

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Владикавказ - 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Научный руководитель:

ГАБАРАЕВ Олег Знаурович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

РЫЛЬНИКОВА Марина Владимировна

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела теории проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук

БЕРГЕР Роман Владимирович

Кандидат технических наук, директор по производству Общества с ограниченной ответственностью «ЕвроХим-ВолгаКалий»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет»

Защита диссертации состоится 29 сентября 2023 г. в 14-00 час. на заседании диссертационного Совета Д 24.2.397.02. при ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), по адресу: 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, диссертационный зал, корпус 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет):<https://www.skgmi-gtu.ru/ru/dissertation/garifulina-i-yu>

Автореферат разослан 23 июля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



М.В. Гегелашвили

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 поэтажно-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 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.

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.

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

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

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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, интенсивной тектонической нарушенности и высокой напряженности рудовмещающих пород. Такие условия характерны для рудников «Купол», «Павлик», «Нявленга», «Штурмовской», «Нежданнинский», «Лунное», «Дукат», «Стеуби», «Рэнкин»,

«Болиден», «Биджовагге». «Космос», «Балларат» и др. Как показывает опыт разработка маломощных крутопадающих рудных тел в условиях криолитозоны в основном ведется слоевыми и подэтажно-камерными системами разработки с породной или льдопородной закладкой, которые сопровождаются значительными потерями и разубоживанием руд при их добыче. Повысить полноту выемки полезного ископаемого и снизить разубоживание руды возможно за счет внедрения систем разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства. Широкое применение технологии с закладкой твердеющим смесями на основе цементных вяжущих сдерживается необходимостью строительства дорогостоящих закладочных комплексов и трубопроводов, дефицитом вяжущих материалов и высокой себестоимостью закладочных работ.

Изучение вопросов технологии формирования закладочных массивов при разработке маломощных крутопадающих месторождений показало, что все предложенные идеи, подходы и решения ведущих отечественных ученых академика М.И. Агошкова, член-корреспондента РАН Д.Р. Каплунова, докторов технических наук И.И. Айнбиндера, Н.Г. Валиева, О.З. Габараева, Ю.П. Галченко, В.И. Голика, Н.Ф. Замесова, О.А. Зотеева, В.Н. Калмыкова, Е.В. Кузьмина, А.А.Неверова, И.А. Пыгалева, М.В. Рыльниковой, И.Н. Савича, М.Н. Цыгалова, Ю.Н.Шапошника, и других внесли значительный вклад в развитие горной науки и производства.

Обзор теоретических взглядов и анализ практики добычи руд цветных металлов на отечественных и зарубежных рудниках показывает, что созданы технологии формирования бутобетонной смеси с приготовлением на месте размещения и не требующие строительства специальных закладочных комплексов, но в то же время не достаточно полно изучены закономерностей формирования прочностных свойств бутобетонных смесей для обоснования технологических параметров систем разработки, что имеет важное значение при разработке месторождений полезных ископаемых и подтверждает актуальность темы исследований диссертации.

Задачи решались применительно к условиям отработки месторождения золотосеребряных руд рудника «Дукат» АО «Полиметалл». Участок месторождения представлен крутопадающими рудными телами малой и средней мощности, залегающими в породах средней устойчивости. Глубина залегания рудных тел от 0 до 500 м. Отработка месторождения осуществляется в два

этапа: верхняя часть месторождения до горизонта +1010 м отрабатывается открытым способом, нижняя часть - подземным способом. Месторождение расположено в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты, нулевая изотерма вскрыта скважинами на глубине 400 метров от дневной поверхности. При повышении температуры в горном массиве под воздействием климатических и технологических факторов происходит таяние льда в трещинах, которое способствует снижению устойчивости горных пород.

Для отработки маломощных рудных тел на руднике применяют подэтажно-камерную и слоевую системы разработки с породной и льдопородной закладкой. Очистные работы в блоке ведут с применением малогабаритного самоходного оборудования. В качестве закладки используется порода от проходческих работ.

Применяемые варианты систем разработки обладают существенными недостатками: высоким разубоживанием руды обусловленных прихватом пустых пород при отбойке и закладочного материала при погрузке руды. значительными потерями руды в закладочном массиве. Закладка из пустых пород частично поддерживает вмещающие породы от обрушения, но не является искусственной опорой для восприятия горного давления.

Исследования структурных особенностей строения массива месторождения показали, что Дукатский рудный район представляет собой рифтогенную структуру, поперечную к простиранию Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. С целью изучения степени влияния систем трещин на устойчивость обнажений горных пород были проведены наблюдения на нижних горизонтах месторождения. Было выполнено около 700 замеров трещин, по результатам обработки которых, выделено три типа участков на месторождении по степени трещиноватости: слабо трещиноватые 1,4-1,6 тр/м; средне трещиноватые 2,0-6,0 тр/м; сильно трещиноватые при модуле трещиноватости более 6,0 тр/м. Проведенные наблюдения показали, что по мере увеличения площади обнажения и продолжительности стояния пород растет интенсивность раскрытия трещин и возрастает степень отслоений вмещающих пород, процесс отслаивания и вывалов пород интенсифицируется и по мере увеличения глубины работ и горного давления.

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

$$\sigma_B = \sigma_B^{\Gamma} + \sigma_B^T = -\gamma H + \sigma_B^T; \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{пр}}^{\Gamma} + \sigma_{\text{пр}}^T = -\frac{\mu}{1-\mu} \gamma H + \sigma_{\text{пр}}^T, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{п}} = \sigma_{\text{п}}^{\Gamma} + \sigma_{\text{п}}^T = -\frac{\mu}{1-\mu} \gamma H + \sigma_{\text{п}}^T, \quad (3)$$

где $\sigma_B, \sigma_{\text{пр}}, \sigma_{\text{п}}$ – измеренные вертикальные, горизонтальные продольные и поперечные напряжения массива горных пород; МПа; $\sigma_B^{\Gamma}, \sigma_{\text{пр}}^{\Gamma}, \sigma_{\text{п}}^{\Gamma}$ – расчетные гравитационные вертикальные, продольные и поперечные напряжения; МПа; $\sigma_B^T, \sigma_{\text{пр}}^T, \sigma_{\text{п}}^T$ – расчетные тектонические вертикальные, продольные и поперечные напряжения, МПа; γ – объемный вес пород, МН/м³; H – глубина наблюдений, м; μ – коэффициент Пуассона.

Измерение величин напряжений осуществлялось косвенным методом дискования керна измерительных скважин, которые ориентировались в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях на расстоянии 5-8 м по трассе выработок, пересекающих блоки ширины. В таблице 1 представлены наиболее характерные результаты измерений напряжений над зоной очистных работ.

Таблица 1- Результаты измерений исходных напряжений

Номера скважин	Напряжения, МПа		
	Вертикальные, σ_B	Горизонтальные	
		Продольные, $\sigma_{\text{пр}}$	Поперечные, $\sigma_{\text{п}}$
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

Исследования показали, что в зоне очистных работ 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

Для определения предельного пролета обнажения от крепости породы средней глубины разработки произведены расчеты в универсальной программе для 2D анализа напряжений методом конечных элементов «Rocscience RS2». Расчетная схема представлена на рисунке 1.

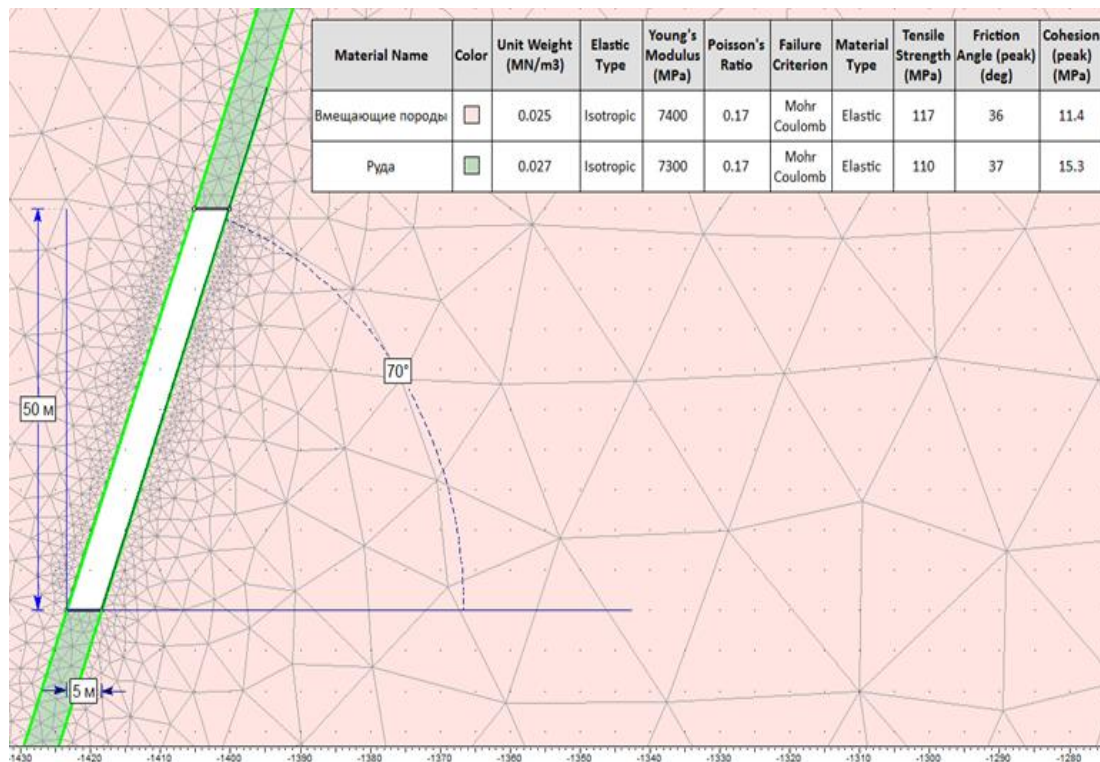


Рисунок 1 - Расчетная схема

Зависимость предельного пролета обнажений (l_0) от средней глубины разработки и коэффициента крепости горных пород определялась на основе полного факторного эксперимента.

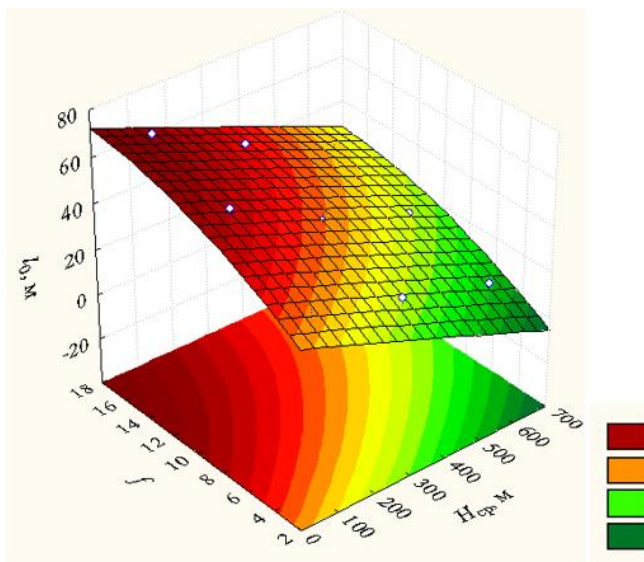


Рисунок 2 - График зависимости предельного пролета обнажений от средней глубины разработки и коэффициента крепости горных пород

В качестве независимых переменных были избраны: x_1 – средняя глубина разработки, H_{cp} , м; x_2 – коэффициент крепости горных пород, f . Результаты установления зависимости предельного пролета обнажений от средней глубины разработки и коэффициента крепости горных пород представлены на рисунке 2.

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:

$$l_o = 40,56 - 15,55H_{cp} - 0,18H_{cp}^2 + 12,78f - 3,88f^2 \quad (4)$$

Моделирование порядка отработки камер, для оценки напряженного состояния массива из породной закладки с параллельной и шахматной схемой расположения бутобетонных целиков, выполнены методом конечных элементов. На основе сопоставления параметров напряжений в моделях проведена оценка влияния схемы расположения бутобетонных целиков на характер распределения и величину напряжений (Таблица 2).

Таблица 2 - Параметры вертикальной (σ_x) и горизонтальной (σ_y) составляющей напряжений в массиве из породной закладки

Расстояние между бутобетонными целиками, м	Схема расположения бутобетонных целиков / параметры напряжений, МПа			
	Параллельная		Шахматная	
	σ_x	σ_y	σ_x	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

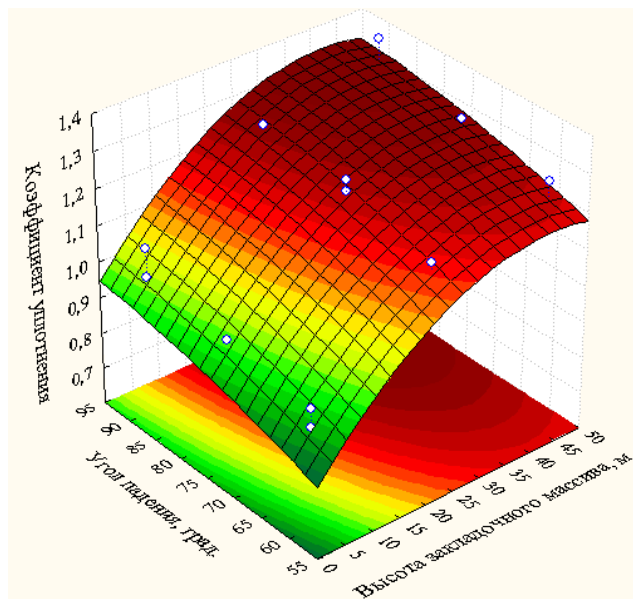
Исследования показали, что напряженное состояние массива из породной закладки существенно различается в зависимости от схемы расположения бутобетонных целиков. Границы изменения величины главных напряжений довольно широки: от 1,3 до 9,5 МПа, при этом наиболее эффективны схемы расположения бутобетонных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

С целью установления технологических параметров закладочного массива на степень уплотнения сухой породной закладки, были проведены исследования в лабораторных условиях. Исследовалось влияние высоты закладочного массива (H_s), ширины очистного пространства (M_o) и угла наклона стенок камеры (α) на величину коэффициента уплотнения сухой породной закладки (K_y). Уравнение регрессии по результатам обработки эксперимента в натуральном масштабе:

$$K_y = 0,343964 + 0,018556H_s + 0,010990\alpha - 0,007014M_o - 0,000221H_s^2 - 0,000053\alpha^2 + 0,000508 M_o^2 - 0,000004H_s \alpha + 0,000043 H_s M_o + 0,000104\alpha M_o \quad (5)$$

Результаты обработки данных представлены на рисунке 3.

а.



б.

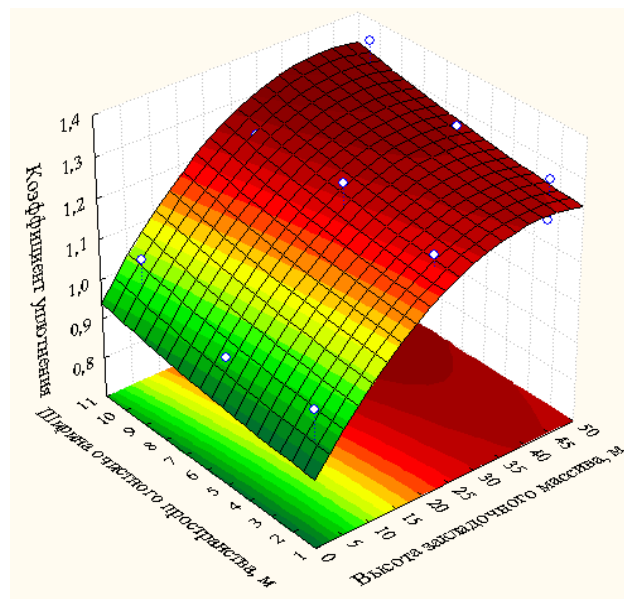


Рисунок 3 - График зависимости коэффициента уплотнения породной закладки: а. - от высоты закладочного массива и угла падения; б – от высоты закладочного массива и ширины очистного пространства

В результате исследований установлено, 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.

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 планируемым к испытаниям принимался в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3 - Расход материалов по составам закладочных смесей

№ п/п	Марка состава	Доля 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

Определение прочности бетона производили в соответствии с ГОСТ 10180-2012. Контрольные образцы кубической формы размерами 300х300х300 мм испытывали на машине ИП-1250-М. Результаты исследований представлены на рисунках 4 и 5.

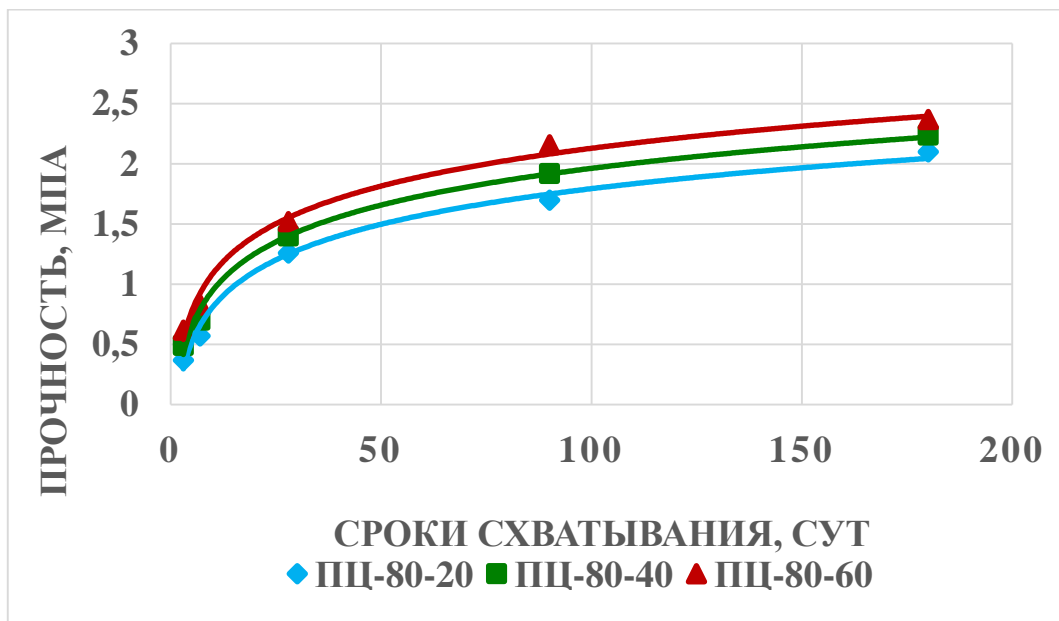


Рисунок 4 - Влияние крупности пород на прочность бутобетонной смеси: при расходе цемента 80 кг/м³ и доле крупной фракции заполнителя +50-200 мм 20,40 и 60% соответственно.

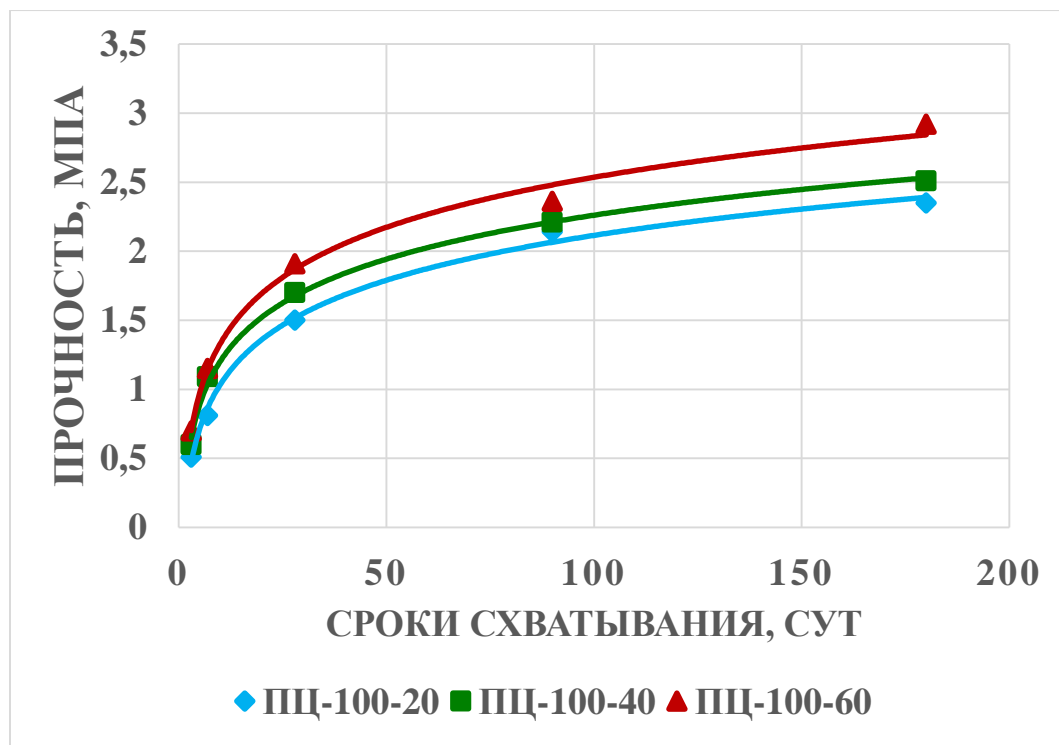


Рисунок 5 - Влияние крупности пород на прочность бутобетонной смеси: при расходе цемента 100 кг/м³ и доле крупной фракции заполнителя +50-200 мм 20,40 и 60% соответственно.

В результате обработки экспериментальных данных получены логарифмические зависимости влияния крупности пород на прочность смеси: при расходе цемента 80 кг/м³

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 60\%) = 0,4529\ln(t) + 0,0444 \quad R^2 = 0,917 \quad (6)$$

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 40\%) = 0,4409\ln(t) - 0,067 \quad R^2 = 0,987 \quad (7)$$

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 20\%) = 0,4274\ln(t) - 0,1735 \quad R^2 = 0,934 \quad (8)$$

при расходе цемента 100 кг/м³

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 60\%) = 0,5229\ln(t) + 0,1274 \quad R^2 = 0,967 \quad (9)$$

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 40\%) = 0,4594\ln(t) + 0,1457 \quad R^2 = 0,914 \quad (10)$$

$$\sigma_{сж.} (+50-200 \text{ мм } 20\%) = 0,4692\ln(t) - 0,0461 \quad R^2 = 0,959 \quad (11)$$

где: $\sigma_{сж.}$ - прочность образца, МПа; t - время, сутки, R^2 - коэффициент достоверности аппроксимации.

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

Исследования закономерностей взаимодействия разрушенных геоматериалов и рудовмещающих массивов позволили разработать технологические решения, обеспечивающие необходимые поддерживающие свойства комбинированных бетонобетонных и породных закладочных смесей. Сущность разработанных вариантов систем разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства состоит в формировании бетонобетонных закладочных массивов, для увеличения несущей способности всей горнотехнической конструкции, в шахматном порядке и закладки оставшейся части выработанного пространства камер скальными породами от проходческих работ.

Отработку запасов в пределах этажа ведут подэтажами в восходящем порядке, в отступающем порядке от одного фланга блока к другому. Выемку руды производят секциями путем взрывания скважин диаметром 64 мм. Вслед за очистной отбойкой с отставанием в 20 м производят закладку выработанного пространства из разведочного штрека (Рисунок 6). В качестве бетонобетонной закладки применяют смесь пустых пород от проходки горных выработок с водным раствором цемента. Количество материала на 1 м³ бетонобетонной смеси

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

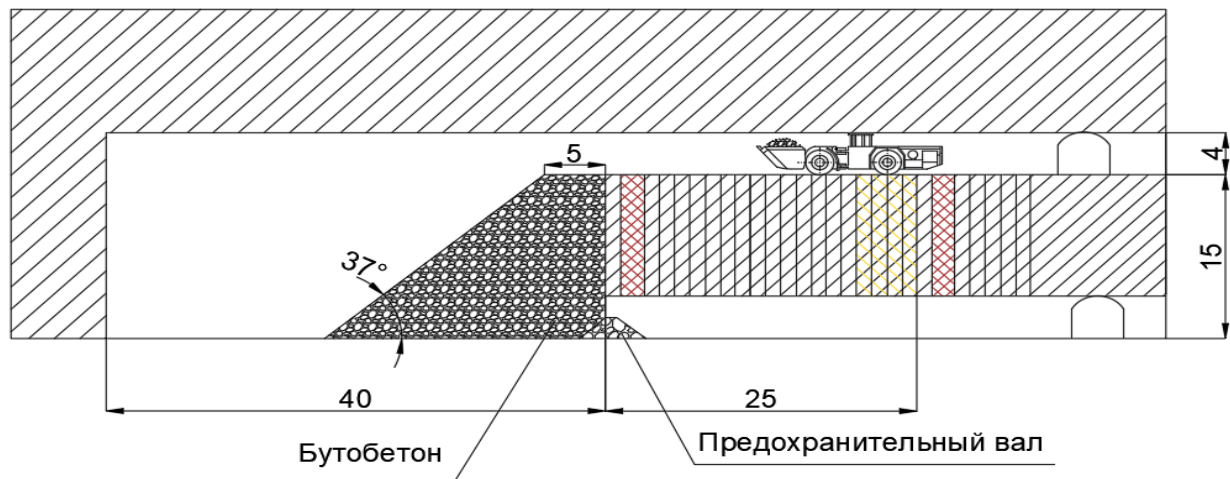


Рисунок 6 - Схема формирования бутобетонного целика

Готовая смесь транспортируется в выработанное пространство подэтажа, согласно схемы закладки. Чтобы исключить «выдавливание» изолирующих перемычек, бутобетон подают на перемычку в 4 приема, выдерживая время между подачей слоя бутобетона не менее 10 часов. После формирования бутобетонных целиков производят закладку выработанного пространства пустой породой (Рисунок 7).

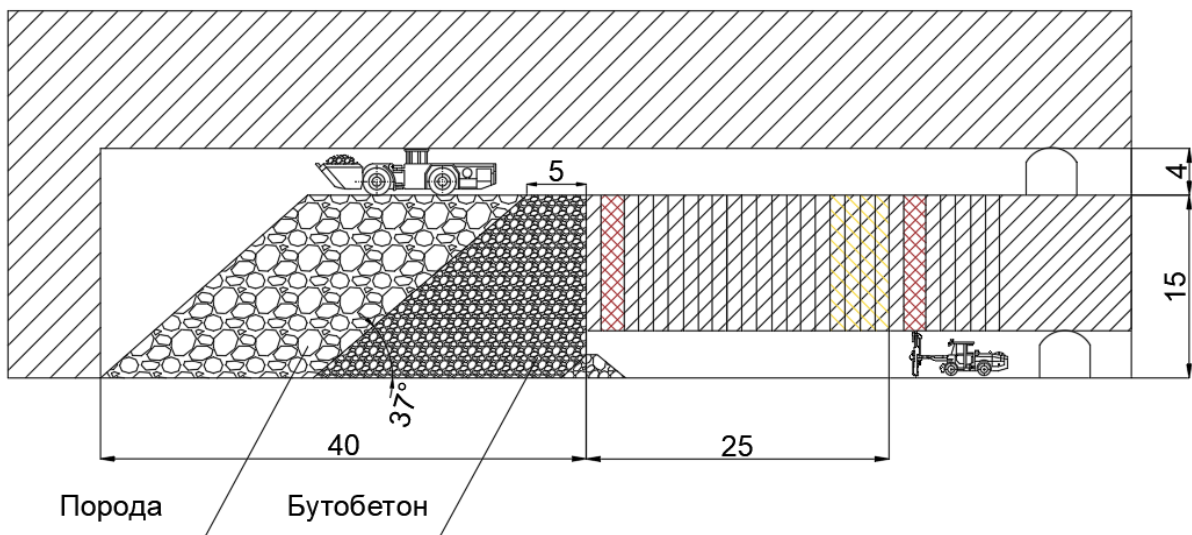


Рисунок 7 – Схема закладки выработанного пространства породой

Закладочные работы сухой закладкой производят путем наращивания и выравнивания породного отвала при помощи погрузочно-доставочной машины, до необходимого расстояния от линии отбойки. Далее все процессы повторяют в указанной последовательности. В таблице 4 приведены рекомендуемые

параметры разработанного варианта системы разработки.

Таблица 4 - Параметры подэтажно-камерной системы разработки

Наименование показателей	Значение		
	Мощность рудного тела, м	2	6
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 камеры второй очереди, м	20–25	15–20	10–15
Нормативная прочность бутобетонной закладки, МПа	≥ 1,5	≥ 2	≥ 2,5

С целью проверки в производственных условиях эффективности применения рекомендуемой технологии разработки был выбран участок по жиле 19а расположенный в северной части Дукатского рудного поля на горизонте - 830 м, с мощностью рудного тела 1,5-3 м. В результате отработки опытного блока потери руды при добыче составили 4,5 %, разубоживание руды - 13,2 %, производительность труда на очистных работах достигала до 12 м³/чел. смену.

Эффективность разработанных в диссертационной работе технологических решений определяем, путем сопоставления приведенных затрат по общепринятой методике. Результаты оценки эффективности использования базовой и рекомендуемой технологии разработки приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Сравнительные показатели систем разработки

Наименование показателей	Системы разработки	
	Подэтажно-камерная с разнопрочной закладкой	С подэтажной отбойкой руды
Содержание условного металла в балансовых запасах, %	0,03	0,03
Разубоживание руды, %	13,2	30,9
Потери руды при добыче, %	4,5	10,1
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 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.

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 $l_0 = 40,56 - 15,55 H_{cp} - 0,18 H_{cp}^2 + 12,78f - 3,88f^2$.

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.

10. Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволяют сформулировать рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации: установление влияния параметров бутобетонных целиков на устойчивость массива горных пород; совершенствование технологии формирования комбинированного закладочного массива из твердеющей бутобетонной закладки и сыпучих скальных пород; обоснование оптимальной высоты подэтажа при подэтажно-камерных системах разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

в прочих изданиях

7. 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.

8. 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.

9. Гарифулина И.Ю. Влияние геометрических параметров отбиваемого 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. В 3-х частях. Автономная некоммерческая организация «Национальный исследовательский институт дополнительного профессионального образования». – Москва.– 2022. – С. 201-203.

10. 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.

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

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

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

18. 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. – 2020. – С. 181-185.

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. – 2020. – С. 185-190.

20. 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. – С. 56-62.

21. 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.

22. Гарифулина И.Ю. Отработка маломощных участков месторождения поэтапно-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.

23. 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.

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

25. Гарифулина И.Ю. Процессы очистной выемки при подземной разработке месторождений: учебное пособие / 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.