определяется разрывной тектоникой различного генезиса и возраста. Существенную роль в локализации оруденения играет трещинная тектоника вмещающих пород.

Наиболее масштабными и важными элементами структуры рудного поля месторождения, определившими пространственное размещение промышленного оруденения являются разломы северо-восточного простирания и Северо-Западный разлом.

Рудовмещающие разломы различаются по пространственным параметрам, морфологии, характеру вещественного выполнения, времени заложения и генезису. Выделено два структурно-генетических класса разрывов: класс А крутопадающие разрывы и класс Б пологопадающие разрывы. Крутопадающие разрывы имеют доэффузивное заложение и относятся к сколовому типу нарушений. Пологопадающие разрывы являются оперяющими отрывными

нарушениями крупноамплитудных сбросов и имеют пост эффузивный возраст заложения.

Основное промышленное оруденение сконцентрировано в Центральном блоке, ограниченном Амплитудным и Восточным разломами, к северо-западу промышленное оруденение затухает, к юго-востоку, где на поверхность выходят наиболее эродированные эпидот-содержащие породы купольной структуры, оруденение отсутствует.

Многочисленные тектонические нарушения на месторождении по возрасту своего выделены три большие группы: дорудные, внутрирудные формирования, пострудные.

В разрезе рудные тела имеют древовидное строение (Рисунок 2.2) [62,101], а их мощность и содержание серебра достигают максимума на поверхности, где они в 2–4 раза выше, чем на глубине.

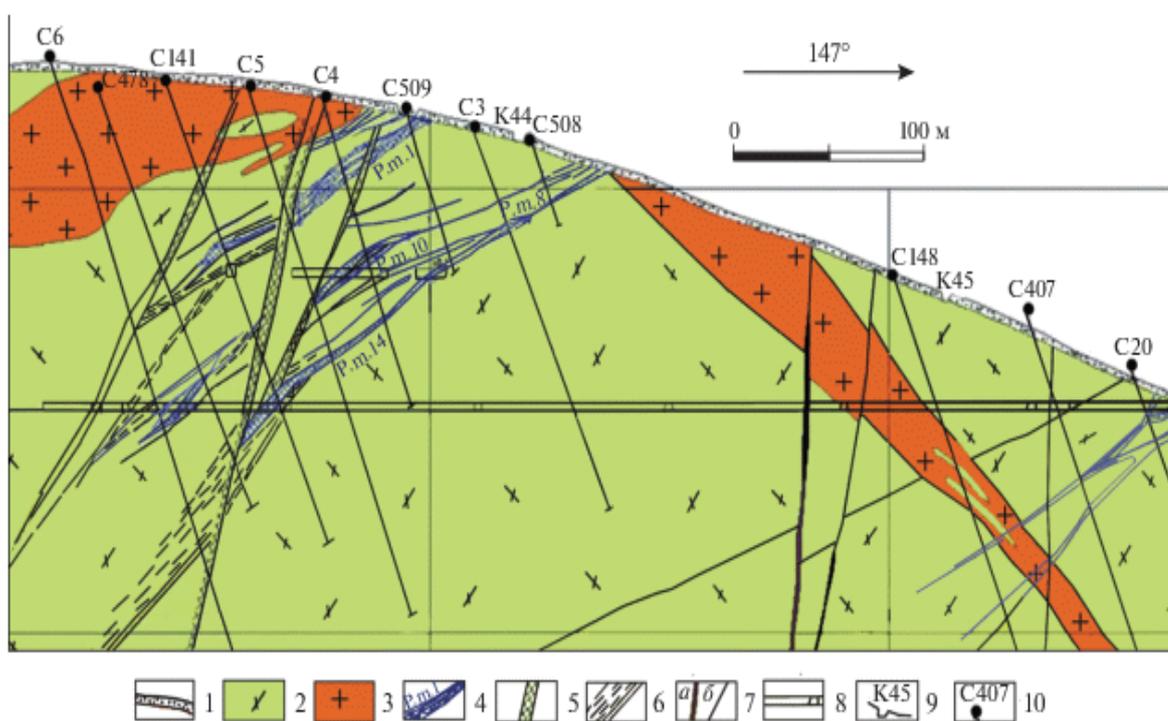


Рисунок 2.2 - Геологический разрез по месторождению: 1 – делювиальные отложения; 2 – игнимбриты риолитов и риодациты; 3 – штоки и дайки невадитов; 4 – рудные тела; 5 – зоны брекчирования; 6 – зоны прожилкования; 7 – разломы; 8 – горные выработки; 9 – канавы; 10 – скважины

Так, на поверхности на отметке 1010 м мощность рудного тела 1 в среднем – 7–10 м, достигает 25 м, а на горизонте 960 м она не превышает 2.5 м, на горизонте 900 м уменьшается до 1 м; далее вниз по разрезу – выклинивается.

Исследования показали, что Дукатский рудный район представляет собой рифтогенную структуру сложенную породами риолитовой и молассовой формаций. Разрывная тектоника определила блоковое строение купольного поднятия и сыграла основную роль в локализации золотосеребряного оруденения.

2.2 Изучение влияния трещиноватости массива на устойчивость обнажений горных пород

С целью изучения степени влияния систем трещин на устойчивость обнажений горных пород были проведены наблюдения в подготовительных и очистных выработках на нижних горизонтах месторождения. Было выполнено и обработано около 700 замеров трещин. При этом фиксировались элементы залегания трещин, степень их раскрытия, расстояние между ними и характер заполняющего материала.

Приведенное число трещин на 1 пог. метр N устанавливали расчетом из выражения [52]:

$$N = \sqrt[n]{n_1 + n_2 + \dots + n_n}, \text{ шт/м} \quad (2.1)$$

Частотность появления трещин каждой системы определяли по формуле:

$$P_{\alpha 1} = \frac{n_1}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad P_{\alpha 2} = \frac{n_2}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad \text{и т. д.}, \quad (2.2)$$

где n_i - количество трещин каждой системы на погонный метр, шт.;

n – общее число трещин, шт/м;

$P_{\alpha i}$ – частотность проявления трещин определенной ориентировки.

Показатель совокупного влияния трещин различной ориентировки рассчитывали по формуле:

$$P_{\alpha} = \sum_{i=1}^n (P_{\alpha i} \delta_{\alpha i}), \quad (2.3)$$

где δ_{ai} – коэффициент, учитывающий степень снижения прочности пород в массиве в зависимости от ориентировки трещин. Зависит от угла наклона плоскости трещины к направлению нагрузки и изменяется в пределах 0,6-0,9 [25]. Взаимное расположение естественных трещин и поперечного сечения очистного пространства представлено на рисунке 2.3.

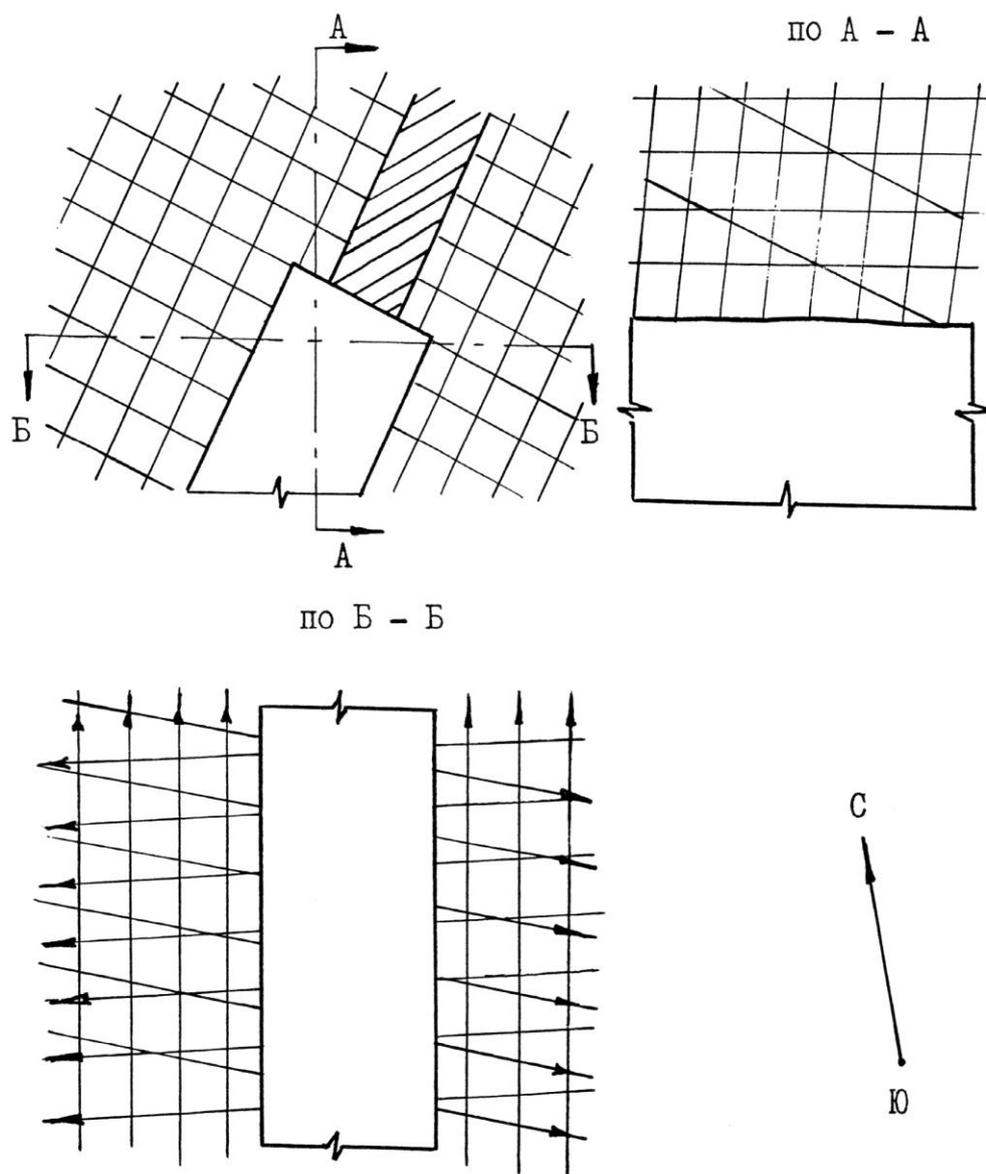


Рисунок 2.3 - Взаимная ориентировка естественных трещин и поперечного сечения очистного пространства

Трещины в рудном и породном массивах составляют сложные пространственные сети. Внешний вид трещиноватости вмещающих пород и рудного забоя представлен на рисунке 2.4.

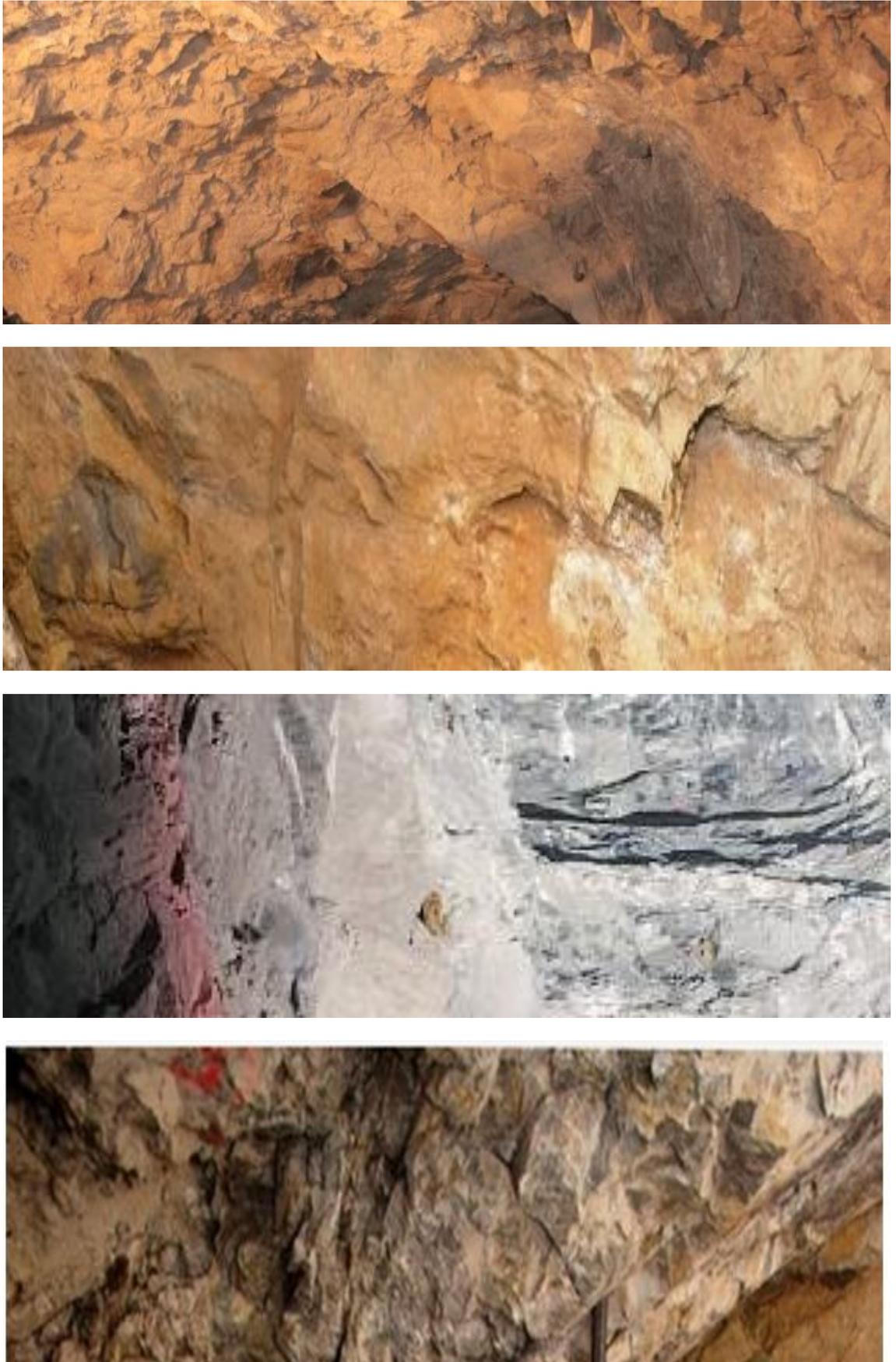


Рисунок 2.4 – Фрагмент исследований структуры рудовмещающего массива

Ориентация основных систем трещин пород Дукатского месторождения представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Ориентация основных систем трещин

Система трещин	Наименование пород	Азимут простирания, град.	Угол падения, град.	Удельный вес трещин, %
I	Риолиты и риодациты	356/344-15	84/62-90	12,0
II	Известняки	75/64-88	75/55-87	14,0
II	Туфы-липаритов	75/62-86	69/54-78	14,3
III	Дациты	356/336-18	23/12-34	4,2
IV	Мелкопорфировые риолиты	288/272-314	34/24-45	4,1
V	Алевролиты и песчаники	107/98-118	71/64-83	18,0
IV	Афировые липариты	141/132-152	34/25-48	15,1
VII	Андезито-базальты	291/282-305	66/55-77	4,7
VII	Кварц-родонитовая зона	280/268-285	74/64-88	14,1

На месторождении выявлено три основные группы трещин: большие, средние и малые. Большие трещины – шириной до 5-8 см имеют неровные поверхности и, как правило, заполнены глиной трения. Трещины средних размеров наиболее распространены; их ширина колеблется от долей сантиметра до 3 см, расстояние между ними от 0,1 до 0,5-1,5 метров.

Поверхности трещин шероховатые с изломом. Они заполнены либо карбонатным материалом, либо хлоритами. Мелкие трещины шириной не более 0,1 см трудно различимы и раскрываются только под действием значительных нагрузок. Все трещины взаимно пересекаются, образуя естественные отдельные участки.

Вмещающие породы и руды месторождения характеризуются как среднеустойчивые и устойчивые. К наиболее ослабленным относятся прослои осадочных пород, имеющих высокий модуль общей трещиноватости и склонных к вывалам и обрушениям. Такие участки были вскрыты в кровле камер 7, 8, 10, 12, 19, 21 рудной зоны I; камер 1, 2, 3 рудной зоны XXXIX. Основной причиной

такого обрушения является наличие тектонических контактов рудных зон с осадочными породами с широким развитием зон дробления и милонитизации. Формирование свода обрушения происходило от контакта рудных зон в сторону осадочных пород. Процесс обрушения ускорился в летнее время при поступлении в камеры теплого воздуха.

По мере увеличения площади обнажения пород, глубины работ и горного давления возрастает степень отслоений вмещающих пород,

При повышении температуры в горном массиве происходит таяние льда в трещинах, которое способствует снижению устойчивости горных пород, т.е. наступает «растепление» массива. При проектировании технологии отработки месторождения так же необходимо учесть, что с глубиной температура мерзлых пород закономерно повышается, в зависимости от гипсометрического положения и экспозиции склонов величина геотермической ступени для месторождения Дукат в среднем составляет 55-60 на 10^0 С. Лед, находящийся внутри трещин горных пород является цементирующим веществом в многолетнемерзлом массиве месторождения.

2.3. Особенности технологии отработки месторождения

Верхняя часть месторождения до горизонта +1010 м отрабатывается открытым способом, нижняя часть месторождения отрабатывается подземным способом. Гористый рельеф местности предопределили вскрытие месторождения штольневый способом.

Основную часть запасов месторождения отрабатывают системой разработки с подэтажной отбойкой руды (Рисунок 2.5).

Подэтажно-камерной и слоевой системами разработки с породной закладкой отрабатывают рудные тела, представляющие собой небольшие локальные участки, где не требуется оставления рудных целиков для поддержания очистного пространства.

Системой разработки с подэтажной отбойкой руды отрабатывается 92 % запасов; подэтажно-камерной системой разработки с породной закладкой – 4%; слоевой системой разработки с породной закладкой – 4%.

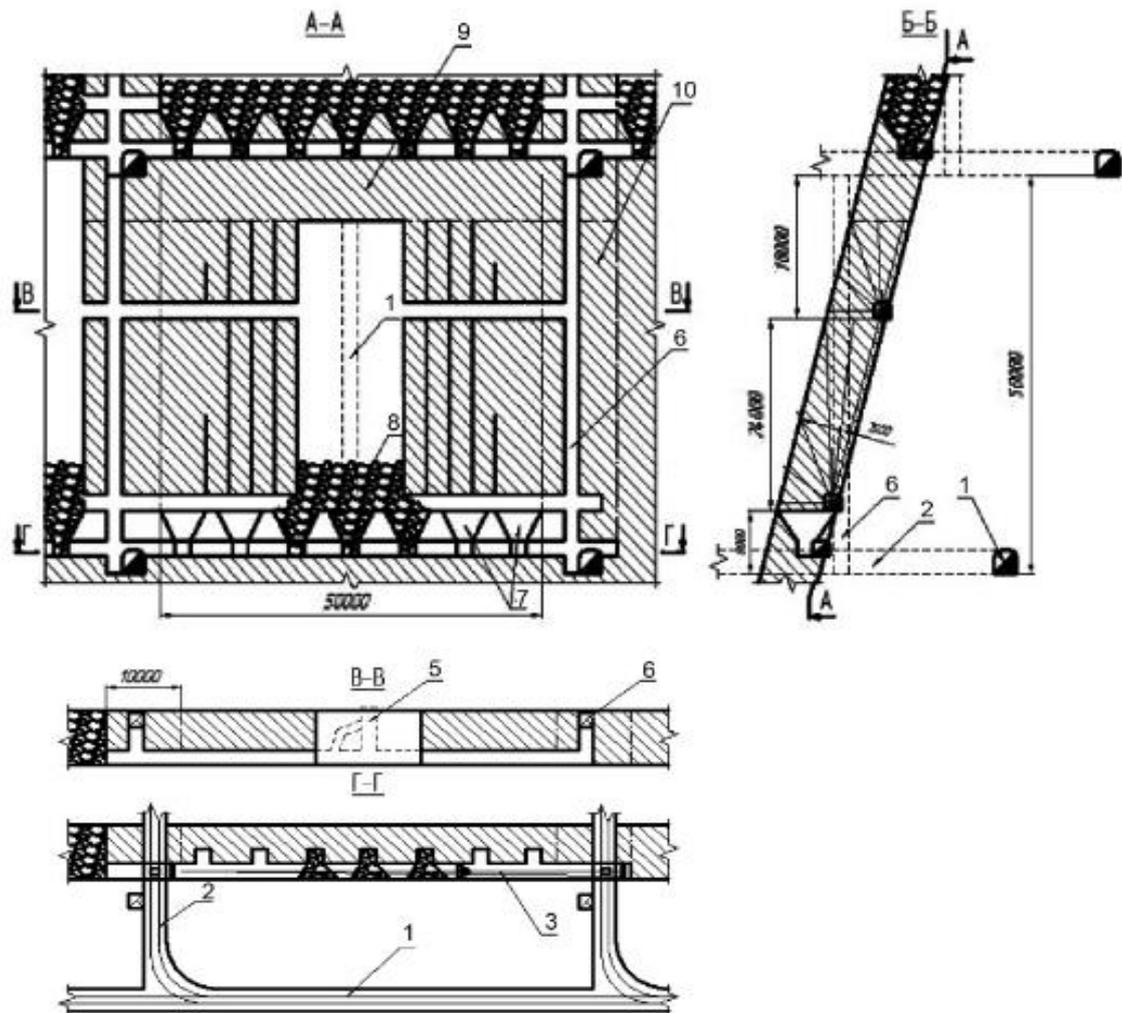


Рис. 2.5 - Вариант системы подэтажных штреков

Для условий разработки месторождения системой с подэтажной отбойкой руды были определены следующие параметры усредненной выемочной единицы: длина блока по простиранию – 50 м; высота этажа – 50 м; высота потолочины – 5 м; ширина междукамерных целиков – 7 м [30,90].

Очистные работы в камере начинают с бурения скважин с буровых подэтажных штреков.

Скважины бурят буровой установкой Simba S7D. Отбойку руды производят отдельными секциями. Диаметр взрывных скважин – 51-76 мм. Зарядку скважин игданитом производят зарядной машиной Charmec 1605B. Отбойку руды начинают с отбойки на отрезную щель.

Отбитую руда с днища камеры убирают погрузочно-доставочными машинами ST-1030 и доставляют в камеру перегрузки, где перегружается в

автосамосвалы МТ-431В или МТ-42. Далее руда доставляется автосамосвалами по транспортным выработкам на поверхность, либо до рудоспусков, по которым перепускается на горизонт откатки. Результаты подсчета проектных потерь и разубоживания руды приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Показатели проектных потерь и разубоживания руды

Участок	Запасы руды, тыс.т	Содержание, г/т		Потери руды, %	Разубоживание руды, %
		Au	Ag		
Центральный	6299,6	1,1	576,4	10,5	23,7
Смелый	2471,0	1,2	686,6	10,9	33,2
Восточный	1839,4	1,7	693,9	11,2	36,1
Итого по месторождению	10610,0	1,3	622,4	10,7	28,4

При отработке месторождения системой разработки с подэтажной отбойкой руды будут иметь место следующие виды эксплуатационных потерь:

- потери в массиве на контактах рудного тела с вмещающими породами из-за неполноты отбойки;
- потери руды при погашении междукамерных целиков;
- потери при погрузке и доставке руды;
- потери руды в результате смешивания ее с налегающими породами и неполноты выпуска.

Разубоживание руды складывается из конструктивного и вторичного разубоживания:

- первичное разубоживание связано с промешиванием пород в результате их прирезки у висячего и лежащего бока по 0,2 м при очистной выемке;
- прихват пустых пород при отработке тонких жил (Рисунке 2.6) и проведении подэтажных выработок;
- примешивание вмещающих горных пород при выпуске и доставке руды.

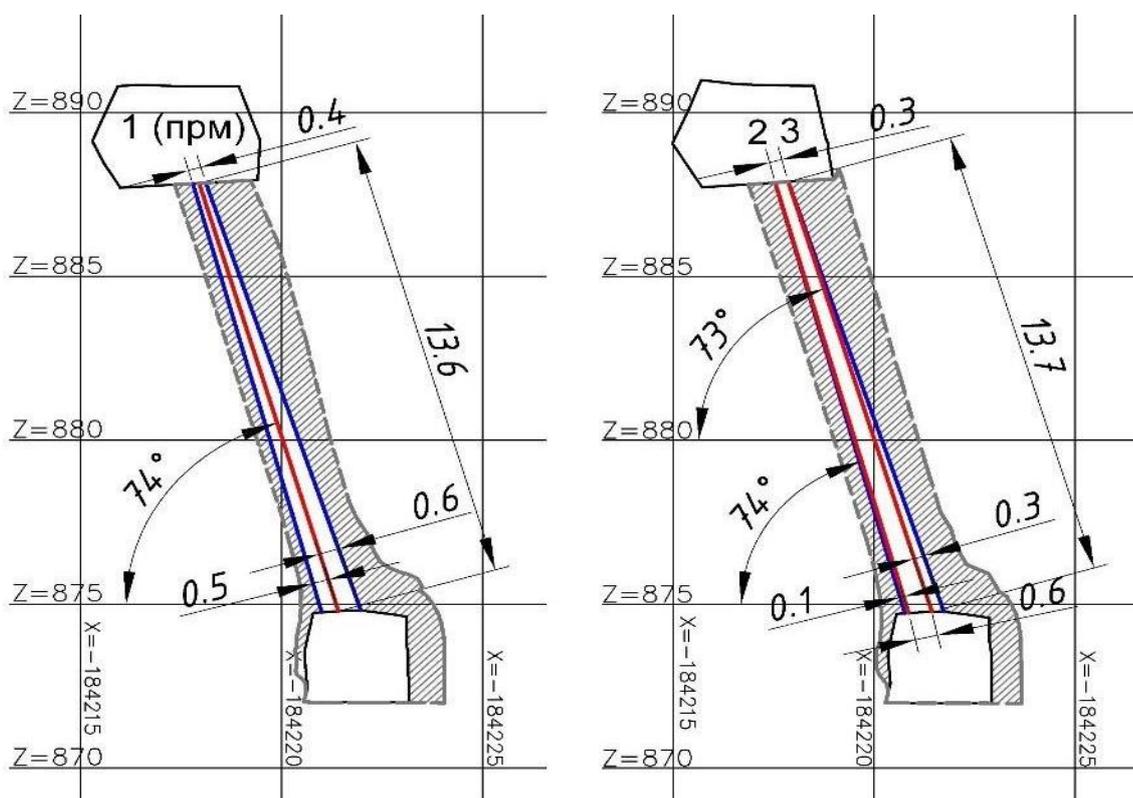


Рисунок 2.6 – Прихват пустых пород при отработке тонких жил

Применяемые варианты системы с подэтажной отбойкой руды обладают существенными недостатками: высоким разубоживанием руды, достигающим до 35 - 40 % и значительными потерями руды до 10-12 %.

Для отработки крутопадающих маломощных рудных тел на руднике применяют подэтажно-камерную систему разработки и слоевую систему разработки с породной закладкой. Очистные работы в блоке ведут с применением малогабаритного самоходного оборудования. В качестве закладочного материала используется пустая порода от проходки горнопроходческих работ, а также порода с отвалов на поверхности. Пустая порода размещаемая в выработанном пространстве поддерживает очистное пространство от обрушения частично.

2.4. Исследование параметров напряжений зоне очистных работ

Выделение тектонических компонент из измеренных напряжений произведено на основе известных инженерных зависимостей [101]:

$$\sigma_B = \sigma_B^{\Gamma} + \sigma_B^T = -\gamma H + \sigma_B^T;$$

$$\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{пр}}^{\Gamma} + \sigma_{\text{пр}}^{\text{T}} = -\frac{\mu}{1-\mu} \gamma H + \sigma_{\text{пр}}^{\text{T}}, \quad (2.4)$$

$$\sigma_{\text{п}} = \sigma_{\text{п}}^{\Gamma} + \sigma_{\text{п}}^{\text{T}} = -\frac{\mu}{1-\mu} \gamma H + \sigma_{\text{п}}^{\text{T}},$$

где $\sigma_{\text{в}}, \sigma_{\text{пр}}, \sigma_{\text{п}}$ – измеренные вертикальные, горизонтальные продольные и поперечные напряжения массива горных пород;

МПа; $\sigma_{\text{в}}^{\Gamma}, \sigma_{\text{пр}}^{\Gamma}, \sigma_{\text{п}}^{\Gamma}$ – расчетные гравитационные вертикальные, продольные и поперечные напряжения;

МПа; $\sigma_{\text{в}}^{\text{T}}, \sigma_{\text{пр}}^{\text{T}}, \sigma_{\text{п}}^{\text{T}}$ – расчетные тектонические вертикальные, продольные и поперечные напряжения, МПа;

γ – объемный вес пород, МН/м³;

H – глубина наблюдений, м;

μ – коэффициент Пуассона.

Для оценки естественного поля напряжений используют следующие прогнозные формулы [8]: в массиве многолетнемерзлых пород

$$\sigma_{\text{в}} = -\gamma H; \sigma_{\text{пр}} = -1,1\gamma H; \sigma_{\text{п}} = -\gamma H; \quad (2.5)$$

- в переходной зоне мерзлых пород в талые

$$\sigma_{\text{в}} = -\gamma H; \sigma_{\text{пр}} = -1,2\gamma H; \sigma_{\text{п}} = -1,5\gamma H; \quad (2.6)$$

- в талых породах

$$\sigma_{\text{в}} = -\gamma H; \sigma_{\text{пр}} = -1,5\gamma H; \sigma_{\text{п}} = -1,8\gamma H. \quad (2.7)$$

На участке экспериментальных работ, жила 19^а гор.830 м, проектом предусмотрено опережение горных работ. Участок характеризуется сложным геологическим строением, имеются многочисленные разрывные и тектонические нарушения, сложнодислоцированные толщи горных пород. Жила относится к участку Хрустальный, расположенный в северной части Дукатского рудного поля. Степень трещиноватости пород изменяется от средне до сильно трещиноватых, в местах вскрытия осадочных пород до интенсивно трещиноватых. Категория устойчивости пород варьируется от устойчивых до неустойчивых. На горизонте 830м в пределах подготовительной выработок породы преимущественно устойчивые, но отрицательное влияние на устойчивость пород в верхней части камеры оказывают осадочные породы.

На глубинах более 300 м в талых породах измеренные горизонтальные напряжения как в крест, так и по простиранию рудных тел, значительно выше вертикальных. В процессе растаивания льда, заполняющего тектонические трещины, они раскрываются, и совместное влияние этих процессов усиливает боковое горное давление [70,101]. Измерение величин напряжений осуществлялось методом дискования керна измерительных скважин [77]. Измерительные скважины бурились на расстоянии через каждые 5-8 м. По средней толщине дисков с учетом предела прочности вычисляли величину действующих напряжений по формуле:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{d}{t}} - 0,54 - 0,1\sqrt{d}}{0,78 + 0,165\sqrt{d}} [\sigma], \text{ МПа} \quad (2.8)$$

где t – толщина дисков;

d – диаметр дисков;

σ – напряжения, действующие в плоскости перпендикулярной оси скважины;

$[\sigma]$ – прочность при сжатии.

В таблице 2.4 представлены результаты измерений напряжений в зонах очистных работ.

Таблица 2. 4 - Напряжения над зоной работ

Номера скважин	Напряжения, МПа		
	Верикальные, σ_v	Горизонтальные	
		Продольные, $\sigma_{пр}$	Поперечные, $\sigma_{п}$
1	8,3	10,6	11,4
2	11,6	13,4	14,2
3	9,2	10,4	11,0
4	8,6	10,3	10,9
5	7,6	8,4	9,2
6	7,0	9,4	10,2
7	6,6	8,3	9,8
8	7,1	8,4	8,7
9	7,5	8,2	9,6
10	6,9	7,8	9,5

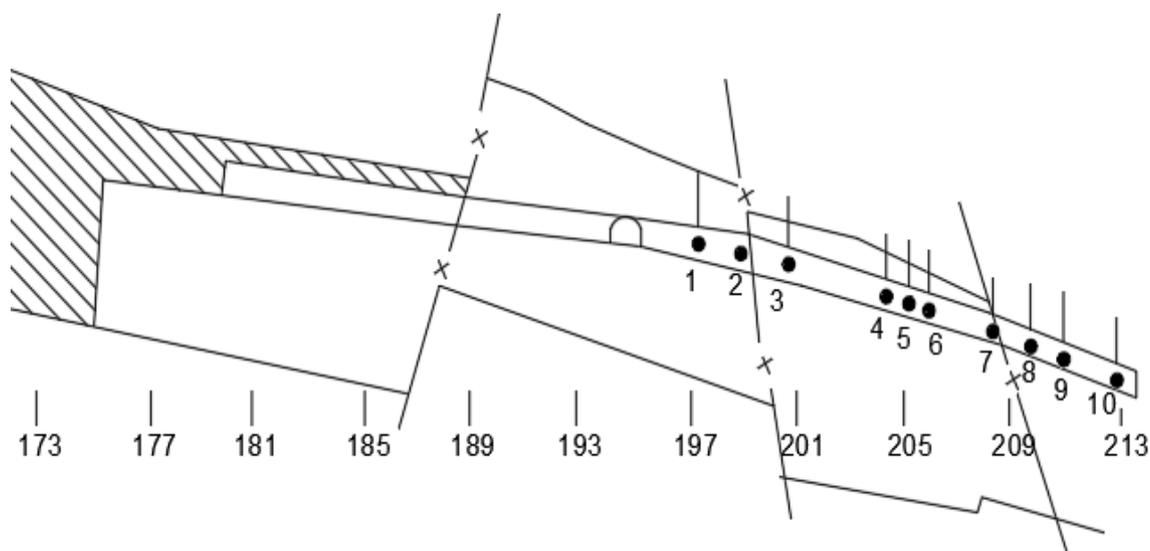


Рисунок 2.7 - Расположение измерительных скважин в штреке

В зоне очистных работ максимальные напряжения действуют горизонтально вкrest простирания рудных залежей и превышают вертикальные в 1,37-1,5 раза, что обусловлено действием в рудовмещающем массиве поля гравитационно-тектонических напряжений.

2.5. Определение высоты этажа и предельных пролетов обнажений

При ведении горных работ важно знать предельно допустимые размеры и устойчивость обнажений горных пород в конкретных горно-геологических условиях.

Успешное решение этих задач применительно к конкретным условиям производства возможно только при знании характера поведения обнаженных и подработанных пород и методов оценки их устойчивости, что позволяет рационально организовать управление горным давлением.

Для определения оптимальной высоты этажа произведены расчеты в универсальной программе для 2D анализа напряжений методом конечных элементов «Rocscience RS2» [34].

Был произведен расчет устойчивости высоты этажа для средней по месторождению мощности рудных тел равной 5 м. Расчетные схемы представлены на рисунках 2.8. - 2.9 [34].

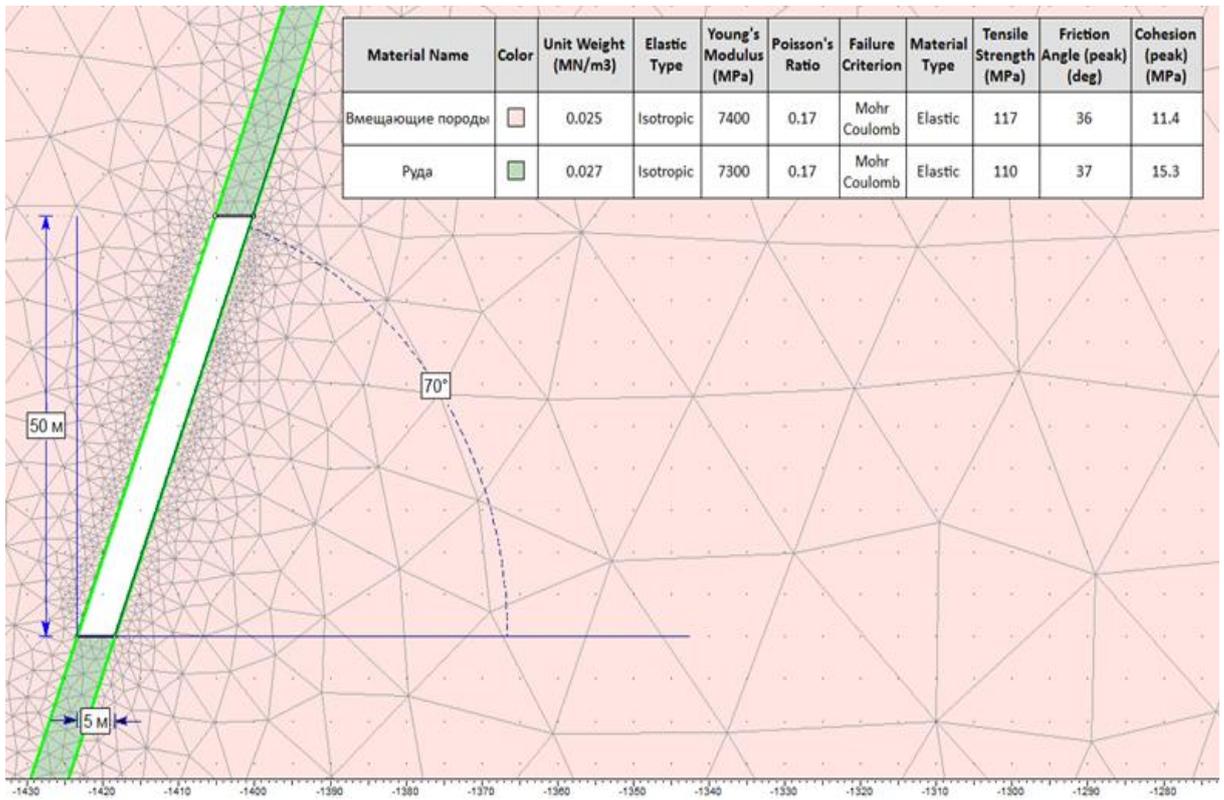


Рисунок 2.8 - Расчетная схема

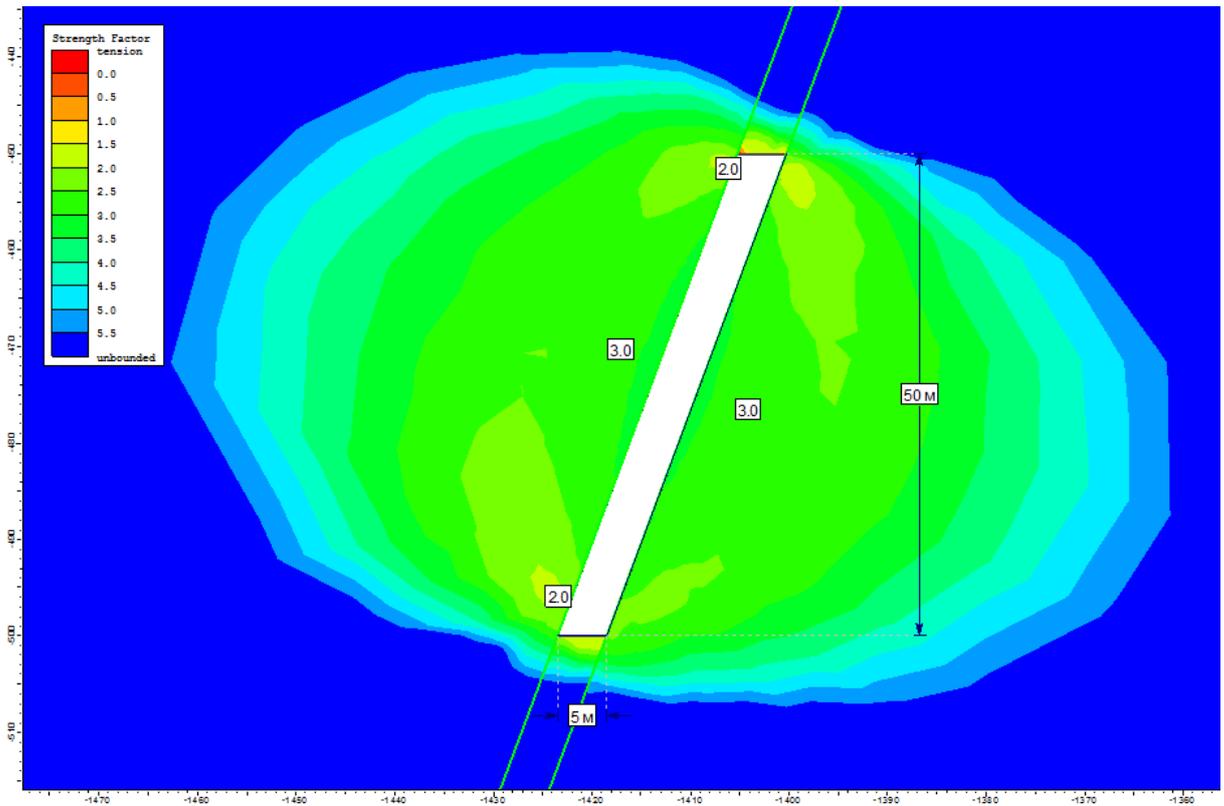


Рисунок 2.9 - Расчет высоты этажа

В крутопадающих залежах мощностью до 10 м в прочных рудовмещающих породах с этажной отбойкой руды, высота этажа ограничивается максимальной

глубиной взрывной скважины, равной обычно 40-50 м. Критерием устойчивости плоского обнажения, согласно является неравенство [34]:

$$l_3 \leq l_0, \quad (2.9)$$

где l_3 – эквивалентный пролет;

l_0 – предельный пролет перед обрушением.

Величина l_0 определяется по графику (Рисунок 3), на котором H_{cp} – средняя глубина разработки, определяемая по формуле:

$$H_{cp} = H - h_3/2, \quad (2.10)$$

где H – глубина горных работ, считая по вертикали от земной поверхности или от контура карьера до нижней границы очистной выработки;

h_3 – высота этажа.

Результаты определения предельного пролета обнажения от крепости пород и средней глубины разработки сведены в таблицу 2.5 и представлены на рисунке 2.10 [34].

Таблица 2.5 - Значения предельных пролетов

Глубина горных работ (H), м	Средняя глубина разработки (H_{cp}), м	Предельный пролет обнажения (l_0), м
100	75	59,7
150	125	59,7
200	175	50,1
250	225	43,3
300	275	38,9

При глубине отработки 500 м коэффициент запаса устойчивости висячем и лежачем боках очистной камеры изменяется от 2 до 3, что указывает на то, что при данной высоте этажа устойчивость камеры обеспечивается. Для выполнения неравенства $l_3 \leq l_0$, окончательно принимаем $l_3 = l_0 = 39$ м [34].

В рассматриваемых условиях размер выработанного пространства по восстанию L_{π} задан для высоты этажа 50 м и составляет для каждого угла залегания свое значение. Размер устойчивого обнажения пород по простиранию, высчитывается по формуле [76]:

$$L_{ПП} = \frac{L_n \cdot l_3}{\sqrt{L_n^2 - l_3^2}}. \quad (2.11)$$

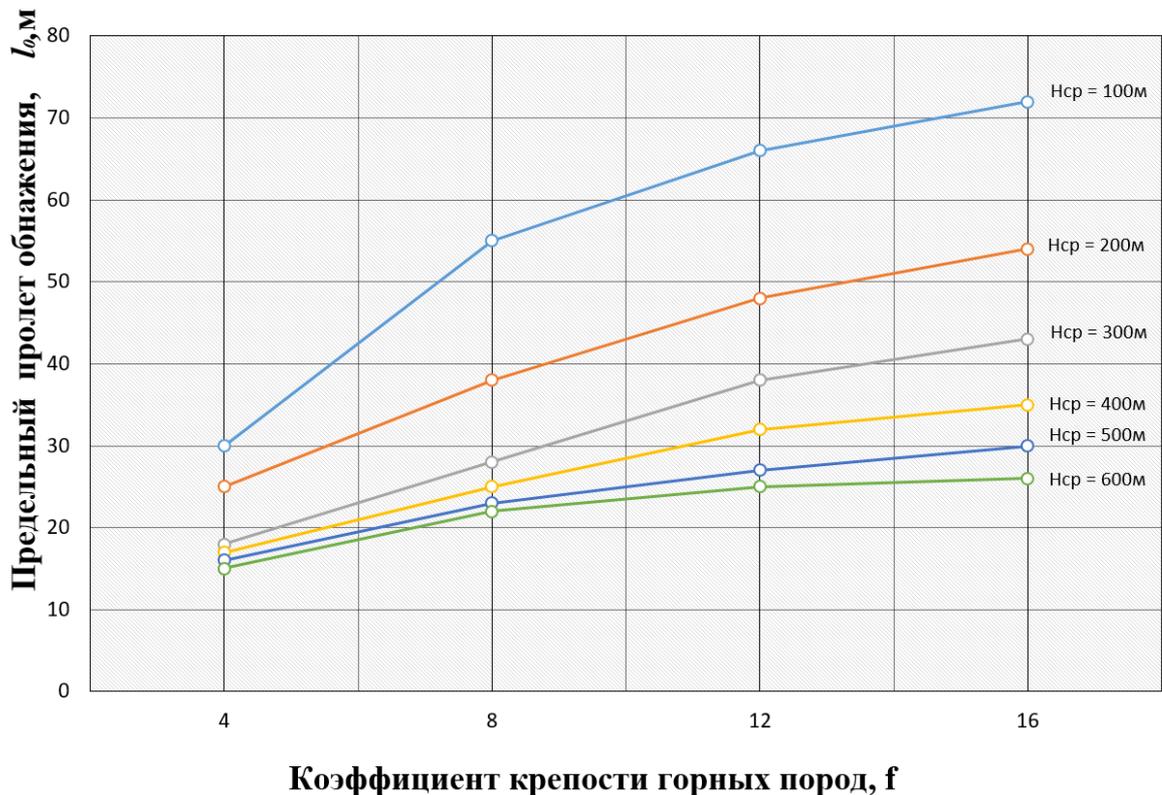


Рисунок 2.10 - Зависимость предельного пролета обнажения от крепости пород

Значения размера выработанного пространства выемочной единицы по восстанию $L_{пр}$, приведены в таблице 2.6 и получены для обнажений с углом наклона $55^\circ - 85^\circ$, для глубины разработки ($H_{ср}$) равной примерно 275 м.

Таблица 2.6 - Размеры устойчивых обнажений по простиранию [34]

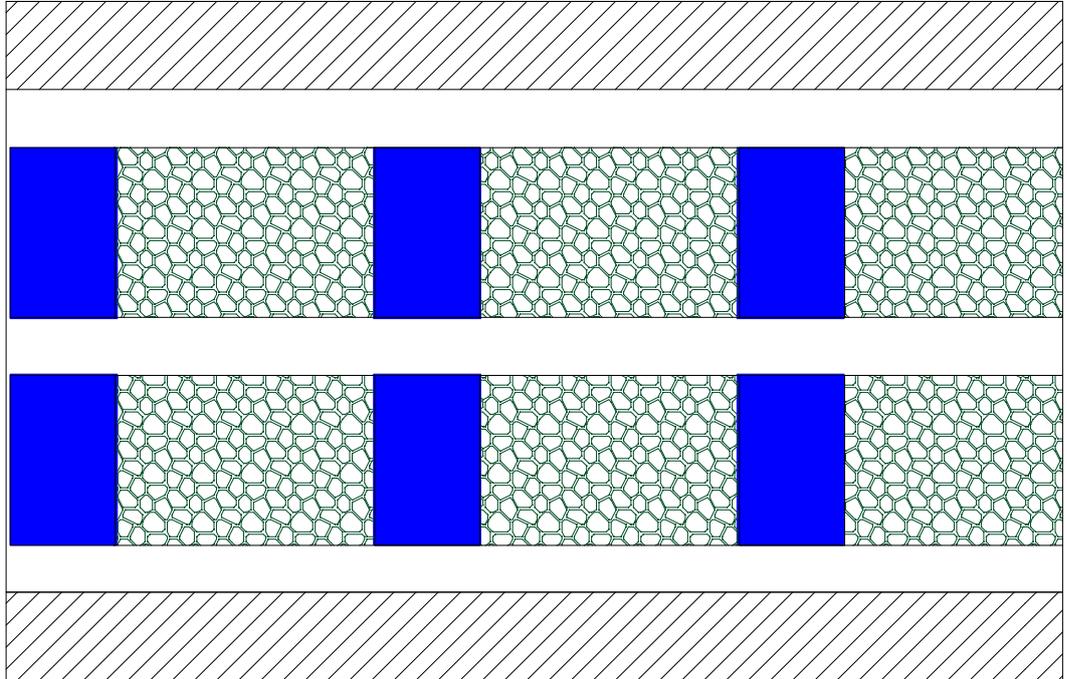
α – угол падения залежи, град.	Размер выработанного пространства по восстанию ($L_{п}$), м	Размер устойчивого обнажения по простиранию ($L_{пр}$), м
55	61,2	50,5
65	55,3	54,9
75	52,0	59,0
85	50,2	61,7

Согласно выполненным расчетам и в связи с тем, что наибольшая часть рудных запасов сосредоточена на горизонтах 980, 930 и 880 м средний размер устойчивого обнажения по простиранию принимается равным 50 м [34].

Моделирование порядка отработки камер, для оценки напряженного состояния массива из породной закладки с параллельной и шахматной схемой

расположения бутобетонных целиков (Рисунок 2.11), выполнены методом конечных элементов. Расчеты выполнялись по усредненным горно-геологическим и горно-техническим параметрам месторождения.

а.



б.

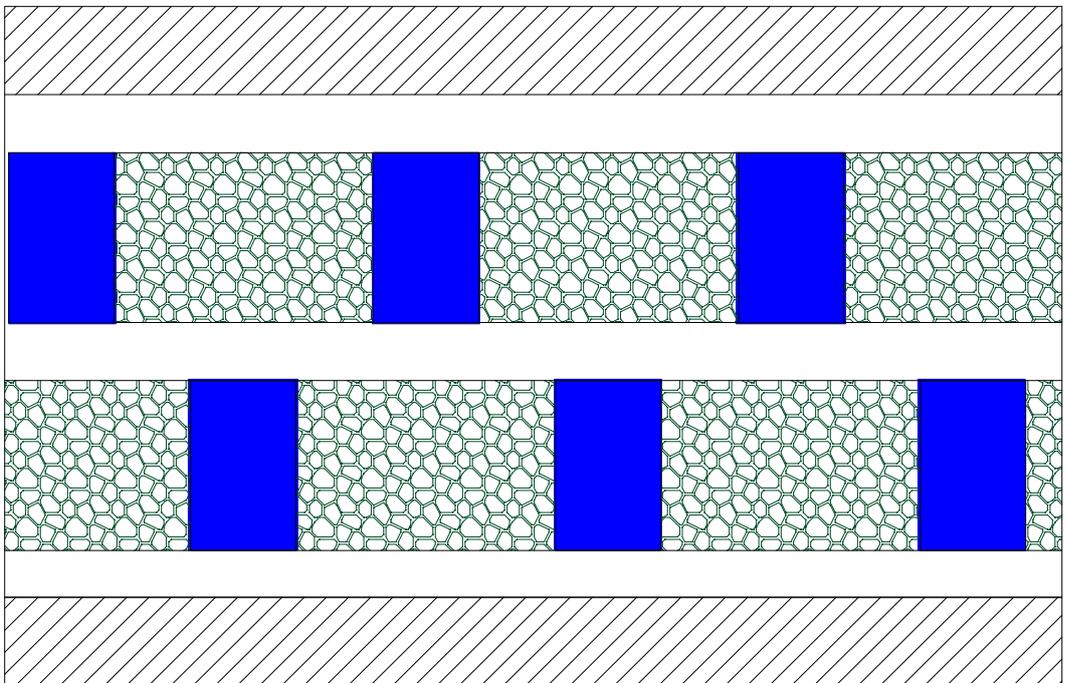


Рисунок 2.11 – Параллельная (а) и шахматная (б) схема расположения бутобетонных целиков

На основе сопоставления параметров напряжений в моделях проведена

оценка влияния схемы расположения бутобетонных целиков на характер распределения и величину напряжений.

Влияние схем расположения бутобетонных целиков на параметры главных напряжений в массиве из породной закладки представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Параметры главных напряжений в массиве из породной закладки в зависимости от схем расположения бутобетонных целиков

Расстояние между бутобетонными целиками, м	Схема расположения бутобетонных целиков / параметры напряжений, МПа			
	Параллельная		Шахматная	
	Вертикальная составляющая, σ_x	Горизонтальная составляющая, σ_y	Вертикальная составляющая, , σ_x	Горизонтальная составляющая, σ_y
15	3,1	1,4	3,0	1,3
20	4,8	2,3	3,6	1,9
25	6,0	3,8	4,3	2,6
30	7,5	4,5	5,4	2,7
35	8,1	5,4	6,3	3,2
40	9,5	6,5	7,9	4,5

Исследования показали, что напряженное состояние массива из породной закладки существенно различается в зависимости от схемы расположения бутобетонных целиков. Границы изменения величины главных напряжений довольно широки: от 1,3 до 9,5 МПа, при этом наиболее эффективны схемы расположения бутобетонных целиков в шахматном порядке.

Сформированные в шахматном порядке через каждые 25-40 м массивы из твердеющей бутобетонной закладки, при разработке маломощных крутопадающих рудных тел, способствуют увеличению несущей способности всей горнотехнической конструкции обрабатываемого этажа, за счет уменьшения вертикального пролета погашенного очистного пространства.

2.6. Определение предельного пролета обнажений горных пород

Зависимость предельного пролета обнажений (l_0) от средней глубины разработки (H_{cp}) и коэффициента крепости горных пород (f) определялась на основе полного факторного эксперимента. В качестве независимых переменных были избраны: x_1 – средняя глубина разработки, H_{cp} , м; x_2 – коэффициент крепости горных пород, f . Определены условия проведения опытов в натуральном и кодовом масштабах, приведённые в таблице 2.8.

Таблица 2.8 - Условия проведения опытов

№ п/п	Факторы		Уровни интервалы варьирования факторов			
			нижний	верхний	основной	интервал
1	x_1	H_{cp} , м	100	600	350	250
2	x_2	f	4	16	10	6
	код		-1	1	0	Δi

Результаты определения предельного пролета обнажения сведены в таблицу 2.9

Таблица 2.9 - Значения предельных пролетов

Средняя глубина разработки (H_{cp}), м	Коэффициент крепости горных пород (f)	Предельный пролет обнажения (l_0), м
100	4	30
100	10	59,7
100	16	70,3
350	4	26,3
350	10	37,7
350	16	49,9
600	4	15
600	10	23,9
600	16	27,8

Матрица планирования и результаты экспериментов приведены в таблице 2.10

Таблица 2.10 - Матрица планирования и результаты эксперимента

№ п/п	Кодовый масштаб		Натуральный масштаб		l_o , м (y)
	x_1	x_2	H_{cp} , м	f	
1	-1	-1	100	4	30
2	-1	0	100	10	59,7
3	-1	1	100	16	70,3
4	0	-1	350	4	26,3
5	0	0	350	10	37,7
6	0	1	350	16	49,9
7	1	-1	600	4	15
8	1	0	600	10	23,9
9	1	1	600	16	27,8

Уравнение регрессии в кодовом масштабе:

$$y=40,5556 - 15,55x_1 - 0,1833x_1^2 + 12,7833x_2 - 3,8833x_2^2 \quad (2.12)$$

$$R^2=0,91561$$

Уравнение регрессии в натуральном масштабе

$$l_o = 40,56 - 15,55H_{cp} - 0,18H_{cp}^2 + 12,78f - 3,88f^2 \quad (2.13)$$

Результаты установления зависимости предельного пролета обнажений от средней глубины разработки и коэффициента крепости горных пород представлены на рисунке 2.12.

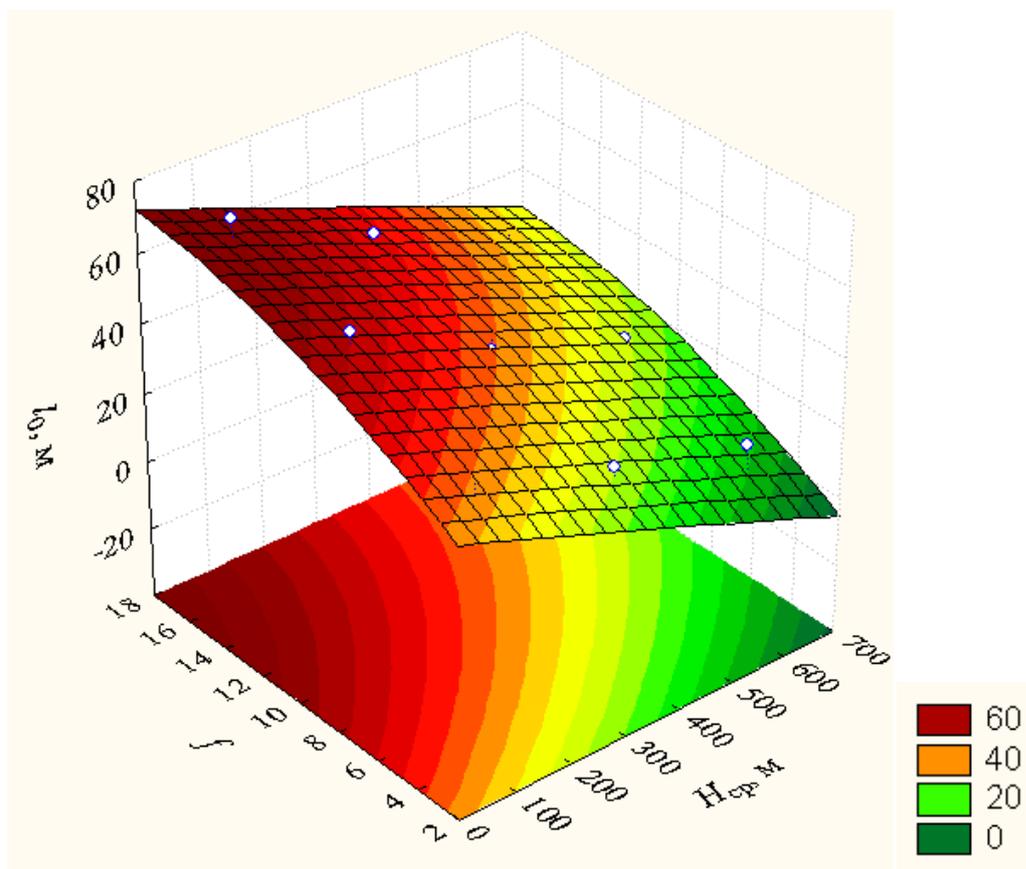


Рисунок 2.12 - График зависимости предельного пролета обнажений от средней глубины разработки и коэффициента крепости горных пород

Исследования показали, что величина предельного пролета обнажений, при камерных системах разработки с бутобетонной закладкой выработанного пространства, зависит от средней глубины разработки и коэффициента крепости горных пород и может быть определена из регрессионной модели: $l_0 = 40,56 - 15,55H_{cp} - 0,18H_{cp}^2 + 12,78f - 3,88f^2$.

Выводы по 2 главе

2.1. Исследования структурных особенностей строения массива месторождения показали, что Дукатский рудный район представляет собой рифтогенную структуру сложенную породами риолитовой и молассовой формаций. Разрывная тектоника определила блоковое строение купольного поднятия и сыграла основную роль в локализации золотосеребряного оруденения.

2.2. Проведенные наблюдения показали, что руды и вмещающие породы в основном слабо и сильнотрещиноватые, причем сильно трещиноватые породы встречаются на участках, прилегающих к разломам.

2.3. Применяемые на руднике варианты системы с подэтажной отбойкой руды обладают существенными недостатками: высоким разубоживанием руды достигающим до 35-40 %; значительными потерями руды до 10-12 %.

2.4. На глубинах более 300 м в талых породах в зоне очистных работ измеренные горизонтальные напряжения как вкрест, так и по простиранию рудных тел, значительно выше вертикальных. Максимальные напряжения действуют горизонтально вкрест простирания рудных залежей и превышают вертикальные в 1,37-1,5 раза, что обусловлено действием в рудовмещающем массиве поля гравитационно-тектонических напряжений.

2.5. Исследования проведенные с применением универсальной программы для 2D анализа напряжений методом конечных элементов «Rocscience RS2» позволили установить оптимальные параметры высоты этажа и предельных пролетов обнажений.

2.6. С использованием полного факторного эксперимента выявлено, что величина предельного пролета обнажений (l_o) рудовмещающих пород зависит от средней глубины разработки (H_{cp}) и коэффициента крепости горных пород (f) и может быть определена из регрессионной модели: $l_o = 40,56 - 15,55H_{cp} - 0,18H_{cp}^2 + 12,78f - 3,88f^2$.

2.7. Сформированные в шахматном порядке через каждые 25-40 м массивы из твердеющей бутобетонной закладки, при разработке маломощных крутопадающих рудных тел, способствуют увеличению несущей способности всей горнотехнической конструкции отрабатываемого этажа, за счет уменьшения вертикального пролета погашенного очистного пространства.

2.8. Совершенствование технологии разработки Дукатского месторождения требует переход на технологии с погашением пустот разнопрочными закладочными составами.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ МАССИВОВ ИЗ ТВЕРДЕЮЩЕЙ БУТОБЕТОННОЙ ЗАКЛАДКИ И СЫПУЧИХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

3.1. Технология приготовления закладочных смесей на руднике

Для отработки маломощных рудных тел на руднике в основном применяют подэтажно-камерную систему разработки с породной закладкой.

Закладка должна удовлетворять следующим требованиям:

- прочность закладки должна обеспечить устойчивость горного массива и не допускать смещение висячего бока и сдвижение лежащего;
- поверхность закладки должна обеспечить передвижение машин и механизмов;
- поверхность закладки должна обеспечить четкий контакт с отбитой рудой, не допуская разубоживания руды породами закладки.

Очистные работы в блоке ведут с применением малогабаритного самоходного оборудования. В качестве закладки применяется порода от проходки горных выработок, а также порода с отвалов на поверхности. Ведение работ по закладке включает в себя доставку и укладку закладочного материала в выработанном пространстве камеры.

Физико-механические свойства и гранулометрический состав пород на Дукатском руднике представлены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 - Физико-механические свойства пород [34]

Литотип	Предел прочности на сжатие, МПа	Объемный вес, кН/м ³	Коэффициент Пуассона	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.
Афировые липариты	117	25,6	0,17	11,4	36
Туфолавы липарит-дацитов	106	25,0	0,17	16,6	37
Риолиты и туфы липаритов	110	26,5	0,17	15,3	37

Таблица 3.2- Гранулометрический состав пород [89]

Грансостав горной массы	
Фракция, мм	Содержание, %
-10	9,7
+10-50	33,8
+50-100	16,9
+100-150	15,3
+150-200	13,7
+200	10,6

Закладочные работы производятся в наступающем порядке путем наращивания отвала пустой породы, сбрасываемой ПДМ на почву нижнего подэтажного штрека. По мере наращивания отвала производится уплотнение закладки весом ПДМ и формирование подошвы верхнего подэтажного штрека. Отбойка следующего вышележащего подэтажа ведется на заложенный массив.

В последнее время очистные работы на руднике достигли нижней границы многолетней мерзлоты, и ведутся в зоне переходных температур и ниже. При ведении очистных работ ниже зоны многолетней мерзлоты в результате повышения температуры массива и горного давления снижается устойчивость вмещающих пород. Вследствие снижения устойчивости массива увеличивается заколообразование кровли отслоение пород всячего бока, что производит к снижению производительности труда, увеличению потерь и разубоживания руды, а также к опасным аварийным ситуациям в отрабатываемых блоках. Это показывает резко отрицательное влияние на эффективность применяемых на этих рудниках традиционных систем разработки с применением сыпучей породной закладки. Сыпучая закладка не обладает необходимой несущей способностью из-за ее усадки.

Для увеличения объемов производства и утилизации отходов производства на горнорудных предприятиях ЗАО «Серебро Магадана» разрабатывается проект

«Опытно промышленные работы при очистной выемке руд с применением сухой закладки и формированием бутобетонных целиков» [90]. К внедрению по проектной технологии планируются составы на основе пустых пород от проходки горных выработок с водным раствором цемента.

Значения удельных расходов различных составов и марок твердеющих бутобетонных смесей на Дукатском и аналогичных рудниках представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Составы бутобетонных твердеющих смесей

Месторождение	Расход материалов, кг/м ³			Прочность в возрасте 28 суток, МПа
	Цемент	Порода	Вода, л	
Биркачан	200	1968	170	3,0
Ведугинское	130	2045	200	2,3
Албазино	100	1950	180	2,0
Приаргунское	172	1590	344	3,0
Дукатское	100	2020	190	2,0

Расчет нормативной прочности закладочного массива производится по известным методикам и проверяется в промышленных условиях.

Нормативная прочность твердеющих смесей для условий отработки Дукатского месторождения, при различной высоте обнажения стенок камер, представлена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Прочность закладки в зависимости от высоты обнажения камер

Высота обнажения закладки в стенках камеры, м	Нормативная прочность в возрасте 28 суток, МПа
до 10	1,0
до 20	1,5
до 30	2,0
до 40	2,5

Необходимо разработать рецептуру твердеющих бутобетонных смесей и обосновать рациональные параметры технологии погашения выработанного пространства с применением сухой закладки и формированием бутобетонных целиков.

3.2. Разработка составов закладочных смесей

В качестве бутобетонной закладки на руднике применяется смесь пустой породы от проходки горных выработок с водным раствором цемента. Количество инертного материала на 1 м³ бутобетонной смеси:

- цемент марки не ниже М400 в количестве 80-100 кг;
- пустая порода в объеме 1,0 м³;
- вода – 180-200 л.

Размерность пустых пород для приготовления бутобетонной смеси не более 200 мм, согласно технического проекта [90].

Крупный заполнитель в твердеющей закладочной смеси заметно влияет на характер напряженного состояния и деформации при нагружении закладочного бетона. При уменьшении степени раздвижки зерен цементным раствором влияние крупного заполнителя в бетоне возрастает, при этом крупный заполнитель содействует уплотнению прослоек раствора. Регулируя влагообмен растворной части крупный заполнитель заметно влияет на условия твердения цементного камня.

Зависимости прочностных и деформационных свойств бутобетонных твердеющих смесей носят средний статистический характер и от них возможны отклонения. Поэтому технологические расчеты рекомендуется проверять опытами [26,90].

Для установления зависимости прочности бутобетона от крупности пород при 20, 40 и 60% участии в твердеющей смеси были проведены исследования в лабораторных условиях.

Расход материалов по составам закладочных смесей представлен в таблице 3.5 .

Таблица 3.5 - Расход материалов по составам закладочных смесей

№ п/п	Марка состава	Доля крупной фракции заполнителя, +50-200 мм	Расход материалов, кг/м ³		
			Цемент	Породы	Вода, л
1	ПЦ-80-20	20	80	1870	180
2	ПЦ-80-40	40	80	1870	180
3	ПЦ-80-60	60	80	1870	180
4	ПЦ-100-20	20	100	2020	190
5	ПЦ-100-40	40	100	2020	190
6	ПЦ-100-60	60	100	2020	190

Гранулометрический состав пород от проходческих работ представлен в таблице 3.2 и на рисунке 3.1. Истинная плотность пород, - 2,4-2,6 т/м³, крепость – 9-11.



Рисунок 3.1 – Грансостав породы от проходческих работ
Химический состав показан в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Химический состав пород

Литотип	Содержание окислов, %								
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Афировые липариты	78	0,3	15	2	0,5	0,5	2,3	3	4
Афировые липариты	73	0,33	13	1,45	0,88	0,38	1,2	3,38	4,46
Туфолавы липарит-дацитов	68	0,8	14	2,5	1,7	0,8	1,2	3,6	4,46

3.3. Влияние крупности пород на прочность бутобетонной смеси

Определение прочности бетона производили в соответствии с ГОСТ [44-45] по общепринятым методикам.

Форма куба представляет собой контейнер разборного типа, выполненный из оцинкованной стали толщиной 7мм. Формы куба изготовлены по ГОСТ 22685-89. Рабочий размер полости, мм: 300 х 300 х 300 (Рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 - Форма ФК-300

Способ, режим твердения образцов среднюю плотность образцов бетона принимали по ГОСТ [45]:

$$\rho_{б.с} = \frac{m_2 - m_1}{V\phi}, \quad (3.1)$$

где m_1 и m_2 - массы пустого сосуда и сосуда с бетоном, кг;

V^Φ - объем сосуда, л.

Фактический расход материалов на 1 м³ бетона:

$$\begin{aligned} C &= \frac{\rho_{б.с}}{\sum m} m_{ц}; & B &= \frac{\rho_{б.с}}{\sum m} m_{в}; \\ Ш &= \frac{\rho_{б.с}}{\sum m} m_{ш}; & П &= \frac{\rho_{б.с}}{\sum m} m_{п}; \end{aligned} \quad (3.2)$$

где $m_{ц}$, $m_{ш}$, $m_{п}$, $m_{в}$ - фактические расходы материалов на пробный замес, кг;

$\sum m$ - суммарная масса всех материалов в замесе.

На рисунке 3.3. представлена свежеприготовленная бутобетонная смесь с долей крупной фракции заполнителя +50-200 мм около 60%.



Рисунок 3.3 – Свежеприготовленная бутобетонная смесь

Контрольные образцы бутобетона (Рисунок 3.4) в возрасте 3, 7, 28, 90 и 180 суток испытывали на машине ИП-1250-М Авто (Рисунок 3.5).



Рисунок 3.4 – Контрольный образец бутобетона



Рисунок 3.5 - Испытательная машина ИП-1250-М Авто

Прочность тяжелого бетона (МПа) вычисляли по формуле

$$R = \alpha_M \frac{P}{F} 0,1^{-2}, \quad (3.3)$$

где P – разрушающая нагрузка, Н;

F – средняя площадь рабочего сечения образца, см²;

α_M – масштабный коэффициент прочности бетона, для образцов 30x30x30

см - $\alpha_M=1,1$;

10^{-2} - коэффициент пересчета, МПа.

Изменение прочности бетона в зависимости активности цемента, водоцементного отношения и качества заполнителей определяли из выражения:

$$R_{\sigma} = AR_{\text{ц}} \left(\frac{C}{B} - 0,5 \right) \text{ при } \frac{B}{C} \geq 0,4, \quad (3.4)$$

$$R_{\sigma} = A_1 R_{\text{ц}} \left(\frac{C}{B} + 0,5 \right) \text{ при } \frac{B}{C} < 0,4, \quad (3.5)$$

где R_{σ} - предел прочности бетона при сжатии, кг/см²;

A, A_1 - коэффициент качества заполнителей (Таблица 3.7);

$R_{\text{ц}}$ - активность цемента, кг/см².

Таблица 3.7 - Значение коэффициентов A и A_1

Характеристика исходных материалов	A	A_1
Высококачественные	0,65	0,43
Рядовые	0,60	0,40
Пониженного качества	0,55	0,37

Результаты исследований представлены в таблице 3.8 и на рисунках 3.6 и 3.7.

Таблица 3.8 - Зависимость прочности бутобетона от количества крупной фракции

Марка состава	Прочность бутобетона, МПа, при сроках твердения, сутки				
	3	7	28	90	180
ЦП-80-20	0,37	0,57	1,25	1,7	2,1
ЦП-80-40	0,49	0,7	1,4	1,92	2,24
ЦП-80-60	0,62	0,83	1,55	2,16	2,37
ЦП-100-20	0,51	0,81	1,5	2,14	2,35
ЦП-100-40	0,6	1,09	1,7	2,21	2,51
ЦП-100-60	0,7	1,15	1,95	2,36	2,92

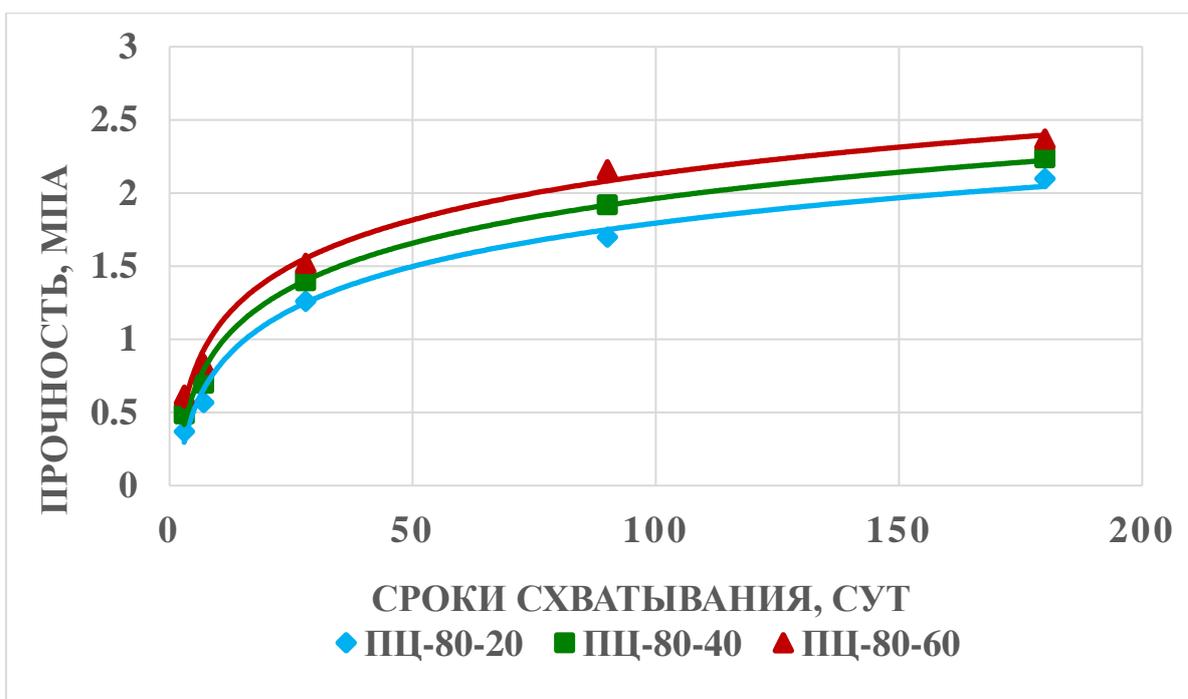


Рисунок 3.6 - Влияние крупности пород на прочность бутобетонной смеси: при расходе цемента 80 кг/м^3 и доле крупной фракции заполнителя +50-200 мм 20,40 и 60% соответственно

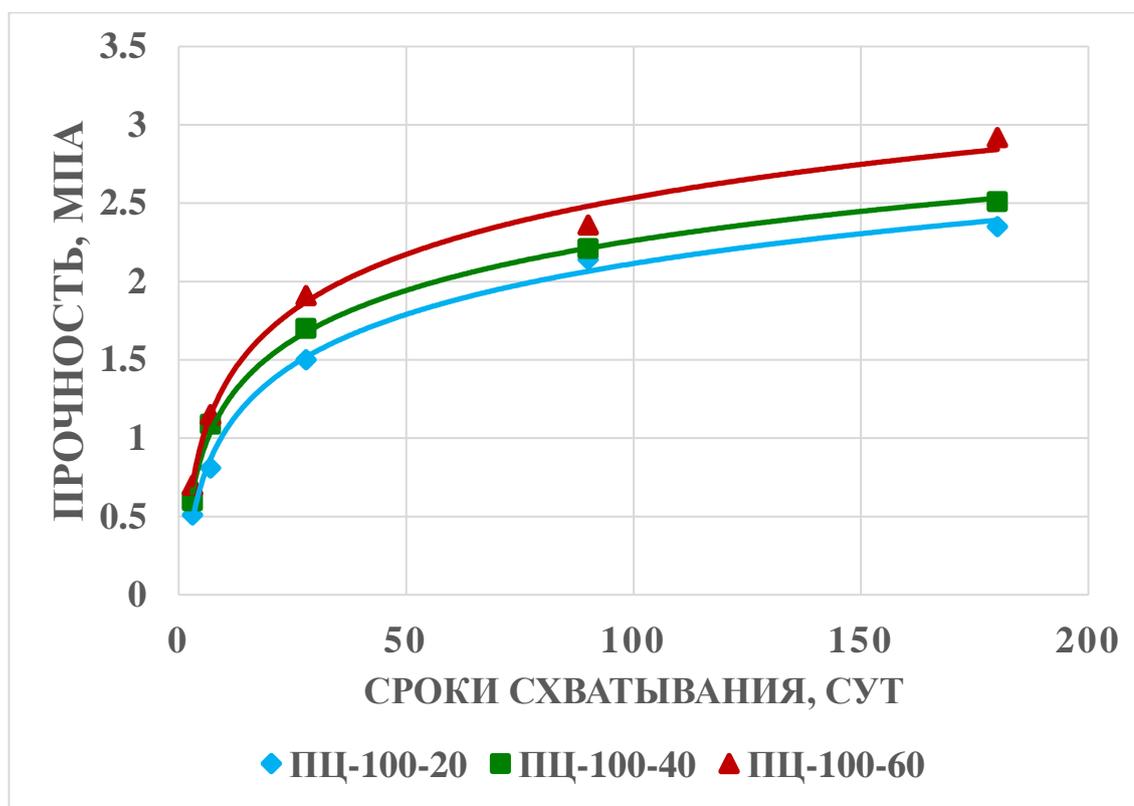


Рисунок 3.7 - Влияние крупности пород на прочность бутобетонной смеси: при расходе цемента 100 кг/м^3 и доле крупной фракции заполнителя +50-200 мм 20,40 и 60% соответственно

Обработка экспериментальных данных позволила получить зависимости влияния крупности пород на прочность смеси:

при расходе цемента 80 кг/м³

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 60\%) = 0,4529\ln(t) + 0,0444 \quad R^2 = 0,917 \quad 3.6$$

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 40\%) = 0,4409\ln(t) - 0,067 \quad R^2 = 0,987 \quad 3.7$$

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 20\%) = 0,4274\ln(t) - 0,1735 \quad R^2 = 0,934 \quad 3.8$$

при расходе цемента 100 кг/м³

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 60\%) = 0,5229\ln(t) + 0,1274 \quad R^2 = 0,967 \quad 3.9$$

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 40\%) = 0,4594\ln(t) + 0,1457 \quad R^2 = 0,914 \quad 3.10$$

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 20\%) = 0,4692\ln(t) - 0,0461 \quad R^2 = 0,959 \quad 3.11$$

где: $\sigma_{сж.}$ - прочность образца, МПа;

t - время, сутки;

Увеличение доли фракции крупного заполнителя +50-200 мм до 60 % , при изготовлении твердеющих бутобетонных смесей, увеличивает прочность образцов закладки в зависимости от сроков твердения на 15-22%.

Получены логарифмические зависимости влияния крупного заполнителя +50-200 мм на прочность твердеющей бутобетонной смеси.

3.4. Расчет параметров междуэтажных и междукамерных целиков целиков

Напряженное состояние искусственного массива из твердеющей закладочной смеси определяется вычислением компонентов напряжений и перемещений по всему массиву. Для описания механизма передачи нагрузок на рудные и искусственные целики и определения их напряженного состояния применяют метод, использующий принцип совместности перемещений пород кровли и почвы, рудных и искусственных целиков в статически неопределимой системе.

Общее уравнение для определения напряжений в целиках:

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1, X_2, \dots, X_n) = v_{1i}(X_i), \quad (3.12)$$

где: $i=1, 2, 3, \dots, n$ - число целиков;

$v_i(-\gamma H)$ – смещение на контуре кровли под действием собственной масс;

$v_i(X_1, X_2, \dots, X_n)$ - смещение на контуре кровли от реактивного действия целиков;

$v_{1i}(X_i)$ - собственные укорочения целиков.

Для вычисления смещений $v_i(-\gamma H)$ используют решение для щелевого выреза [10]:

$$v_i(-\gamma H) = \frac{2\gamma H(1-\mu^2)}{E_n} \sqrt{1 - \left(\frac{x_i}{L'}\right)^2}, \quad (3.13)$$

где: L' – половина пролета панели;

μ – коэффициент Пуассона;

x_i - координата i -й точки смещения кровли;

H – глубина разработки;

E_n – модуль деформаций вмещающих пород.

Смещение $v_i(X_1, X_2, \dots, X_n)$ над i -м целиком от воздействия целиков

$$v_i(X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{(1-\mu^2)L'}{\pi E_n} \sum_{l=1}^n X_l 4(I-x^2) \arccos \left[\varepsilon_i \eta_i + \sqrt{(I-\varepsilon_i^2)(I-\eta_i^2)} \right] - (x-\varepsilon_i) \ln \frac{I-x\varepsilon_i-\sqrt{A_i}}{I-x\varepsilon_i+\sqrt{A_i}} + (x+\varepsilon_i) \ln \frac{I+x\varepsilon_i-\sqrt{A_i}}{I+x\varepsilon_i+\sqrt{A_i}} - (-x+\eta_i) \ln \frac{I-x\eta_i-\sqrt{B_i}}{I-x\eta_i+\sqrt{B_i}} - (x+\eta_i) \ln \frac{I+x\eta-\sqrt{B_i}}{I+x\eta+\sqrt{B_i}} \quad (3.14)$$

где: ξ_i, η_i, x – безразмерные координаты начала, конца и центра целика в долях $2L'$;

$$A_i = (I-\varepsilon_i^2)(I-x^2), B_i = (I-\eta_i^2)(I-x^2),$$

Собственные упругие деформации рудных целиков в условиях плоской деформации

$$v_{1i} X_i^p = \frac{h_i(1-\mu_p^2)}{E_i'} X_i^p \quad (3.15)$$

где: E_i' - модуль деформации рудного целика.

После извлечения запасов первичных камер перемещения описываются системой уравнений вида

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1^p, X_2^p, \dots, X_n^p) = v_{1i}(X_i^p) \quad (3.16)$$

При выемке целиков второй очереди учитывают деформации рудных целиков к моменту заполнения камер закладкой. Для искусственных целиков первой очереди

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1^p, X_2^p, \dots, X_n^p, X_1^s, X_2^s, \dots, X_n^s) = v_{1i}(X_i^s) + v_{1i}(X_{10ч}^p); \quad (3.17)$$

для рудных целиков

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1^p, X_2^p, \dots, X_n^p, X_1^s, X_2^s, \dots, X_n^s) = v_{1i}(X_{10ч}^p); \quad (3.18)$$

где: $v_{1i}(X_{10ч}^p)$ - деформации рудных целиков, берутся как среднее двух соседних с искусственным;

$v_{1i}(X_i^s)$ - собственные деформации искусственного целика, определяемого при условии плоской деформации:

$$v_{1i}(X_i^s) = \frac{h_i(1-\mu_3^2)}{E_3} X_i^s \quad (3.19)$$

μ_3 - коэффициент Пуассона закладки;

E_3 - модуль деформации закладочного массива.

Нагрузка на искусственные целики при выемке оставшихся рудных целиков рассчитывают с учетом деформаций рудных и искусственных целиков на первой и последующих стадиях отработки.

Для целиков первой очереди из закладки

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1^s, X_2^s, \dots, X_n^s) = v_{1i}(X_i^s) + v_{1i}(X_{10ч}^p),$$

для второй очереди

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1^s, X_2^s, \dots, X_n^s) = v_{1i}(X_i^s) + v_{1i}(X_{10ч}^p) + v_{1i}(X_{20ч}^s) \quad (3.20)$$

При решении возможно учесть нелинейную зависимость деформационных характеристик закладки от действующего давления. В работе использовано описание поведения закладочного массива под нагрузкой давлением

$$\Delta(P) = \varepsilon_0 h (I - e)^{-\sigma / [\sigma_{сж}]}, \quad (3.21)$$

где: $\Delta(P)$ - обжатие закладки, м;

$\bar{\sigma}_3$ – действующее давление, МПа;

ε_0 - предельная деформация;

h - мощность закладки, м;

$[\bar{\sigma}_{сж}]$ – предел прочности закладки на сжатие, МПа.

Результаты расчетов данным методом хорошо согласуются с результатами моделирования и натурных замеров.

В инженерных расчетах успешно применяют упрощенные методы построенные на привлечении специальных гипотез и предположений наибольшее распространение получили методы сопротивления материалов и зависимости, полученные моделированием. Так, для целиков из закладки нормальные напряжения в закладке $\sigma = P/S_3$,

где: P – нагрузка на искусственный целик; P ;

S_3 - площадь сечения целика, м;

Для искусственных потолочин используют метод, основанный на допущении о подобии механизма деформации кровли очистных выработок прогибу плит, балок-стенок. Теория балок-стенок может быть успешно применена в условиях подработки мощного слоя закладки камерами нижнего этажа

При уменьшении отношения $h_3:l$ распределение напряжений в кровле камер приближается к значениям, найденным по формулам сопротивления материалов. При $h_3:l < 0,25$ расчет балок обеспечивает достаточную точность.

После задания нагрузок на искусственный массив или его элементы и определения их напряженного состояния рассчитывают требуемую прочность закладки решением условия прочности в наиболее опасных сечениях. В общем случае условия прочности имеет вид

$$\sigma \leq [\sigma], \quad (3.22)$$

где: σ - расчетное или приведенное напряжение при сложном напряженном состоянии, действующее в искусственном массиве;

$[\sigma]$ - допустимое напряжение в закладке при простом растяжении или сжатии.

При инженерных расчетах ограничиваются определением одного из главных напряжений. Влияние других компонентов отражают введением коэффициентов, учитывающих изменение несущей способности искусственного массива в условиях объемного нагружения: коэффициентов формы [29], упрочнения [6], контактируемости [32], числа свободных поверхностей.

Учет технологических факторов, влияние которых отражено аналитически и в основном проявляется на прочностных характеристиках искусственного массива, производят введением в условия прочности коэффициента запаса. Коэффициент запаса прочности находят с помощью вероятностно-статистических методов; он представляется в виде случайной величины, плотность распределения которой зависит от законов распределения прочности и действующих нагрузок:

$$K_3 = F([\sigma], \sigma_1 \sigma_3), \quad (3.23)$$

Если распределения прочности и нагрузок подчиняются нормальному закону, то коэффициент запаса прочности предлагается рассчитывать по методу [10], позволяющему находить его с требуемым уровнем надежности:

$$K_3 = \frac{1 + \sqrt{\Delta^2(A_{[\sigma]}^2 + A_p^2) - \Delta^2 A_{[\sigma]}^2 A_p^2}}{1 - \Delta^2 A_p^2} \quad (3.24)$$

где: $A_p, A_{[\sigma]}$ – изменчивость нагрузки и прочности %

Δ - характеристика безопасности;

$\Phi(\Delta) = 1 - \nu$ – функция Лапласа, по которой рассчитывается характеристика безопасности;

ν – вероятность разрушения; $\nu = 1 - p_1$; p_1 – уровень надежности.

Общие схемы для расчётов междуэтажных и междукамерных целиков приводятся на рисунке 3.8:

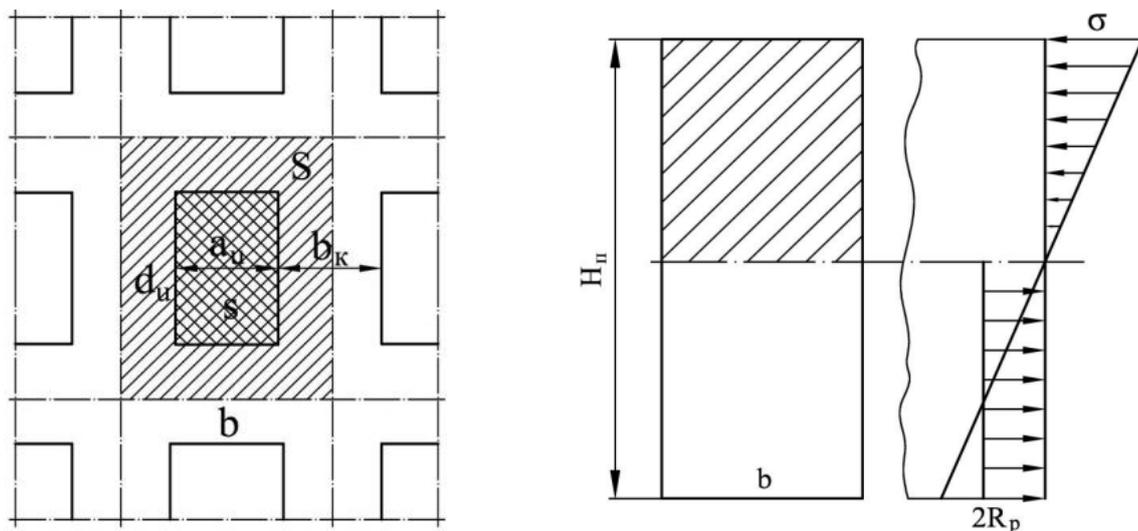


Рисунок 3.8 – Расчетная схема междукамерного и междуэтажного целиков

Коэффициент формы:

$$K_{\phi} = \begin{cases} \frac{h}{m_{\text{норм}}}, & \text{при } h < m_{\text{норм}} \\ \sqrt{\frac{h}{m_{\text{норм}}}}, & \text{при } h \geq m_{\text{норм}} \end{cases} \quad (3.25)$$

где h – толщина целика, м;

$m_{\text{норм}}$ – нормальная мощность рудного тела, м;

$m_{\text{гор}}$ – горизонтальная мощность рудного тела, м.

Условие прочности междуэтажного целика по величине сжимающих напряжений имеет вид:

$$\frac{F}{h \cdot L} \leq \sigma_{\text{сж}} \cdot \frac{K_{\text{стр}} K_{\text{ер}} K_{\phi}}{K_{\text{зан}}} \quad (3.26)$$

где L – пролёт камеры по простиранию рудного тела, м;

$\sigma_{\text{сж}}$ – прочность пород на сжатие в образце, МПа;

$K_{\text{зан}}$ – коэффициент запаса прочности целиков;

$K_{\text{стр}}$ – коэффициент структурного ослабления.

Сила F , входящая в условие прочности принимается равной:

$$F = P_2 + P_6 \cdot \text{ctg}(\alpha), \quad (3.27)$$

где P_2 , P_6 – величины горизонтальных и вертикальных нагрузок, которые определяют из выражениями:

$$P_2 = \lambda \gamma H L K_k \left[h + \frac{L \cdot (h_{эм} - h)}{2(L + h_{эм} - h)} \right], \quad (3.28)$$

$$P_6 = \gamma H L K_k \left[\frac{h}{\operatorname{tg}(\alpha)} + \frac{L \cdot (h_{эм} - h)}{2(L \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + h_{эм} - h)} \right]. \quad (3.29)$$

где H – глубина разработки, м;

α – угол падения рудных тел α , град;

λ – коэффициент бокового распора;

$h_{эм}$ – высота этажа, м;

γ – объёмный вес пород, т/м³.

Коэффициент K_k вычисляется по формуле:

$$K_k = 1 + \frac{\Delta K_k + 2,4}{2}, \quad (3.30)$$

где

$$\Delta K_k = \frac{0,2m}{0,5h^2 \operatorname{ctg}^2(\alpha) + 0,08m_{\text{зоп}}}. \quad (3.31)$$

Из условия равенства нагрузки и несущей способности целика определяется высота междуэтажного целика.

Для условий месторождения Дукат расчётные значения высоты междуэтажного целика в зависимости от глубины разработки H , мощности рудного тела $m_{\text{зоп}}$, угла падения α и значения пролета приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Высота междуэтажного целика

Угол падения, град.	Глубина разработки, м	Мощность рудного тела, м				
		2	4	6	8	10
80	150	2,5	3	3,5	4	4,5
	200	2,5	3,5	4	4,5	5
	250	2,5	3,5	4	4,5	5
	300	3	3,5	4,5	5	5,5
70	150	2,5	3,5	4	4,5	5
	200	3	3,5	4,5	5	5,5
	250	3	4	4,5	5,5	6
	300	3	4	5	6	6,5

Угол падения, град.	Глубина разработки, м	Мощность рудного тела, м				
		2	4	6	8	10
60	150	3	4	4,5	5	6
	200	3,5	4,5	5	6	6,5
	250	3,5	4,5	5,5	6,5	7
	300	3,5	5	6	7	7,5

Условие прочности междукамерного целика по величине сжимающих напряжений имеет вид:

$$\frac{R \cdot \sin(\alpha) \cos(\varepsilon)}{h \cdot L} \leq \sigma_{сж} \cdot \frac{K_{стр} K_{вр} K_{ф}}{K_{зап}} \cdot K_{осл}. \quad (3.32)$$

Коэффициент ослабления целика $K_{осл}$, учитывающий уменьшение его рабочей площади при проведении в МКЦ горных выработок, определяется по следующей формуле:

$$K_{осл} = \frac{(h - a_{в} - 0,4) \cdot (h_{пр} - h_{р} - 0,4)}{h_{пр} \cdot h}, \quad (3.33)$$

где $a_{в}$ – ширина восстающего;

$h_{пр}$ – среднее расстояние между осями соседних рассечек, пройденных из восстающего;

$h_{р}$ – ширина рассечки в целике.

Результирующая сила R , входящая в условие прочности имеет вид:

$$R = \sqrt{P_{г}^2 + P_{в}^2}, \quad (3.34)$$

где $P_{г}$, $P_{в}$ – величины горизонтальных и вертикальных нагрузок.

Направление действия результирующей нагрузки R на междукамерный целик находится по формуле:

$$\delta = \arctg \frac{P_{в}}{P_{г}}. \quad (3.35)$$

Угол ε между нормалью к плоскости контакта руды с вмещающими породами и направлением действия результирующей нагрузки на целик R определяется по формуле:

$$\varepsilon = \alpha + \delta - \frac{\pi}{2}. \quad (3.36)$$

При обработке руды в МКЦ необходимо пройти вентиляционно-ходовой восстающий, из которого в блок проходятся сбойки. Данные выработки ослабляют МКЦ, что учитывается в расчёте. Для условий месторождения Дукат расчётные значения ширины междукамерного целика, с учётом восстающего шириной не более 2 м, в зависимости от глубины разработки H , мощности рудного тела $m_{гор}$ и угла падения α приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 - Мощность междукамерного целика

Угол падения, град.	Глубина разработки, м	Мощность руды, м				
		2	4	6	8	10
80	150	4,5	5	6	6,5	7
	200	4,5	5	6,5	7	7
	250	4,5	5	6,5	7	7,5
	300	4,5	5	6,5	7	7,5
70	150	4	4,5	6	6,5	7
	200	4,5	5	6,5	6,5	7
	250	4,5	5	6,5	7	7
	300	4,5	5	6,5	7	7,5
60	150	4	4,5	6	6,5	7
	200	4,5	5	6,5	6,5	7
	250	4,5	5	6,5	7	7,5
	300	4,5	5	6,5	7	7,5

Параметры усредненной выемочной единицы для условий обработки месторождения: длина блока по простиранию – 100 м; высота блока – 50 м; высота подэтажа – 10÷15 м; ширина междуэтажных целиков (потолочины) – 5 м.

3.5 Исследование степени уплотнения массива из породной закладки

После подачи в очистную камеру, под воздействием гравитационных и технологических процессов, закладочный материал из пород от проходческих работ переуплотняется, значительно превосходя первоначальную плотность [35].

Увеличение плотности укладки сухой породной закладки приводит к изменению её механических свойств, определяющих её поддерживающие свойства.

С целью установления технологических параметров закладочного массива на степень уплотнения сухой породной закладки, были проведены исследования в лабораторных условиях [35]. Исследовалось влияние параметров закладываемой камеры (высоты закладочного массива, ширины очистного пространства и угла падения) на величину коэффициента уплотнения сухой породной закладки с соблюдением геометрического и физического подобия моделирования [35].

В каждом опыте породу засыпали в модель с одинаковой высоты порциями, наращивая высоту столба сыпучего до уровня соответствующей отметки, в каждый раз на 4 см, при этом фиксировали объем V_p и вес Q_p в зависимости от высоты породной закладки [35]:

$$\gamma_p = \frac{Q_p}{V_p} \quad (3.37)$$

В качестве критерия, характеризующего уплотнение закладки в пределах заданных параметров камеры был принят коэффициент уплотнения, который определяют из выражения [35]:

$$K_y = \frac{K_{p1}}{K_p} \quad (3.38)$$

где: K_p - первоначальный коэффициент разрыхления пород;

K_{p1} - коэффициент разрыхления породной закладки.

Величину коэффициента разрыхления породной закладки определяют из соотношения объемного веса материала породной закладки в массиве γ_{p1} к объемному весу закладки γ_p [35].

При исследовании влияния параметров камеры на коэффициент уплотнения закладки был принят трехфакторный эксперимент. Для исследуемых факторов матрица планирования имела вид, представленный в таблице 3.11.

Таблица 3.11 - Уровни факторов и интервалы их варьирования [35]

Условные обозначения		Факторы	Уровни			Интервал	Размерность
Натур. масштабе	Кодовом масштабе		+1	0	-1		
H _s	x ₁	Высота закладочного массива	48	26	4	22	м
α	x ₂	Угол падения	90	75	60	15	град.
M _o	x ₃	Ширина очистного пространства	10	6	2	4	м

Результаты экспериментальных данных исследований влияния параметров закладываемой камеры на величину коэффициента уплотнения сухой породной закладки приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 - Результаты исследований

№№ опытов	Кодовый масштаб			Натуральный масштаб			K _y
	x ₁	x ₂	x ₃	H _s	α	M _o	У
1	-1	-1	-1	4	60	2	0,88
2	+1	-1	-1	48	60	2	1,18
3	-1	+1	-1	4	90	2	0,98
4	+1	+1	-1	48	90	2	1,28
5	-1	-1	+1	4	60	10	0,93
6	+1	-1	+1	48	60	10	1,25
7	-1	+1	+1	4	90	10	1,06
8	+1	+1	+1	48	90	10	1,37
9	-1	0	0	4	75	6	0,96
10	+1	0	0	48	75	6	1,28
11	0	-1	0	26	60	6	1,17
12	0	+1	0	26	90	6	1,26
13	0	0	-1	26	75	2	1,22
14	0	0	+1	26	75	10	1,25

Обработка экспериментальных данных, представляющих собой полный факторный эксперимент, позволила получить следующее уравнение регрессии:

$$K_y = 0,343964 + 0,018556H_s + 0,010990\alpha - 0,007014M_o - 0,000221H_s^2 - 0,000053\alpha^2 + 0,000508 M_o^2 - 0,000004H_s \alpha + 0,000043 H_s M_o + 0,000104\alpha M_o \quad (3.39)$$

Результаты обработки данных представлены на рисунках 3.9 и 3.10.

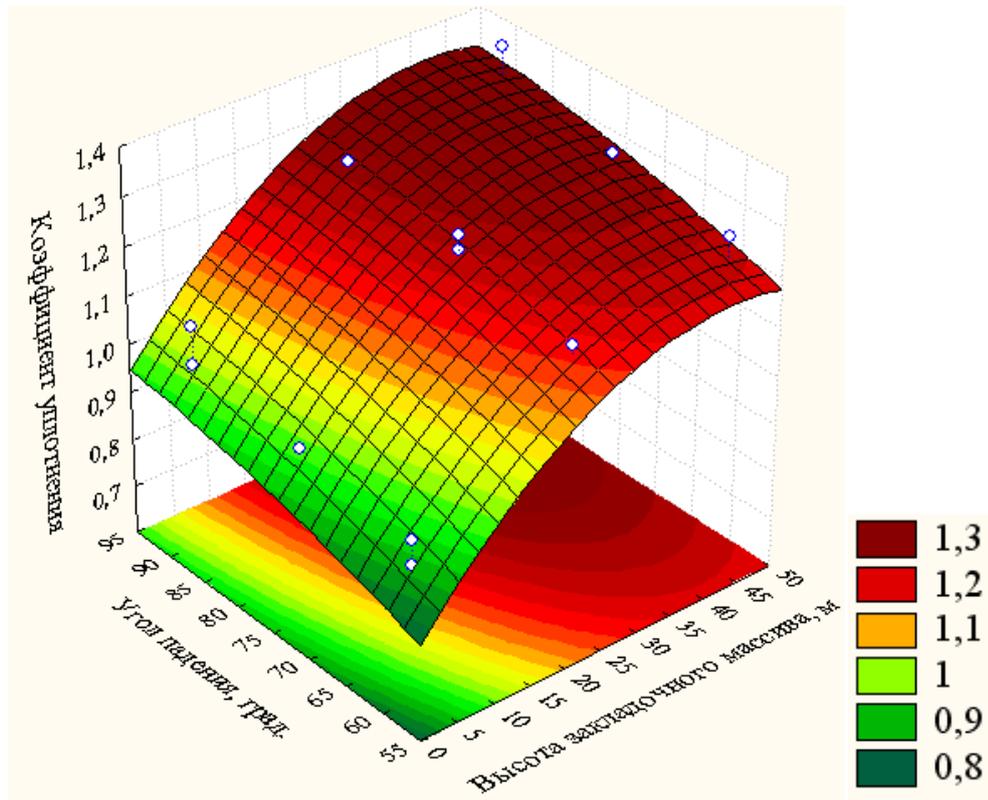


Рисунок 3.9 - График зависимости коэффициента уплотнения породной закладки от высоты закладочного массива и угла падения

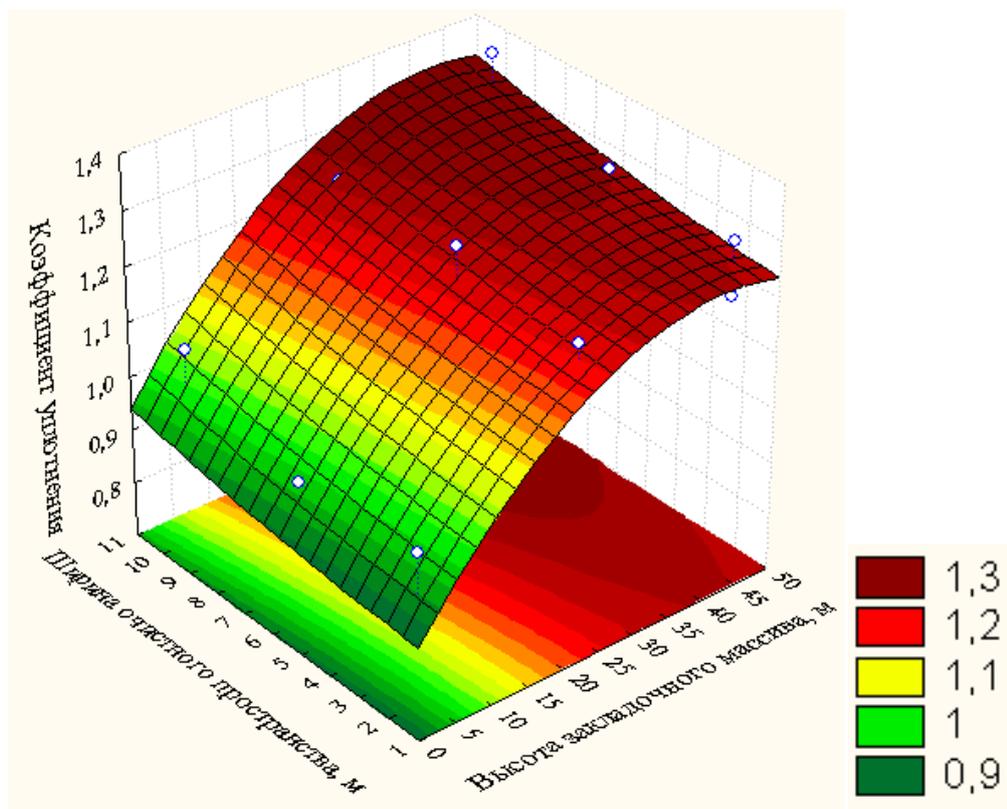


Рисунок 3.10 - График зависимости коэффициента уплотнения породной закладки от высоты закладочного массива и ширины очистного пространства

По абсолютным значениям коэффициентов регрессии было произведено ранжирование независимых переменных по силе их влияния на функцию отклика K_u . ранги: x_1 , x_2 , x_3 [35]. Наиболее сильное влияние на коэффициент уплотнения (K_u) оказывает высота закладочного массива (H_s), затем угла падения (α) и ширины очистного пространства (M_o) [35].

В результате исследований установлено [35], что величина коэффициента уплотнения породной закладки изменяется с увеличением высоты закладочного массива, ширины очистного пространства и угла падения, при этом влияния угла падения и ширины очистного пространства соответственно 1,7 и 2,7 раза ниже, чем высота закладочного массива [35].

Выводы по 3 главе

3.1. В условиях отработки маломощных крутопадающих месторождений поэтажно-камерными системами разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства увеличение доли фракции крупного заполнителя +50-200 мм с 20 до 60 % в составе твердеющих бутобетонных смесей обеспечивает приращение прочности закладки на 0,5-0,7 МПа на 28 сутки твердения.

3.2. Выявлены закономерности формирования закладочного массива из твердеющей бутобетонной смеси при применении поэтажно-камерных систем разработки при отработке маломощных крутопадающих рудных тел, включающие логарифмически зависимости прочности твердеющей бутобетонной смеси от содержания крупного заполнителя.

3.3. Установлена нелинейная зависимость коэффициента уплотнения породной закладки от геометрических характеристик закладываемой камеры $K_u = 0,343964 + 0,018556H_s + 0,010990\alpha - 0,007014M_o - 0,000221H_s^2 - 0,000053\alpha^2 + 0,000508 M_o^2 - 0,000004H_s \alpha + 0,000043 H_s M_o + 0,000104\alpha M_o$ (где H_s и M_o – высота и ширина камеры; α – угол наклона стенок камеры).

3.4. Выявлено, что величина коэффициента уплотнения породной закладки изменяется с увеличением высоты закладочного массива, ширины очистного пространства и угла падения, при этом влияния угла падения и ширины

очистного пространства соответственно 1,7 и 2,7 раза ниже, чем высоты закладочного массива [35].

горно-подготовительных и нарезных работ. Параметры усредненной выемочной единицы: длина блока – 100 м; высота блока – 50 м; высота потолочины – 5 м.

Отработку запасов ведут подэтажами высотой 10÷15 м в отступающем порядке от одного фланга блока к другому. Выемка руды производится секциями путем взрывания скважин диаметром 64 мм, вслед за очистной отбойкой с отставанием в 20 м производят закладку выработанного пространства из разведочного штрека. В качестве закладки применяется смесь пустой породы от проходки горных выработок с водным раствором цемента. Приготовление закладочной смеси происходит в специально подготовленной для этих целей выработке вентиляционно-закладочного горизонта в зумпфе (Рисунок 4.2).

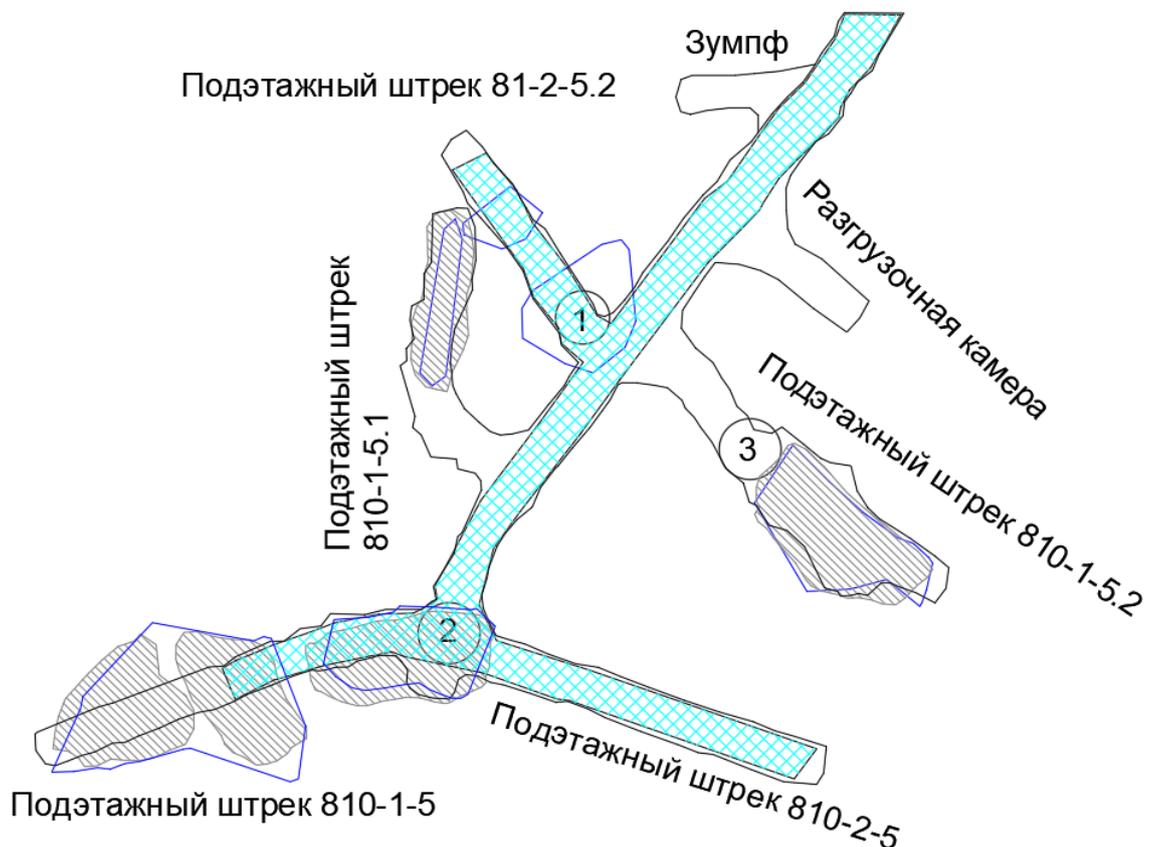


Рисунок 4.2 – Схема размещения зумпфовой камеры

После формирования бутобетонных целиков производят закладку выработанного пространства пустой породой. Закладочные работы сухой закладкой производят путем наращивания и выравнивания породного отвала при помощи ПДМ, до необходимого расстояния от линии отбойки.

Чтобы исключить выдавливание изолирующих перемычек, закладку в очистное пространство необходимо в несколько приемов, выдерживая время между подачами смеси не менее 10 часов.

Зачистку породного вала планируется производить через 3 суток после укладки цементно-породной закладки. При достижении нормативной прочности закладочного массива не менее 1,0 МПа, разрешается начало работ по отработке камер.

Исследованиями установлены следующие характеристики составов бутобетонной закладочных смесей (Таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Составы бутобетонных закладочных смесей

№ п/п	Доля крупной фракции заполнителя, +50-150 мм	Расход материалов, кг/м ³			Нормативная прочность смеси в возрасте 28 сут, МПа
		Цемент	Породы	Вода, л	
1	20	80	1870	180	1,25
2	40	80	1870	180	1,4
3	60	80	1870	180	1,55
4	20	100	2020	190	1,5
5	40	100	2020	190	1,7
6	60	100	2020	190	1,95

Значения нормативной прочности закладки в зависимости от высоты обнажения камер представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Нормативная прочность закладки

Высота обнажения закладки в стенках камеры, м	Нормативная прочность, МПа
до 10	1,0
до 20	1,5
до 30	2,0
до 40	2,5

4.2. Отработка запасов на опытном участке

Рудные тела представляют собой участки с прожилково-вкрапленной

сульфидной серебро-полиметаллической минерализацией, приуроченные к зонам серицит-кварцевых аргиллизитов. Крепость руды по шкале проф. М.М. Протодяконов – 6-10. Объемный вес – 2,75 т/м³. Вмещающие породы представлены риолитами крупнопорфировыми. Объемный вес горных пород – 2,6 т/м³. Крепость пород по шкале проф. М.М. Протодяконова – 9-11.

Горно-геологические условия в пределах опытного участка изменчивые (Рисунок 4.3).

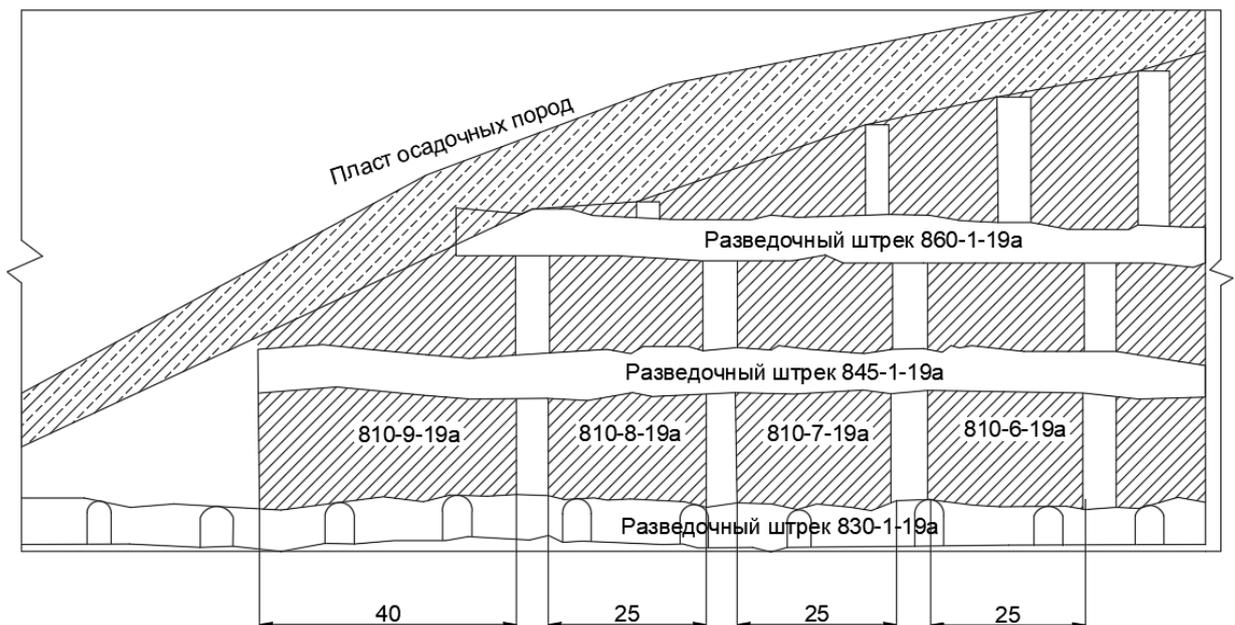


Рисунок 4.3. Проекция рудного тела на вертикальную плоскость

Степень трещиноватости пород изменяется от средне до сильно трещиноватых. Категория устойчивости пород на данном участке зависит от степени трещиноватости и сцепления пород. Категория устойчивости пород варьируется от устойчивых до неустойчивых. На горизонте 830м - преимущественно средне устойчивые породы, на горизонте 845м - устойчивые породы сменяются среднеустойчивыми, на горизонте 860м в пределах подготовительной выработки породы преимущественно устойчивые, но отрицательное влияние на устойчивость пород в верхней части камеры оказываются осадочные породы.

По результатам ранее проведенных исследований для опытно-промышленного участка были приняты следующие конструктивные параметры

камерной системы разработки с закладкой выработанного пространства и формированием бутобетонных междукамерных целиков: допустимый пролет камер составляет 40м в устойчивых породах и до 15м на участках с неустойчивыми породами; мощность междукамерного целика -5м; высота подэтажа -15м. В таблице 4.3 приведены удельные объемы ПНР на 1000 т запасов по рекомендуемой системе разработки с разделением объемов проходки по руде и по породе.

Таблица 4.3 - Удельный объем подготовительно-нарезных работ

Наименование выработок	Кол -во	Длина, м	Сечение , м ²	Объём по руде, м ³	Объём по породе, м ³
Подготовительные работы - по породе					
Полевой откаточный штрек	1	10,0	20,0	-	200,0
Полевой откаточный штрек	1	35,0	17,6	-	616,0
Полевой откаточный штрек	1	55,0	17,6	-	968,0
Блоковый автосъезд	2	360,0	16,5	-	11 880,0
Нарезные работы – по руде					
Рудный штрек	1	100,0	12,8	1 280,0	
Подэтажный буровой штрек	2	100,0	12,8	2 560,0	
Отрезной восстающий	1	46,0	4,0	184,2	-
Итого:	-			3 394,2	14 294,0
Количество руды в блоке, т	-			74 684,9	74 684,9
Расход ПНР, м ³ /1000т	-			45,4	191,4

Работы по очистной выемке и закладке выработанного пространства производили в четыре этапа: отбойка запасов очистной камеры и междукамерного целика; формирование бутобетонного целика; закладочные работы пустой породой; отбойка запасов последующей камеры.

В таблице 4.4 приведены рекомендуемые параметры разработанного варианта подэтажно-камерной системы разработки с использованием комбинированной бутобетонной и породной закладки.

Таблица 4.4 - Параметры подэтажно-камерной системы разработки

Наименование показателей	Значение		
Мощность рудного тела, м	2	6	10
Высота этажа, м	50		
Высота подэтажа, м	10–15	15	15–20
Высота междуэтажного целика, м	2,5–3,5	3,56–6	4,5–7,5
Длина бутобетонного целика, м	5–8	6–9	10–15
Длина камер в второй очереди, м	20–25	15–20	10–15
Предельный пролет обнажения, м	38,9–43,3		
Размер устойчивого обнажения по простиранию, м	50,5–61,7		
Нормативная прочность бутобетонной закладки, МПа	$\geq 1,5$	≥ 2	$\geq 2,5$

Бурение скважин диаметром 64 мм установкой типа Simba S7C велось с разведочных штреков (Рисунки 4.4–4.5).

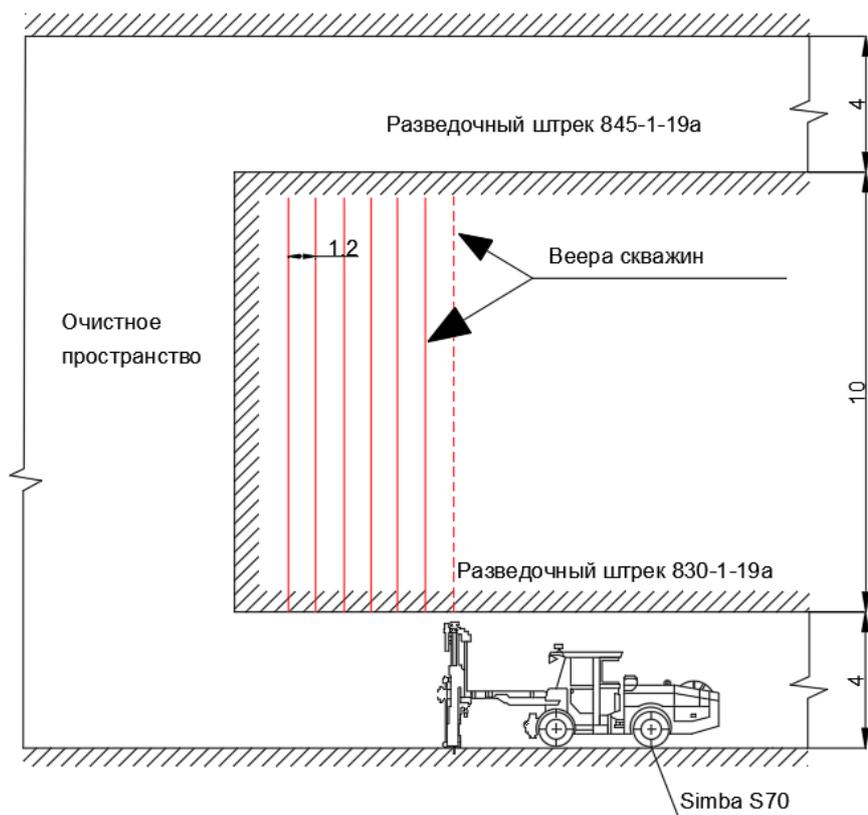


Рисунок 4.4. - Бурение скважин с подэтажного разведочного штрека



Рисунок 4.5. - Стадия 1 отбойка руды

Уборку отбитой руды производили погрузочно-доставочными машинами Utimes MF350 с почвы нижележащих штреков. Формирование бутобетонного целика и закладка очистного пространства пустыми породами производилась с Севера на Юг по разведочному штреку 845-1-19а. Схема формирования бутобетонного целика представлена на рисунке 4.6.

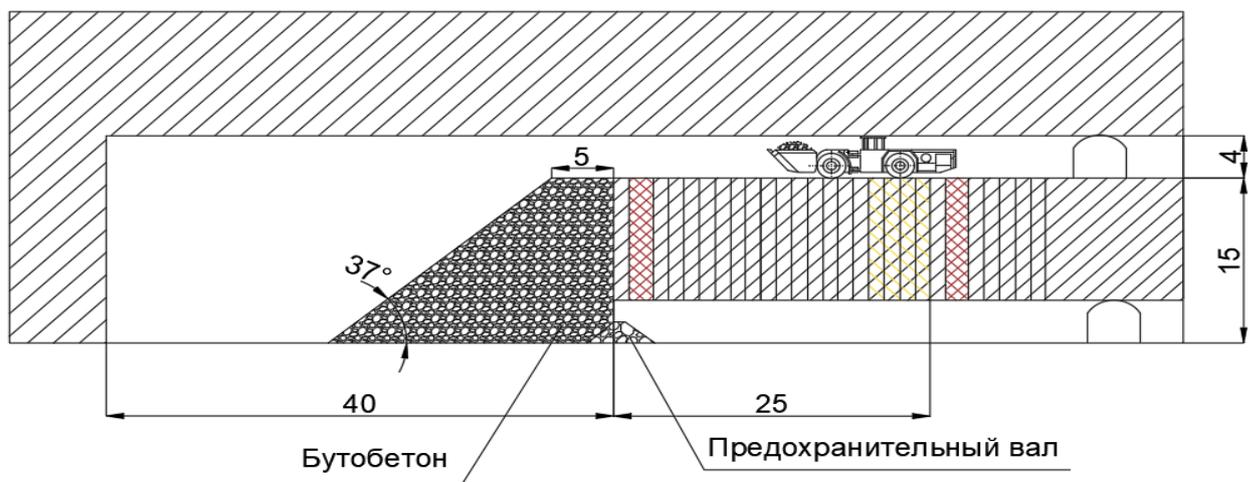


Рисунок 4.6 - Стадия 2 формирование бутобетонного целика

Закладка выработанного пространства камеры и МКЦ бутобетоном производилась после отработки запасов камеры и целика на проектную длину по простиранию 40 м и 25м. Перед закладкой бутобетона в отбитый междукamerный целик, на границе с очистным пространством формировали породный вал, заполнение пространства бутобетоном производили из разведочного штрека гор 845м. Породный вал формировали из пород лежащего бока, путем обуривания веера скважин. Толщина породной подушки должна

быть не менее высоты выработки, исключая аэродинамическую связь горных выработок с отработанной камерой. Приготовление бутобетонной смеси для закладки происходило в специально подготовленной для этих целей выработке - зумпфе (Рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Процесс приготовления бутобетонной твердеющей смеси

В качестве бутобетонной закладки применяли смесь пустой породы от проходки горных выработок с водным раствором цемента. Машиной Utimes MF350 доставлялась вода в зумпф. В ковше погрузочно-доставочной машины ST1030 доставляли цемент в биг-бэгах по 900кг, который путем разрезания высыпали в зумпф. Далее ковшем погрузочно-доставочной машины производили перемешивание цемента и воды.

Количество материала на 1 м³ бутобетонной смеси - цемент марки не ниже М400 в количестве 100 кг, пустая порода в объеме 1,0 м³, вода – 200 л. После перемешивания и получения цементного молочка, засыпали породу от проходческих работ объемом 9 м³ и производили дальнейшее перемешивание, до получения однородной бутобетонной смеси. Готовая смесь транспортировалась в выработанное пространство, согласно схемы закладки. Чтобы исключить «выдавливание» изолирующих перемычек, бутобетон подавали на перемычку в 4 приема, выдерживая время между подачей слоя бутобетона не менее 10 часов.

После формирования бутобетонных целиков производили закладку выработанного пространства пустой породой (Рисунок 4.8).

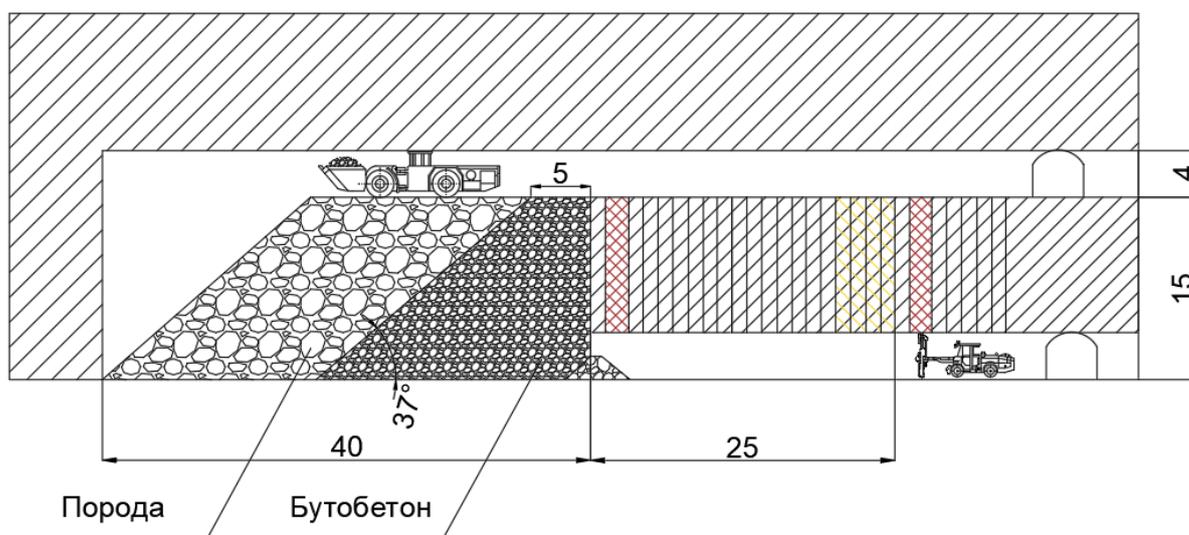


Рисунок 4.8 - Стадия 3 закладка очистного пространства породой

Закладочные работы сухой закладкой производили путем наращивания и выравнивания породного отвала при помощи погрузочно-доставочной машины ST1030, до необходимого расстояния от линии отбойки. После застывания

бутобетона производили зачистку штрека гор.830м. для проведения зарядки взрывных скважин. Последующая отработка камеры представлена на рисунке 4.9.

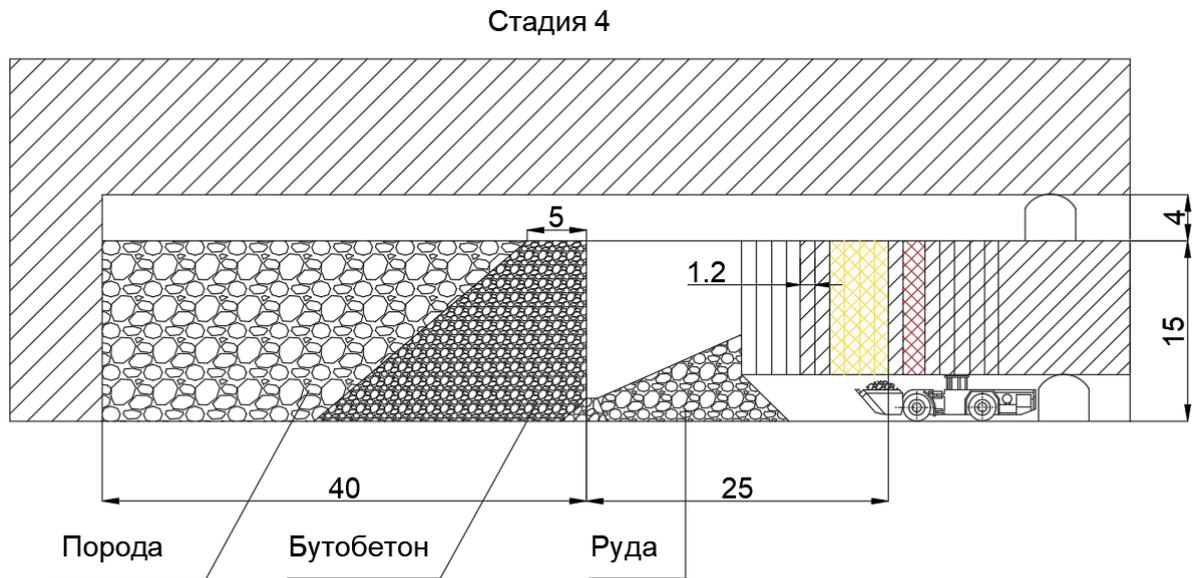


Рисунок 4.9 - Стадия 4 отбойка запасов последующей камера

При ухудшении категории устойчивости (уменьшения длины пролёта) возможна изменения схемы формирования бутобетонных целиков, ниже представлена предполагаемая схема (Рисунок 4.10):



Рисунок 4.10 – Рекомендуемая схема закладки выработанного пространства, при изменении конструктивных параметров камеры

Исследования показали, что рекомендуемые технологии разработки с закладкой выработанного пространства с формированием бутобетонных закладочных массивов в шахматном порядке и закладки оставшейся части выработанного пространства камер скальными породами от проходческих работ

позволяют управлять напряженно-деформированным состоянием массивов и обеспечивать устойчивость бетонобетонного массива действующим статическим и динамическим нагрузкам.

4.3. Оценка экономической эффективности использования технологических рекомендаций

АО «Полиметалл» является крупнейшим в России и третьим в мире производителем первичного серебра и вторым по добыче золота в России [21]. АО «Полиметалл» добывает золото и серебро и ведёт геологоразведочные работы в Магаданской области, Хабаровском крае, Свердловской области, Республике Карелии и Якутии, на Чукотке, а также в Казахстане.

Таблица 4.5 - Производство по месторождениям АО «Полиметалл» в РФ

Добывающие предприятия	Золотой эквивалент, тыс. унций		Изменение, %
	IV квартал 2022	IV квартал 2021	
Дукат	101	96	+6%
Албазино	64	59	+8%
Омолон	56	55	+2%
Нежданинское	42	21	+96%
Светлое	28	26	+9%
Воронцовское	28	30	-10%
Майское	57	54	+5%
Добыча руды, млн тонн	4,5	4,1	+11%
Открытые работы, млн тонн	3,5	3,0	+17%
Подземные работы, млн тонн	1,0	1,1	-6%

Доля в производстве группы компаний АО «Полиметалл» Дукатского рудника составляет около 17%. Денежные затраты на унцию серебряного эквивалента \$10,6. Несмотря на плановое снижение содержания, производство

золота и серебра на Дукатском хабе в 2021 году увеличилось за счет отработки богатых маломощных жил, улучшения контроля содержаний и высокоселективного метода отработки (Таблица 4.6).

Таблица 4.6 - Производственные результаты рудник «Дукат»

Наименование показателей	Показатели		Изменение
	2022	2021	
Добыча			
Вскрыша, млн тонн	2,8	н.п.	-
Подземная проходка, км	44,7	43,6	+2%
Добыча руды, тыс. тонн	2615	2275	+17%
Содержание серебра в руде, г/т	306	282	+8%
Омсукчанская ЗИФ			
Переработка руды тыс. тонн	2055	2001	+3%
Извлечение серебра на ЗИФ, %	86,4	86	+1%

Показатели отработки камер по базовой и рекомендуемой технологиям представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 - Показатели систем разработки

Показатели	Ед. изм.	Системы разработки	
		С разнопрочной закладкой (рекомендуемая)	С подэтажной отбойкой руды (базовая)
Запасы блока	тонн	68 000	68 000
Объем подготовительно-нарезных работ	м ³ /1000т	45,4	74,9
Потери руды п	%	4,5	10,1
Разубоживание руды	%	13,2	30,9
Производительность труда забойного рабочего	м ³ /чел смену	12,4	13,9
Затраты на добычу руды	руб/т	2620	2300

Опытно-промышленные работы на горизонте 830м показали, что использование разработанного варианта подэтажно-камерной системы разработки с использованием комбинированной бутобетонной и породной закладки позволит:

- снизить разубоживание за счет управления устойчивостью бортов и кровли камеры путём формирования искусственных бутобетонных целиков и закладки оставшейся части выработанного пространства камер скальными породами от проходческих работ;

- минимизировать потери руды, за счет сплошной выемки запасов без оставления рудных целиков;

- увеличить несущую способность всей горнотехнической конструкции отрабатываемого этажа за счет уменьшения вертикального пролета погашенного очистного пространства.

Оценку эффективности технологии отработки камер производим путем сопоставления приведенных затрат по формуле [74]:

$$\mathcal{E} = [(C_1 + E_n K_1) - (C_2 + E_n K_2)] \cdot A_r \quad (4.1)$$

где \mathcal{E} - экономический эффект, руб.;

E_n - коэффициент дисконтирования затрат во времени, доли ед.;

K_1 и K_2 - удельные капитальные вложения, C_1 и C_2 - себестоимость 1 т концентрата - при базовой и рекомендуемой технологиях, руб.;

A_r - годовой объем производства продукции, в тоннах.

Формула для оценки экономической эффективности использования технологических рекомендаций имеет вид:

$$\mathcal{E} = \left[\frac{(\Pi_{д1} + \Pi_{п1})\beta_1}{c\varepsilon_1(1 - \Pi_1)(1 - R_1)} - \frac{(\Pi_{д2} + \Pi_{п2})\beta_2}{c\varepsilon_2(1 - \Pi_2)(1 - R_2)} \right] \frac{c\varepsilon_2(1 - \Pi_2)(1 - R_2)}{\beta_2} B \quad (4.2)$$

где c - содержание металла в геологических запасах;

ε_1 и ε_2 - извлечение металла концентрат, Π_1 и Π_2 - потери руды при добыче, R_1 и R_2 - разубоживание руды, β_1 и β_2 - содержание металла в концентрате - соответственно при базовой и рекомендуемой технологиях.

Эффективность использования разработанного варианта подэтажно-

камерной системы разработки с использованием комбинированной бутобетонной и породной закладки при выемке запасов в пределах одной выемочной единицы-блока составит:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= (343187 - 287380) \frac{0,0003 \cdot 0,846(1 - 0,045)(1 - 0,132)}{0,017} \cdot 68000 = \\ &= 47056 \text{ тыс.руб.} \end{aligned}$$

Результаты оценки эффективности использования базовой и рекомендуемой технологии разработки приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8. – Сравнительные показатели систем разработки

Показатели	Системы разработки	
	Подэтажно-камерная с разнопрочной закладкой	С подэтажной отбойкой руды
Содержание серебра в руде, %	0,03	0,03
Разубоживание руды, %	13,2	30,9
Потери руды при добыче, %	4,5	10,1
Извлечение металла в концентрат, %	84,6	84,6
Содержание металла в концентрате, %	17	17
Себестоимость переработки 1т руды, руб	930	930
Себестоимость добычи 1т руды, руб	2620	2300
Приведенные затраты на 1т металла в концентрате, руб	287380	343187
Эффективность на 1т металла в концентрате, руб	55807	

Применение разработанной подэтажно-камерной системы разработки с формированием комбинированного разнопрочного и разномодульного массивов из твердеющей бутобетонной закладки и сыпучих скальных пород, обеспечивает повышение полноты отработки и снижение разубоживания руды, утилизацию отходов производства и экономическую эффективность ведения горных работ. По сравнению по сравнению с действующей на руднике технологией разработки потери и разубоживание руды будут снижены соответственно на 3-5% и 12-17%, при незначительном удорожании себестоимости добычи одной тонны руды за счет закладочных работ.

Выводы по 4 главе

4.1. Разработаны технологии отработки маломощных крутопадающих рудных тел подэтажно-камерными системами разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства путём формирования бутобетонных закладочных массивов в шахматном порядке и закладки оставшейся части выработанного пространства камер скальными породами от проходческих работ позволяют управлять напряженно-деформированным состоянием массивов и обеспечивать устойчивость бутобетонного массива действующим статическим и динамическим нагрузкам.

4.2. Сформированные в шахматном порядке через каждые 25-40 м массивы из твердеющей бутобетонной закладки способствуют увеличению несущей способности всей горнотехнической конструкции обрабатываемого этажа за счет уменьшения вертикального пролета погашенного очистного пространства на 15-25 м.

4.3. Обоснован способ формирования разнопрочных закладочных массивов при подэтажно-камерной системе разработки на основе сочетания бутобетонной и породной закладки, что обеспечивает снижение потерь и разубоживания руды соответственно на 3-5% и 12-17% за счет повышения устойчивости формируемых горнотехнических конструкций действующим нагрузкам.

4.4. Установлено, что применение рекомендуемой технологии отработки маломощных крутопадающих рудных тел по сравнению с базовой технологией разработки позволит получить экономический эффект в размере более 47 млн. руб, при отработке балансовых запасов 68000 тонн в пределах одной выемочной единицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором исследований решена актуальная научно-практическая задача – обоснованы параметры подэтажно-камерной системы разработки с формированием разнопрочных закладочных массивов на основе бутобетонной и породной закладки, позволяющая повысить показатели полноты и качества извлечения руды из недр при отработке маломощных крутопадающих месторождений, что имеет существенное значение для развития горнодобывающей промышленности.

Основные научные и практические результаты, выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. Выявлено, что для условий отработки нижних горизонтов Дукатского месторождения выбор технологии разработки рудных тел определяется действием в массиве горных пород горизонтальной составляющей природного поля напряжений, превышающей вертикальную в 1,37-1,5 раза, что обусловлено действием в рудовмещающем массиве поля гравитационно-тектонических напряжений.

2. Установлено, что при отработке очистных камер с использованием породной закладки имеют место разрушения закладочного массива за счет его слабой устойчивости и вывалов боковых пород, разубоживание руды достигает до 35-40%, потери руды до 10-12 %. Массив из породной закладки частично поддерживает вмещающие породы от обрушения, но не является искусственной опорой для восприятия горного давления.

3. Выявлено, что величина предельного пролета обнажения (l_0), при подэтажно-камерных системах разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства, зависит от средней глубины разработки (H_{cp}) и коэффициента крепости горных пород (f) и может быть определена по регрессионной зависимости $l_0 = 40,56 - 15,55 H_{cp} - 0,18 H_{cp}^2 + 12,78 f - 3,88 f^2$.

4. Установлена нелинейная зависимость коэффициента уплотнения породной закладки от геометрических характеристик закладываемой камеры

$K_y = 0,343964 + 0,018556H_s + 0,010990\alpha - 0,007014M_o - 0,000221H_s^2 - 0,000053\alpha^2 + 0,000508 M_o^2 - 0,000004H_s\alpha + 0,000043 H_sM_o + 0,000104\alpha M_o$ (где H_s и M_o – высота и ширина камеры; α – угол наклона стенок камеры).

5. Получены закономерности формирования закладочного массива из твердеющей бутобетонной смеси при применении подэтажно-камерных систем разработки при отработке маломощных крутопадающих рудных тел, включающие логарифмически зависимости прочности твердеющей бутобетонной смеси от содержания крупного заполнителя.

6. Установлено, что увеличение доли фракции крупного заполнителя +50-200 мм с 20 до 60 % в составе твердеющих бутобетонных смесей обеспечивает приращение прочности закладки на 0,5-0,7 МПа на 28 суток твердения.

7. Доказано, что технологии отработки маломощных крутопадающих рудных тел подэтажно-камерными системами разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства путём формирования бутобетонных закладочных массивов в шахматном порядке и закладки оставшейся части выработанного пространства камер скальными породами от проходческих работ позволяют управлять напряженно-деформированным состоянием массивов и обеспечивать устойчивость бутобетонного массива действующим статическим и динамическим нагрузкам.

8. Обосновано, что способ формирования разнопрочных закладочных массивов при подэтажно-камерной системе разработки на основе сочетания бутобетонной и породной закладки обеспечивает снижение потерь и разубоживания руды соответственно на 3-5% и 12-17% за счет повышения устойчивости формируемых горнотехнических конструкций действующим нагрузкам.

9. Установлено, что применение рекомендуемой технологии отработки маломощных крутопадающих рудных тел по сравнению с базовой технологией разработки позволит получить экономический эффект в размере более 47 млн.

руб, при отработке балансовых запасов 68000 тонн в пределах одной выемочной единицы.

Список использованной литературы

1. Агошков М.И. Развитие идей и практики комплексного освоения недр. М.: ИПКОН АН СССР, 1982. - 25 с.
2. Агузаров Т.А. Управление устойчивостью рудовмещающих пород формированием закладочных массивов из разнопрочных составов. Дис. канд. техн. наук. – Владикавказ –2000. – С. 110.
3. Айнбиндер И.И. Развитие интенсивных технологий подземной разработки удароопасных месторождений на больших глубинах. Автореф. докт. дис. - М - 1997. - С. 38.
4. Бадтиев Б.П., Галаов Р.Б., Марысюк В.П. Камерная система разработки вкрапленных руд в условиях подработки на руднике «Комсомольский» // Горный журнал. - 2009. - №10. - С. 58-60.
5. Байконуров О.А., Крупник Л.А., Петухов В.Н. Технология добычи руды с твердеющей закладкой. - М.: Недра, - 1979. С. 151.
6. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. -М.: Недра. - С. 271.
7. Богуславский Э.И., Минаев Д.Ю. Технология восходящей отработки месторождений на больших глубинах // «Горный информационно-аналитический бюллетень» МГГУ. - 2005. -№ 2. -С. 161-165.
8. Битимбаев М. Ж., Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н. Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых. — Алматы, 2012. - 624с.
9. Бронников Д.М., Замесов Н. Ф., Богданов Г.И. Разработка руд на больших глубинах. М.: Недра, - 1982. - С. 292.
10. Бакулин В.А. Контроль устойчивости искусственной кровли при нисходящей слоевой выемке // Горный журнал. - 2010. - №4. - С. 19-21.
11. Валиев Н.Г., Беркович В.Х., Пропп В.Д., Гусманов Ф.Ф. Рациональный способ повторного использования закладочного материала. В сборнике: Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений. Сборник докладов. 2019. С. 16-19.

12. Ветров С.В. Допустимые размеры обнажений горных пород при подземной разработке руд. М.: Наука. - 1975. - С. 198.

13. Воробьев А.Е., Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н. и др. Ресурсосберегающая технология выемки руды на контакте с закладочным массивом // Маркшейдерия и недропользование. – М., 2010. – № 5. – С. 22 – 29.

14. Габараев О.З., Голик В.И., Разоренов Ю.И. Управление геомеханикой скального массива при подземной добыче руд // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2017. - № 3. - С. 55-65.

15. Габараев: О.З. Исследование геомеханических свойств породной закладки в условиях объемного сжатия // «Горный информационно-аналитический бюллетень» МГГУ. - 2001. - №8. - С. 211-214.

16. Габараев О.З., Валиев Н.Г., Майстров Ю.А., Зассеев И.А. Обоснование параметров технологии отработки подработанных вкрапленных руд // Устойчивое развитие горных территорий. - 2017. - № 1. - С. 109-115.

17. Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Пыталев И.А. Расширение области рационального использования техногенных георесурсов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2006. - № 9 - С. 252-258.

18. Галченко Ю. П., Михайлов Ю. В., Сабянин Г. В. Экономическая эффективность применения льдопородной закладки при подземной разработке месторождений в криолитозоне // Экологические системы и приборы. — 2005. — № 5. — С. 28—31.

19. Гарифулина И.Ю. Отработка запасов сильнонарушенных руд в приразломных зонах рудника Скалистый / Гарифулина И.Ю., Кубалов Р.О., Гасымов В.Ф.О., Габараев Г.О. // В сборнике: Наука и инновации - современные концепции. Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума. Отв. редактор Д.Р. Хисматуллин. – 2020. – С. 185-190.

20. Гарифулина И.Ю. Анализа опыта управления устойчивостью рудовмещающего массива при выемке маломощных крутопадающих жил / Гарифулина И.Ю., Габараев Г.О. // Матрица научного познания. – 2020. – №6. – С. 580-587.

21. Гарифулина И.Ю. Валидация БПЛА в решении маркшейдерских задач на руднике «Дукат» / Курбатова В.В., Волин А.М., Ломакина Н.Е., Гарифулина И.Ю., Кузьменков М.А. // Горная промышленность. – 2023. – № 1. – С. 47-50.

22. Гарифулина И.Ю. К проблеме безопасности комбинированной разработки месторождения Тырнауз / Голик В.И., Гарифулина И.Ю., Абдулхалимов А.Г., Зассеев И.А., Майстров Ю.А. // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – №1. – С. 14-20.

23. Гарифулина И.Ю. Практика применения малозатратных технологий погашения выработанного пространства при добыче руд / Гарифулина И.Ю., Зассеев И.А., Дедегкаева Н.Т., Габараев Г.О. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – №4. – С. 304-312.

24. Гарифулина И.Ю. Влияние тонины помола шлака на прочность закладочных смесей / Гарифулина И.Ю., Зассеев И.А., Майстров Ю.А., Габараев Г.О. // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2021. – №12. – С. 77-82.

25. Гарифулина И.Ю. Параметры обнажений стенок камер при системах разработки с твердеющей закладкой / Зассеев И.А., Гарифулина И.Ю., Дедегкаева Н.Т., Гашимова З.А. // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2021. – №12. – С. 89-93.

26. Гарифулина И.Ю. Исследование состояния закладочного массива при различных условиях нагружения / Зассеев И.А., Гарифулина И.Ю., Березов А.К., Дедегкаева Н.Т. // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2021. – № 13. – С. 26-30.

27. Гарифулина И.Ю. Технология использования малоактивных компонентов для подземного строительства / Голик В.И., Олисаев А.С., Гарифулина И.Ю., Гашимова З.А. // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2020. – №5-6 (256-257). – С. 56-62.

28. Гарифулина И.Ю. К диверсификации технологий разработки Боснийского месторождения доломитов / Олисаев А.С., Гарифулина И.Ю.,

Гашимова З.А. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 253-265.

29. Гарифулина И.Ю. Технология отработки маломощных участков золоторудного месторождения с селективной отбойкой руд и пород / Олисаев А.С., Гарифулина И.Ю., Гасымов В.Ф., Габараев Г.О. // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2020. – №6. – С. 43-49.

30. Гарифулина И.Ю. Оработка маломощных участков месторождения поэтажно-камерной системой разработки с последующей закладкой выработанного пространства / Гарифулина И.Ю., Гасымов В.Ф., Габараев Г.О., Кубалов Р.О. // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2020. – №7. – С. 45-48.

31. Гарифулина И.Ю. Моделирование процесса предконцентрации рудной массы / Кожиев Х.Х., Гарифулина И.Ю., Габараева А.О., Дедегкаева Н.Т. // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2020. – №9. – С. 92-96.

32. Гарифулина И.Ю. Система разработки закладкой выработанного пространства с наклоном стенок камер на рудный массив / Гарифулина И.Ю., Дедегкаева Н.Т., Зассеев И.А., Габараев Г.О. // Нанотехнологии: наука и производство. – 2022. – №2. – С. 15-19.

33. Гарифулина И.Ю. Влияние геометрических параметров отбываемого слоя на показатели разубоживания руды закладкой / Гарифулина И.Ю., Сахнов А.В., Габараев Г.О. // В сборнике: Мировые тенденции развития науки и техники: пути совершенствования. Материалы X Международной научно-практической конференции. АНО «НИИ ДПО». – Москва. – 2022. – С. 201-203.

34. Гарифулина И.Ю. Обоснование пролетов устойчивых обнажений при отработке золотосеребряного месторождения «Дукат» / Гарифулина И.Ю., Баликоева М.С., Гуриева Е.В. // В сборнике: Естественно-научные и гуманитарные исследования: теоретические и практические аспекты. Материалы XXXI Всероссийской научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону. – 2021. – С. 256-260.

35. Гарифулина И.Ю. Влияние параметров массива на степень уплотнения породной закладки / Габараев О.З., Гарифулина И.Ю., Зассеев И.А., Березов А.К. // Национальная Ассоциация Ученых. – 2021. – №73-1. – С. 12-15.

36. Гарифулина И.Ю. Валидность технических решений разработки россыпного месторождения золота «Р. Авекова» / Курбатова В.В., Гарифулина И.Ю., Глотова Е.А., Кудрявцева Ю.В. // В сборнике: На перекрестке Севера и Востока (методологии и практики регионального развития). Материалы IV Международной научно-практической конференции. Северо-Восточный государственный университет. – Красноярск, – 2023.– С. 249-252.

37. Гарифулина И.Ю. Анализ параметров систем подземной отработки месторождения «Купол» и порядка отработки блока NE 3 35-3 / Курбатова В.В., Ломакина Н.Е., Гарифулина И.Ю., Глотова Е.А. // Маркшейдерия и недропользование. – 2023.– №3 (125). – С. 12-17.

38. Гарифулина И.Ю. Достоверность геолого-маркшейдерского учета добычи и движения руды / Курбатова В.В., Ломакина Н.Е., Гарифулина И.Ю., Ельникова Е.А. // Вестник Северо-Восточного государственного университета. – 2023. – №39. – С. 68-70.

39. Гарифулина И.Ю. Обоснование рационального применения беспилотных летательных аппаратов при маркшейдерском обслуживании открытых горных работ на руднике «Дукат» / Курбатова В.В., Волин А.М., Ломакина Н.Е., Гарифулина И.Ю. // Горный журнал. – 2023. – №4. – С. 16-19.

40. Гарифулина И.Ю. Закономерности бурения скважин в техногенно разрушенных карбонатных породах / Габараев О.З., Гуриева Е.В., Олисаев А.С., Гарифулина И.Ю. // В сборнике: Наука и инновации - современные концепции. Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума. Ответственный редактор Д.Р. Хисматуллин. – 2020. – С. 181-185.

41. Гарифулина И.Ю. Параметрическая сходимость результатов съемки беспилотных воздушных аппаратов Геоскан 40 и GNSS при выполнении маркшейдерских работ на месторождении «Наталка» Магаданской области / Курбатова В.В., Ломакина Н.Е., Гарифулина И.Ю., Кузьменков М.А., Ельникова

Е.А., Никулин А.Ф. // Маркшейдерия и недропользование. – 2023. – №2 (124). – С. 76-80.

42. Гарифулина И.Ю. Перспективы разработки Садонских месторождений подземным выщелачиванием / Гарифулина И.Ю., Абдулхалимов А.Г., Засеев И.А., Майстров Ю.А. // Горные науки и технологии. – 2020. Т. 5. – №4. – С. 358-366.

43. Гарифулина И.Ю. Процессы очистной выемки при подземной разработке месторождений: учебное пособие: [по направлению подготовки 21.05.04 «Горное дело»] / Габараев О.З, Кабисов Х.Г., Гарифулина И. Ю., Майстров Ю.А.; Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Северо-Восточный государственный университет. – Владикавказ: Алым парус. – 2020. – 203 с.

44. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартинформ. – 2012 – С. 36.

45. ГОСТ 18105-2018 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – М.: Стандартинформ. – 2018 – С. 15.

46. Джонс Р., Фэкэроу И. Неразрушающие методы испытаний бетонов. - М.: Стройиздат. - 1974. - С. 292.

47. Емельянов, В. И. Основы разработки месторождений полезных ископаемых в экосистемах криолитозоны: учебное пособие / В. И. Емельянов, Ю. В. Михайлов, В. Ф. Носков ; МГОУ, 2005. – Москва. – 278 с.

48. Еременко А. А., Гахова Л. Н. Оценка геомеханического состояния массива горных пород при отработке подэтажей с закладкой и без закладки выработанного пространства // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. - 2016. - Т. 1. - № 3. - С. 56-61.

49. Еременко В. А., Есина Е. Н., Семенякин Е. Н. Технология оперативного мониторинга напряженно-деформированного состояния разрабатываемого массива горных пород // Горный журнал. - 2015. - № 8. - С. 42-47.

50. Закладочные работы в шахтах: Справочник (Под ред. Д.М. Бронникова. М.: Недра, - 1989. - С. 400.

51. Зотеев О.В., Криницын Р.В. Влияние сухой закладки на несущую способность целиков // Проблемы недропользования. - 2019. - №4 (23). - С. 144-155.
52. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. - М.: Недра, 1988. -112 с.
53. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам. РД 06-329-99. - М., 2003. - 82 с.
54. Казикаев Д.М. Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке руд. М.: Недра, - 1981. - 288 с.
55. Камнев Е. Н., Михайлов Ю. В., Морозов В. Н. Проблемы и перспективы освоения урановых месторождений Восточной Сибири // Горная промышленность. — 2008. — № 2. —С. 81—91.
56. Каплунов Д. Р., Калмыков В. Н., Рыльникова М. В. Комбинированная геотехнология // М.: Руда и металлы. –2003. – 558 с.
57. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Комбинированная разработка месторождений // М.: Горная книга. –2012. 344 с.
58. Каплунов Д.Р., Рубан А.Д., Рыльникова М.В. Комплексное освоение недр комбинированными геотехнологиями // М: ООО НИИЦ «Недра XXI». – 2010. 304 с.
59. Каплунов Д.Р., Шубодеров В.И. Перспективы разработки рудных месторождений комбинированным способом // Горный журнал. - 1997. - №8. - С. 16-19.
60. Карелин В.Н., Бадтиев Б.П., Марысюк В.П., Айнбиндер И.И., Аршавский В.В. Исследования влияния параметров камер на устойчивость обнажений массива подработанных вкрапленных руд // Горный журнал. - 2010. - №6. - С. 55-57.
61. Котенко Е.А., Чесноков Н.И., Грязнов М.В. Уранодобывающая промышленность капиталистических стран. М.: Атомиздат. - 1979. - 270 с.

62. Кравцова Р.Г., Павлова Л.А., Тарасова Ю.И. Формы нахождения серебра в рыхлых отложениях потоков рассеяния Дукатского золото-серебряного месторождения // Геохимия. - 2010. - №7. - С. 779-784.

63. Кравченко В.П., Куликов В.В. Применение твердеющей закладки при разработке рудных месторождений. М.: Недра, 1974. - 200 с.

64. Красных С. Н. Опытные-промышленные испытания намораживаемой породной закладки выработанного пространства // Цветная металлургия. – 1985. – №7. – С. 13-15.

65. Крупник Л.А., Шапошник Ю.Л., Шапошник С.Н. Исследование составов смесей для совершенствования закладочных работ на подземных рудниках Восточного Казахстана // Горный журнал. - 2010. - №4. - С. 51-53.

66. Кузьмин Е.В., Святецкий В.С., Стародумов А.В., Величко Д.В. Укрепление вмещающих пород при отработке урановых месторождений Стрельцовского рудного поля камерными системами разработки // Горный журнал - 2015. - № 2. - С.32-36.

67. Кузьмин Е.В., Святецкий В.С., Стародумов А.В., Иоффе А.М., Величко Д.В. Определение параметров геомеханического состояния породного массива на контурах выемочных камер // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. - № 12. - С 15.

68. Ляшенко В.И., Коваленко В.Н., Голик В.И., Габараев О.З. Бесцементная закладка на горных предприятиях. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, -1992. - С. 95.

69. Малинин А.М., Хуцишвили В.И., Хубулов О.Ю. Состояние и перспективы закладочных работ Талнахских рудников // Цветные металлы, - 2007. - №7. - С. 13-15.

70. Медведев В.В. Обоснование эффективной технологии формирования породобетонной закладки при камерных системах разработки. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Чита, 2009. – 20 с.]

71. Медведев В. В. Подбор составов твердеющей породобетонной смеси для закладки подземных камер // Кулагинские чтения: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. Ч.3. – Чита, 2011. – С.50–52.]

72. Медведев В.В., Пакулов В.В. Совершенствование технологии закладочных работ при камерных системах разработки с закладкой // Вестник ЗабГУ.—2013.—Вып.10(101).—С.2–31.]

73. Мельников Н.Н., С.П. Горное дело в Арктике // Труды 8-го Международного симпозиума «Горное дело в Арктике» / Апатиты – СПб.: Иван Федоров, 2005. – 304 с.

74. Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. М.: Наука, - 1981. - С. 5-7.

75. Методические указания по технологии приготовления и определению физико-механических свойств на эквивалентных материалах. Л.: ВНИМИ, - 1980. - С. 95.

76. Методические указания по определению механических свойств и напряжений в массиве пробами МГД. Л.: ВНИМИ. - 1979. - С. 74.

77. Методические указания по исследованию проявлений горного давления на моделях из эквивалентных материалов. Л.: - 1976. - С. 85.

78. Методические указания по определению нормативной прочности твердеющей закладки и оценке прочностных свойств искусственных массивов. Л.: - 1975. - С. 43.

79. Михайлов, Ю. В. Эффективность применения льдопородной закладки при отработке многолетнемерзлых месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2001. – №7. – С. 40-42.

80. Михайлов Ю. В., Галченко Ю. П. Экотехнологии подземной добычи ценных руд в многолетнемерзлых массивах Сибири и Дальнего Востока // Экологический вестник России. —2014. — № 10. — С. 46—53.

81. Моделирование как метод исследования в горной механике / Падуков В .А. // Зап. Ленингр. горн, ин-та. - 1991. - №125. - С. 29-36.

82. Монтянова А.Н. Прогнозирование и контроль прочностных параметров закладочного массива, твердеющего в условиях пониженных температур // Горный журнал. - 2000. - №7. - С. 82-84.

83. Монтянова А.Н. Обоснование технологии закладки выработанного пространства при разработке кимберлитовых трубок в криолитозоне. Автореф. докт. дис. Магнитогорск, - 2006. - С. 40.

84. Николаев Е.И. и др. Опыт разработки технологических схем закладочных комплексов рудников цветной металлургии Казахстана. // Цветная металлургия. - 1982. - №13. - С. 8-16.

85. Методические указания по установлению размеров камер и целиков при камерных системах разработки руд цветных металлов. Л. «ВНИМИ», 1972 г. . – 82с.

86. Временные правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок месторождения руд цветных металлов с неизученным процессом сдвижения горных пород. Л. «ВНИМИ», 1986г.-76с.

87. Методические указания по определению размеров камер и целиков при подземной разработке руд цветных металлов. Чита. «ВНИПИГорцветмет», 1986г. – 82с.

88. Определение физико-механических и компрессионных свойств закладочных бетонов ШХЦ. Отчёт. ОАО ВНИМИ по договору № РН-114-07. Этап II, С-Пб, - 2008. - С. 39.

89. Отчет о НИР «Разработка методических рекомендаций по параметрам и порядку отработки целиков, построению зон сдвижения и обрушения, отработке сближенных рудных тел на золотосеребряном месторождении «Дукат», ВНИМИ, СПб, - 2006. – С. 79

90. Отчет о НИР «Опытно промышленные работы при очистной выемке руд с применением сухой закладки и формированием бутобетонных целиков». Акционерное общество «Серебро Магадана», Омсукчан, - 2020. – С. 49

91. Подземная разработка мощных рудных месторождений: Межвуз. сборник / Под ред. М.Н. Цыгалова. Магнитогорск. - 1990. - С. 88.
92. Правила технической эксплуатации рудников, приисков и шахт, разрабатывающих месторождения цветных, редких и драгоценных металлов. — М.: Недра, - 1981.-С. 108.
93. Разработка нормативов прочности закладочного массива ШХЦ в вертикальных обнажениях. Отчёт. ОАО ВНИМИ по договору № РН-114-07. Этап IV С-Пб, - 2009, - С. 30.
94. Райс В.В. Определение параметров технологии с замораживаемой закладкой выработанного пространства при отработке ценных руд жильных месторождений в криолитозоне. Дис. канд. техн. наук. - СПб.: СПГУ, 2019.- 215с.
95. Разработка месторождений с закладкой / Под редакцией С. Гранхольма - М.: Мир, - 1987. - С. 517.
96. Рыльникова М.В. Обоснование параметров комбинированной геотехнологии освоения медно-колчеданных месторождений Урала. Дисс. докт. техн. наук. – Магнитогорск. –1999. 316 с.
97. Савич И.Н. Порядок и варианты технологии подземной разработки руд с закладкой выработанного пространства // Горная промышленность. – М. – 1999. – № 2. – С. 5 – 9.
98. Сашурин А.Д., Аглюков Х.И. Управление геомеханическими процессами возведением высокоплотного закладочного массива // Горный журнал. - 2006. -№2. - С. 36-39.
99. Смирнов О. Ю. Анализ механизма формирования удароопасности рудных месторождений // Маркшейдерия и недропользование. – 2017. – №5. – С. 41 – 44.
100. Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Особенности полей первоначальных напряжений жильных месторождений, расположенных в криолитозоне // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5—2. — С. 162—173.

101. Струков, К.И. Совершенствование технологии подземной добычи на Кочкарском месторождении // Горный журнал. - 2017. - № 9. - С. 21-25.
102. Требуков А.Л. Применение твердеющей закладки при подземной добыче руд. М.: Недра, - 1981. - С. 172.
103. Хайрутдинов М.М., Карасев А.Г. Формирование разнопрочных закладочных массивов при разработке месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень - М.: МГГУ, 2008. -№1.-С. 276-283.
104. Хомяков В. И. Зарубежный опыт закладки на рудниках. - М.: Недра, 1984. - С. 224.
105. Хубулов О.Ю. Аналитический метод определения предела прочности закладочного массива в обнажениях горных выработок // Горный журнал. - 2010. - №6. - С. 78-82.
106. Цыгалов М.Н. Подземная разработка с высокой полнотой извлечения руд. М.: Недра, - 1985. - С. 272.
107. Шапошник Ю.Н., Неверов С.А., Неверов А.А. Бутобетонная закладка на подземных рудниках Крайнего Севера// Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. - 2021. - Т. 8. - №1. - С. 282-290.
108. Vandopadhyay, S. Ice-Cemented Backfill for Underground Support in Arctic Mines / S. Vandopadhyay, V. Izaxon // Proceedings of the SME Annual Meeting. – Denver, SME Preprint, 2004. – n. 04-23. – P. 45.
109. Robertson B. E. Mechanized narrow vein mining at the Dome Mine, Timmins, Ontario // CIM Bulletin. 1986. Vol. 79. No. 885. P. 39–44.
110. RS2. Thermal Analysis. Examples // Rocscience. 2022. URL: static.rocscience.cloud/assets/verification-and-theory/RS2/RS2_Thermal_Analysis_Examples.pdf.