



ГАДЖИЕВА ЛУИЗА АБДУ-САМАДОВНА

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ИЗОЛЯЦИИ
ПОДЗЕМНЫХ КАМЕР ДЛЯ СЕРНОКИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
РУД ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные
машины»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук в Отделе теории проектирования и геотехнологий комплексного освоения недр.

Научный руководитель:

Радченко Дмитрий Николаевич – доцент, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Отдела теории проектирования геотехнологий комплексного освоения недр, ИПКОН РАН, г. Москва.

Официальные оппоненты:

Кузьмин Евгений Викторович, профессор, доктор технических наук, главный специалист, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», г. Москва.

Хмелевский Максим Викторович, кандидат технических наук, заместитель директора по учебной и производственной практике, Технический колледж им. С.И. Мосина федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

Защита диссертации состоится «16» мая 2024 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.096.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПКОН РАН:
<http://ипконран.рф>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



В.С. Федотенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Сохраняющаяся мировая тенденция экстенсивного недропользования, переход на добычу руд в условиях сверхглубин, снижение содержания ценных компонентов в рудах определяют необходимость изыскания новых высокотехнологичных и малоотходных технологий добычи, обеспечивающих полноту и комплексность освоения недр. В значительной мере изложенным требованиям отвечает технология шахтного подземного выщелачивания. Комбинированная геотехнология подземной добычи обогатимых руд и выщелачивания некондиционных, позволяет в значительной степени увеличить минерально-сырьевую базу обрабатываемых и перспективных месторождений, снизить эксплуатационные затраты на получение единицы товарной продукции, а также негативное воздействие на окружающую среду, ввиду отсутствия складирования отходов на поверхности. Экологичность технологии шахтного подземного выщелачивания обеспечивается, в первую очередь, обоснованным выбором параметров блоков выщелачивания в соответствии с горно- и гидрогеологическими условиями, а также эффективной изоляцией рабочего пространства блоков выщелачивания с целью недопущения миграции рабочих растворов. В связи с высокой агрессивностью выщелачивающих растворов к бетонам, высокой стоимостью кислотостойких цементов и иных добавок, перспективной задачей является изыскание геотехнологических решений по возведению изолирующих конструкций подземных блоков выщелачивания на основе обоснованного выбора новых доступных материалов, преимущественно, на основе отходов производства – пород от проходки выработок, зол ТЭЦ, отходов гидрометаллургического производства. Это определило выбор направления исследований – изучение параметров технологии изоляции подземных камер для последующего выщелачивания в них руд цветных металлов на базе формирования горнотехнических конструкций на основе новых геополимерных материалов.

Цель работы - обоснование параметров технологии изоляции камер подземного сернокислотного выщелачивания руд цветных металлов и состава геополимерных материалов, используемых при формировании изолирующих конструкций, обеспечивающих повышение полноты освоения недр и выполнение требований промышленной и экологической безопасности.

Идея работы - повышение полноты освоения недр, выполнение требований промышленной и экологической безопасности комбинированной технологии подземной добычи руд и выщелачивания достигается путем изоляции камер выщелачивания материалами с требуемыми прочностными, гидро-, термо-, кислотостойкими свойствами на основе соответствующих геополимерных материалов из отходов производства.

Достижение поставленной цели и реализация идеи связаны с решением следующих научно-практических задач:

- анализ современных подходов к проектированию и реализации геотехнологий, предусматривающих сочетание подземной добычи руд и выщелачивания;

- поиск путей и обоснование параметров технологии изоляции камер для подземного выщелачивания в них руд цветных металлов на основе научно обоснованного выбора геополимерных материалов, характеризующихся требуемыми прочностными, гидро-, термо-, кислотостойкими свойствами;

- исследование закономерностей формирования технологических свойств геополимеров на основе отходов производства и обоснование последовательности технологических процессов, обеспечивающих достижение требуемых свойств;

- обоснование параметров технологии формирования изолирующих конструкций камер для сернокислотного выщелачивания в них руд цветных металлов с обеспечением требований промышленной и экологической безопасности;

- разработка технологических рекомендаций, оценка риска технологии шахтного подземного выщелачивания с разработкой мероприятий, компенсирующих повышенный риск реализации физико-химической геотехнологии.

Объект исследования: технология формирования изолирующих конструкций камер выщелачивания для сернокислотного выщелачивания в них руд цветных металлов.

Предмет исследования: параметры технологии формирования изолирующих конструкций камер выщелачивания, состав и свойства геополимерных материалов для ее реализации.

Методы исследований:

В ходе выполнения работы проведен анализ состава и условий залегания вмещающих пород медно-колчеданных, медно-никелевых месторождений Южного Урала, свинцово-цинковых Северного Кавказа, оптико-минералогические исследования с использованием микроскопа OlympusBX 51 с программным комплексом «Минерал С7» для анализа изображений на основе методических рекомендаций НСОММИ ФНМЦ «ВИМС». Минеральный состав вмещающих пород определялся методом порошковой рентгеновской дифрактометрии с использованием дифрактометра XRD-6000 («SHIMADZU») с Cu-анодом. Количественный химический анализ осуществлялся с использованием фотометрических, титриметрических и гравиметрических методов по стандартным нормативным методикам НСАМ ФНМЦ «ВИМС». Прочность материала на одноосное сжатие определялись согласно ГОСТ 10180—2012 с использованием лабораторного гидравлического пресса Instron с программным обеспечением Instron Bluehill Universal; по результатам испытания рассчитывался модуль деформации при одноосном сжатии. Химическая стойкость оценивалась путем измерения прочности на одноосное сжатие до и после погружения образцов в агрессивные среды в динамике, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58896-2020, водопоглощение по ГОСТ 12730.3-2020. Термостойкость определялась сопоставимыми испытаниями образцов на одноосное сжатие до и после термического воздействия до 600⁰С. Расчет фактора риска реализации технологии и разработка компенсирующих мероприятий выполнены с использованием методологии многоуровневой оценки риска.

Положения, выносимые на защиту.

1. Повышение полноты и комплексности освоения месторождений руд цветных металлов обеспечивается созданием в подземном руднике камер выщелачивания с формированием в их основании изолирующих конструкций, характеризующихся требуемыми прочностью, термо- и кислотостойкостью, низким водопоглощением, состоящих из вмещающих пород месторождений с добавлением алюмосиликатных материалов и жидкой фазы, представленной водным щелочным продуктом из силикатов натрия и калия.

2. Формирование изолирующих конструкций в основании подземных камер выщелачивания, характеризующихся набором прочности на одноосное сжатие выше 20 МПа, низким водопоглощением, устойчивостью в сернокислом растворе концентрацией до 10% с сохранением начальной массы и прочности и термостойкостью при нагреве до 600⁰С обеспечивается технологией приготовления в подземном руднике геополимерной смеси на основе вмещающих пород месторождений, расход компонентов которой определяется, исходя из содержания аморфных оксидов кремния и алюминия во вмещающих породах.

3. При комбинированной геотехнологии подземной добычи руд и выщелачивания выбор направлений использования вмещающих пород, в том числе, с участков проходки горных выработок, должен осуществляться после оценки содержания в них аморфной фазы кремния и алюминия в свете перспектив реализации технологии изоляции подземных камер для выщелачивания руд цветных металлов.

4. Технология формирования изолирующих конструкций в основании камер выщелачивания должна базироваться на применении подземных передвижных закладочных комплексов для подготовки пород с высоким содержанием аморфной фазы требуемой крупности, шихтовки твердых компонентов, перемешивания с водным щелочным продуктом из силикатов натрия и калия с протеканием реакции геополимеризации, а также подачи геополимерной смеси с требуемыми реологическими характеристиками в изолируемую камеру.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена представительным объемом исходных данных, достоверной сходимостью теоретических расчетов состава геополимерных материалов и результатов лабораторных исследований, использованием современного оборудования и апробированных методик, получением в лабораторных условиях нового геополимерного материала, сходимостью результатов лабораторных исследований.

Научную новизну работы составляет разработанная методика выбора параметров технологии, включая материалы для изоляции камер выщелачивания, отличающаяся тем, что выбор направлений использования вмещающих пород месторождений, преимущественно, пород от проходки выработок, сопровождается оценкой содержания в них аморфной фазы кремния и алюминия в свете перспектив реализации технологии выщелачивания руд цветных металлов. Получены новые знания о технологических свойствах геополимеров на основе вмещающих пород, представленных дацитами в свете обеспечения условий выщелачивания руд в подземных камерах.

Практическая значимость работы состоит в разработке технологии формирования изолирующих конструкций в основании подземных камер для

сернокислотного выщелачивания в них руд цветных металлов с выполнением требований промышленной и экологической безопасности.

Реализация результатов. Результаты исследований использованы при подготовке отчетов по программе базового бюджетного финансирования ИПКОН РАН «Разработка научно-методических основ устойчивого развития горнотехнических систем на базе установления закономерностей взаимодействия природных и инновационных технологических процессов в условиях интенсивного комплексного освоения недр Земли» в 2018-2022 гг. и вошли в перечень важнейших результатов ИПКОН РАН за 2023 г.

Апробация работы. Основные результаты, положения и выводы докладывались и обсуждались на XXIX Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2017); на Юбилейной научно-практической конференции, посвященной 100-летию РГГРУ им. С. Орджоникидзе «Новое в геологическом изучении недр» (2018); 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS (Кемерово, 2018) на Международном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2021, 2022 и 2023); на X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» (Магнитогорск, 2019); на Научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (Севастополь, 2019); на 14-й Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2019); на Международной научной школе академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (Москва, 2020 и 2022); на II Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы. XXI век» (Челябинск, 2020), на 15 Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2021); на XI Международной конференции «Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр» (Магнитогорск, 2021); на III Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы. XXI век: Устойчивое развитие» (Челябинск, 2022); на IV Международной научно-практической конференции «Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ» (Магнитогорск, 2022); на XII Международной конференции «Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых» (Магнитогорск, 2023).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 16 работах, 6 из которых – в изданиях, рекомендуемых ВАК, включая 1 патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора заключается в формулировании задач исследований, соответствующих поставленной цели и идее работы, разработке программы и методик исследований, включая методики оценки пригодности вмещающих пород месторождения в качестве компонентов геополимерных смесей и получаемых на их основе искусственных массивов для целей подземного выщелачивания, разработке состава геополимерной смеси на основе дацитов, обосновании параметров конструкций оснований подземных камер для сернокислотного выщелачивания руд цветных металлов.

Объем и структура работы. Диссертация представлена на 168 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения и содержит 55 рисунков, 29 таблиц, список источников из 147 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ современных технологий шахтного (блочного) подземного выщелачивания с выявлением достоинств и недостатков этой прогрессивной технологии. Установлены особенности подготовки блоков выщелачивания с определением ключевых параметров технологий их изоляции для снижения риска миграции растворов за пределы участков выщелачивания. Оценены перспективы развития комбинированных геотехнологий, включающих выщелачивание руд при комплексном освоении рудных месторождений, рассмотрены конструктивные особенности камер выщелачивания, попутно формируемых при добыче руд камерными системами разработки с закладкой выработанного пространства. Выявлена крайне низкая изученность вопроса изоляции таких камер для предупреждения утечек агрессивных растворов. Проанализированы и выделены наиболее перспективные идеи в области создания новых материалов и конструкций на основе формирования массивов с заданными свойствами.

Теоретические основы комбинации технологий подземной добычи руд и выщелачивания заложены ведущими учеными СССР и США в свете развития технологий разработки месторождений меди и урана, а затем руд цветных и благородных металлов. В нашей стране значительный вклад в развитие научных основ проектирования комбинированной геотехнологии, сочетающей процессы открытой, подземной добычи руд и выщелачивания внесли академики РАН Н.П. Лаверов, Б.Н. Ласкорин, К.Н. Трубецкой, В.А. Чантурия, член-корреспондент РАН Д.Р. Каплунов, доктора наук В.Н. Калмыков, М.В. Рыльникова, И.В. Шадрюнова. Совершенствованием научно-методических основ подземного блочного выщелачивания скальных руд посвящены труды докторов наук М.И. Фазлуллина, В.Ж. Аренса, Б.Д. Халезова, В.Г. Иванова, Е.Н. Камнева, Л.И. Лунева, И.Е. Рудакова, В.И. Голика, К.К. Хулелидзе, А.Е. Воробьева, О.З. Габараева, К.Г. Каргинова и других. За рубежом вопросами шахтного подземного выщелачивания занимались такие ученые, как L. Sinclair, J. Thompson, M. Rojar, F.D. Djahanguiri, J.F. Abel, G. Gorman, G. J. Olson, и другие.

Анализ систем подземного выщелачивания и конструкций блоков позволил выявить ряд ограничений, связанных с недостаточной проработанностью вопросов изоляции подземных камер выщелачивания, решение которых в значительной мере будет способствовать расширению области применения технологии, повышению ее экологической безопасности и экономической эффективности. До настоящего времени применение технологии шахтного подземного выщелачивания связано, в первую очередь, с высокой экологической опасностью, ввиду риска миграции растворов в окружающую среду, а также низкой устойчивостью изолирующих конструкций в основаниях камер выщелачивания, что подтверждено опытом эксплуатации участков подземного блочного выщелачивания на Садонском, Блявинском, Дегтярском, Стрельцовском и других месторождениях. Другой характерной особенностью традиционно применяемой в мировой практике технологии подземного блочного выщелачивания является высокий уровень

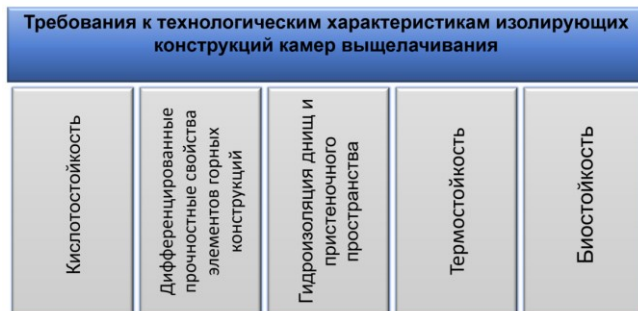


Рисунок 2 - Требования к свойствам изолирующих материалов для создания камер выщелачивания

В соответствии с идеей работы, в ходе реализации первого этапа программы исследований, установлено, что наиболее перспективными для использования в составе геополимерных материалов вмещающими породами на медно-колчеданных месторождениях Южного Урала, являются дациты, туфы дацитов и серицит-кварцевые метасоматиты. В результате отбора представительных проб и проведения оптико-минералогических исследований эти трех разновидностей пород установлено, что дациты характеризуются микрофельзитовой структурой, основная масса которого представлена материалом преимущественно хлорит-полевошпат-кварцевого состава, тогда как образцы серицит-кварцевых метасоматитов и туфов дацитов характеризуются преимущественно микрокристаллической структурой (рис. 3).

Наличие в дацитах аморфной фазы в наибольшем количестве подтверждено результатами проведенного дифрактометрического анализа. Сравнительным анализом дифрактограмм, представленных на рисунке 4, установлено наличие наибольшего нелинейного фона, характеризующего аморфную фазу в дацитах (рис. 4, а). Образцы серицит-кварцевых метасоматитов и туфов дацитов более окристаллизованы и однородны по параметрам кристаллической решетки (рис. 4, б, в). В ходе количественного анализа фаз в образцах установлено, что дациты сложены преимущественно такими минералами, как кварц и калиево-полевоый шпат в равном количестве - 24%, плагиоклаз - 22% и хлорит – 15%. Содержание аморфного кремнезема в составе дацитов составляет 11%.

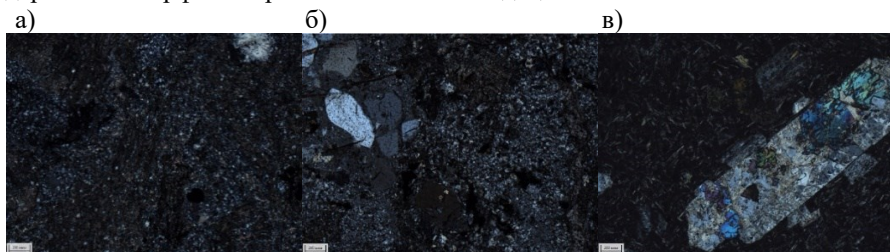


Рисунок 3 - Изображения шлифов горных пород в проходящем свете, свидетельствующие о наличии в дацитах микрофельзитовой структуры: а – дациты; б – серицит-кварцевые метасоматиты; в – туфы дацитов

I	Возведение искусственных массивов	Возведение изолирующего днища	Возведение камеры н
		Возведение непроницаемых конструкций в смежных блоках	Создание конструк
		Возведение изолирующих потолочин	Заблаговр конструк
II	Формирование защитных оболочек	Возведение защитного слоя в основании камеры	Создание днище тр
		Инфузионное возведение маломощных конструкций для защиты смежных блоков	Заблаговр стенки на
		Набрызг изолирующих материалов на смежные конструкции	Обеспече в камере
III	Создание завес	Сплошная завеса	Создание обеспечи
		Барражные скважины	Создание пробурен материал
IV	Тампонаж	Тампонаж локальных водопроводящих трещин	Нагнетан шурфы заполнен
		Тампонаж зон нарушенности массивов	Нагнетан шурфы заполнен
V	Комбинированный	Сочетание двух и более способов изоляции, определяемых геологическими условиями участка месторождения выщелачивания	

Установлено, что серицит-кварцевые метасоматиты представлены в большей степени кварцем и слюдой в количестве 42% и 32%, соответственно. Туфы дацитов характеризуются наибольшим процентным содержанием в составе породы кварца – 46%, также в составе присутствуют слюда – 32% и в незначительных количествах хлорит, кальцит и пирит. Аморфный SiO_2 в составе серицит-кварцевых метасоматитов и туфов дацитов содержится в меньшем количестве, чем в дацитах, и составляет 7% и 6%, соответственно.

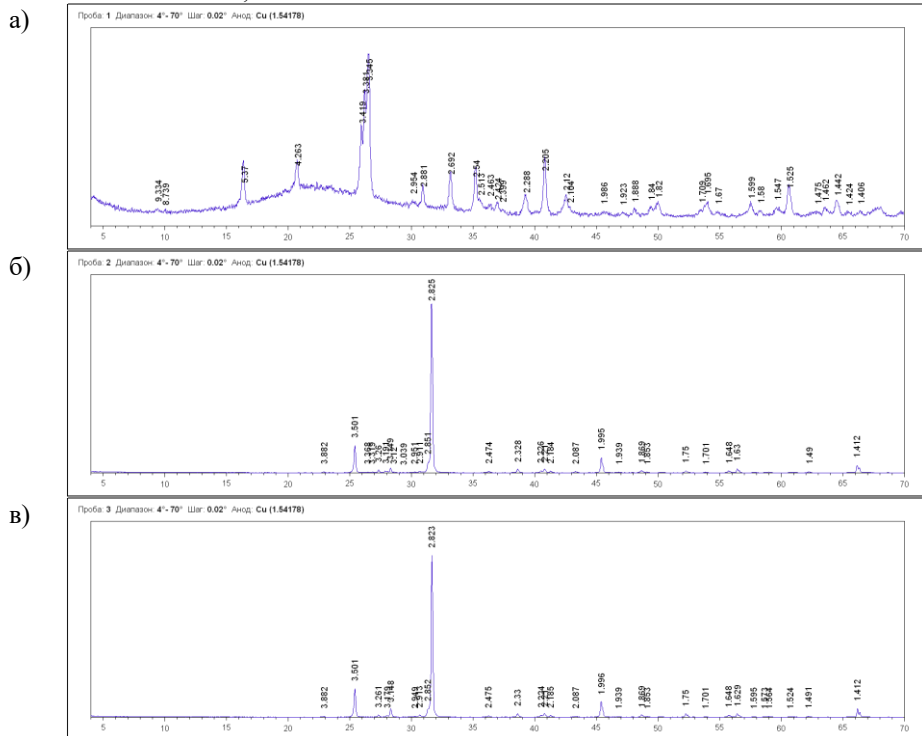


Рисунок 4 – Дифрактограммы проб вмещающих пород: 1 – дацитов, 2 – серицит-кварцевых метасоматитов, 3 – туфов дацитов

Установлено, что несмотря на достаточно высокое содержание в дацитах аморфной фазы, ее количества все же недостаточно для формирования на их основе геополимеров с соблюдением следующих пропорций:

- мольное соотношение в смеси $\text{Na}_2\text{O}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 1$;
- мольное соотношение в смеси $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3 = 2$.

Найдены пути повышения требуемых значений содержания аморфной фазы. Совместно со специалистами компании RENCA, первым в России производителем изделий из геополимерных материалов, выполнен подбор оптимальной высокореактивной добавки - золы уноса с высоким содержанием аморфной фазы – 63%. Количество компонентов смеси, содержащей дациты, золу-уноса, гидроксид

натрия и техническое Na-жидкое стекло, рассчитывалось, исходя из приведенных выше пропорций по формулам:

$$\frac{x \times a\% \text{ Na}_2\text{O} \times 101.96 \text{ г/моль Al}_2\text{O}_3}{y \times 61.98 \text{ г/моль Na}_2\text{O} \times b\% \text{ Al}_2\text{O}_3} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{101.96 \text{ г/моль Al}_2\text{O}_3 (x \times d\% \text{ SiO}_2 + y \times e\% \text{ SiO}_2 + z \times f\% \text{ SiO}_2)}{94.19 \text{ г/моль SiO}_2 (y \times b\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + z \times c\% \text{ Al}_2\text{O}_3)} = 2, \quad (2)$$

где x – масса силикатного раствора, г; y – масса золы уноса, г; z – масса вмещающих пород, г; a – содержание Na_2O в растворе, %; b – содержание Al_2O_3 в золе уноса, %; c – содержание Al_2O_3 во вмещающих породах, %; d – содержание SiO_2 в растворе, %; e – содержание SiO_2 в золе, %; f – содержание SiO_2 во вмещающих породах, %.

Расчетным путем определен оптимальный состав геополимерной смеси для создания изолирующих конструкций на основе дацитов, способный обеспечить требуемые для технологии изоляции камер выщелачивания свойства, это: дациты - 1457 кг/м³, зола - 350 кг/м³, жидкий компонент - 709 кг/м³. Определено, что геополимер такого состава характеризуется высокими прочностными характеристиками. Пределы прочности на одноосное сжатие для полученных образцов на 7, 14, 30, 60 и 90 сутки составили 4, 8, 16, 21,5 и 22 МПа, соответственно (рис.5, а).

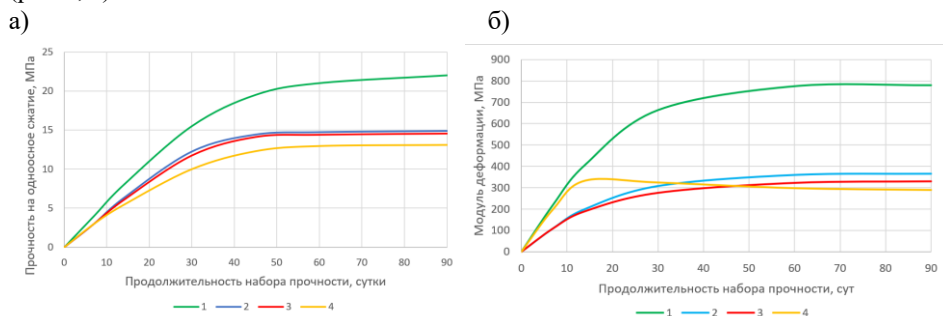


Рисунок 5 - Динамика набора прочности образцами геополимера на основе дацитов (а) и средние значения модуля деформации при одноосном сжатии (б): 1 – геополимерный массив; образцы с содержанием крупнокусковой фракции: 2 – 10%; 3 – 25%; 4 – 50%

Установлено, что добавление крупнокусковой фракции оказывает значимое влияние на прочностные и деформационные характеристики, требуемые по фактору устойчивости днища камеры при реализации технологии выщелачивания в камерах (рис.5, б). Вместе с тем, добавление до 50% крупнокусковой фракции от объема позволяет получить высокие прочностные характеристики формируемых конструкций, свыше 13 МПа и модуль деформации, свыше 290 МПа, что достаточно для формирования и эксплуатации днищ камер из геополимеров, а установленная возможность замещения геополимера крупнокусковой фракцией указывает на перспективы снижения себестоимости составов при изоляции камер методами I и III (см.табл.1).

Для оценки риска разрушения изолирующих конструкций в основании камер выщелачивания под воздействием агрессивных растворов выполнено исследование убыли массы геополимеров исследуемого состава в условиях выдержки в 10%-ом растворе серной кислоты путем полного погружения в него на 14, 30 и 60 суток с постоянным контролем уровня кислотности среды. Установлено, что образцы характеризуются незначительным снижением массы, не превышающим во всех случаях 0,7%.

Прочность на одноосное сжатие образцов в возрасте 60 суток, погруженных в 10% раствор H_2SO_4 на 30 суток, составила до 22,4 МПа и во всех сериях опытов была сопоставима со значениями для образцов, не подверженных воздействию агрессивных сред (рис. 6).



Рисунок 6 - Кривые нагружения образцов: 1 – не подверженного воздействию H_2SO_4 ; после выдержки в H_2SO_4 в течение: 2 – 30 суток; 3 – 60 суток; 4 – 90 суток

Изучение влияния раствора серной кислоты на гидроизоляционные свойства геополимеров, производилось методом сравнения водонасыщения образцов, предварительно выдержанных в растворах серной кислоты, концентрацией 10% продолжительностью до 90 суток и не подверженных влиянию сернокислых растворов. После сернокислотной обработки в течение 30, 60 и 90 сут. высушивались до постоянной массы m_1 и погружались в водную среду на 24 часа. После выдержки в воде образцы обрабатывались с удалением избытков влаги и взвешивались с установлением значения m_2 (табл. 2). Значения водопоглощения рассчитывались по ГОСТ12730.3-2020.

Таблица 2. Усредненные значения водонасыщения образцов в динамике выдержки в водной среде

№п/п	Продолжительность выдержки в растворе H_2SO_4 , сут.	Средние значения, г		Водопоглощение, %
		m_1	m_2	
1	Без выдержки	606,35	611,24	0,8
2	30	589,75	595,14	0,91
3	60	552,85	558,39	0,99
4	90	575,56	579,89	0,75

Исследованиями доказано, что даже при выдержке образцов в 10% серной кислоте в динамическом режиме в течение 30, 60, 90 сут. значительного снижения их прочности не происходит, а водонасыщение составляет менее 1%, что говорит о высокой кислотостойкости и пригодности таких материалов для изоляции конструкций камер выщелачивания.

Обжигом образцов кубической формы с размером грани 70 мм после набора прочности в течение 60 сут. при температурах до 600⁰С в заданном плавном режиме нагрева печи доказано, что при термическом воздействии снижения значений предела прочности на одноосное сжатие не происходит. В среднем, они равны значениям для образцов, не подверженных воздействию высоких температур, и составляют 22 МПа. Более того, анализ характера разрушения образцов не подверженных термообработке и после обжига свидетельствует об упрочняющем эффекте термического воздействия (рис. 7). В целом доказано, что высокотемпературный обжиг не приводит к снижению прочности материала, подтверждая его термостойкость, что может быть важным фактором, например, при выщелачивании высокосульфидных руд, склонных к самовозгоранию.

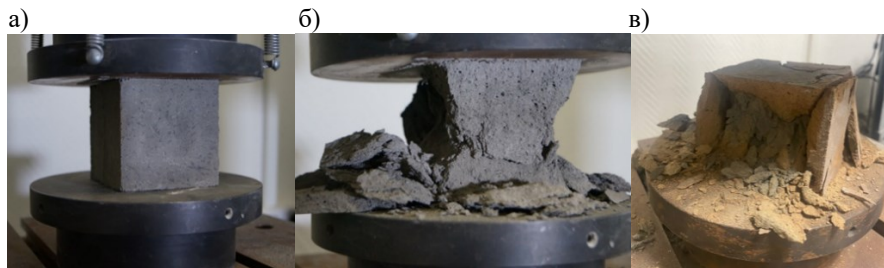


Рисунок 7 – Исходный образец геополимера в возрасте 60 сут. (а) и характер его разрушения при одноосном сжатии без термической обработки (б) и после обжига при температуре 600⁰С

На основании выполненных исследований сформулировано второе положение, выносимое на защиту. Установленный факт и обоснованная возможность использования пород от проходки горных выработок с высоким содержанием аморфного кремнезема для производства геополимеров позволил разработать алгоритм обоснования параметров технологии изоляции камер выщелачивания.

Анализ реализуемости представленного на рис. 8 алгоритма позволяет утверждать, что при комбинированной геотехнологии подземной добычи руд и выщелачивания выбор направлений использования вмещающих пород, в том числе, с участков проходки горных выработок, должен осуществляться после оценки содержания в них аморфной фазы кремния и алюминия в свете перспектив реализации технологии изоляции подземных камер для выщелачивания руд цветных металлов.

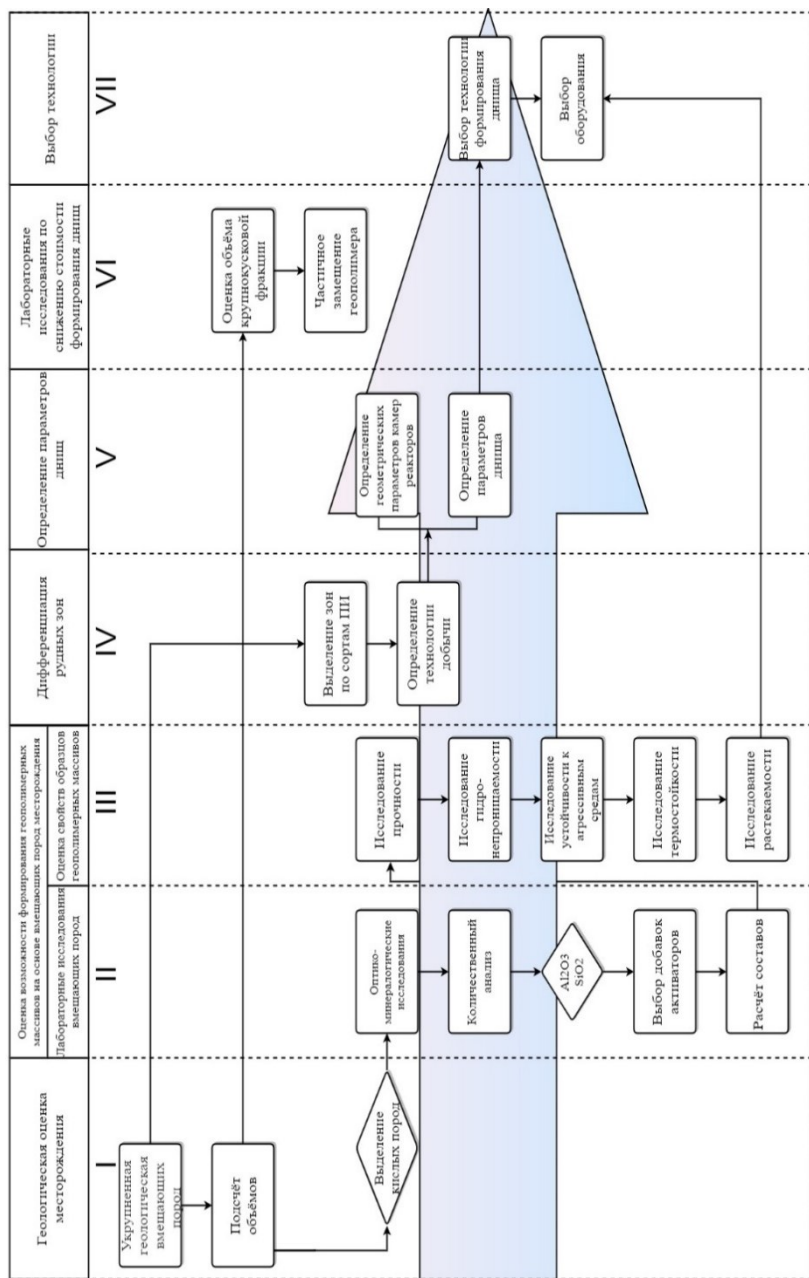


Рисунок 8 – Алгоритм обоснования параметров технологии изоляции камер для сернокислотного выщелачивания руд цветных металлов

Типовой вариант технологии создания в камерах второй очереди изолированных камер выщелачивания представлен на рис. 9, заключающейся в выемке руды, формировании стенок и дна камеры на основе твердеющей смеси, загрузке минерального сырья, бурении в возведенном днище и обсадке скважин для подачи воздуха и вееров скважин для отвода продуктивного раствора, объединенных в единую сеть.

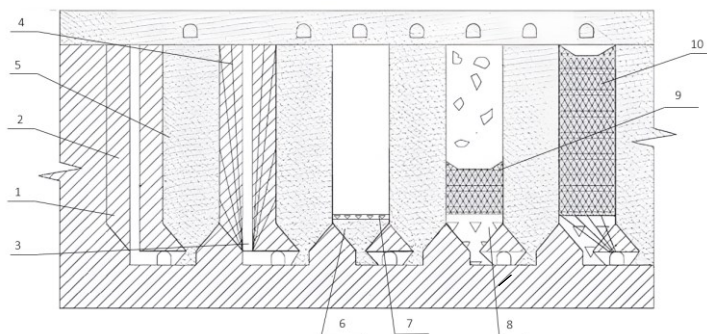


Рисунок 9 – Последовательность формирования камер выщелачивания с различными вариантами оформления изолирующих конструкций в их основании. 1 – рудный массив; 2 – отрезной восстающий; 3 – отрезная щель; 4 – веера скважин; 5 – закладочный массив; 6 – днище на основе закладочного материала, изолированного геополимером 7 (см. кл. II, группа 1, табл.1); 8 – изолирующая конструкция на основе геополимера (см. кл. I, группа 1, табл.1); 9 – дробленая рудная масса, загружаемая в камеру; 10 – камера, загруженная рудной массой для выщелачивания с днищем, обуренным технологическими скважинами

Технология формирования камер подземного выщелачивания с использованием для изоляции стенок и дна вмещающих пород в качестве исходных материалов для геополимерных смесей базируется на частичном переносе технологических процессов их приготовления в подземное пространство рудника для исключения перемещения больших объемов горной массы на поверхность. Качественные и количественные показатели технологического процесса, представленные на рис. 10 определены по результатам расчета баланса технологической схемы.

Применение передвижных закладочных комплексов в составе виброщековой дробилки, конусной инерционной дробилки, питателей, растаривателей, шнековых конвейеров и смесителей обеспечивает условия для мобильного формирования изолирующих оснований камер подземного выщелачивания, обеспечивая подготовку вмещающих пород до требуемого гранулометрического состава, шихтовку твердых компонентов, перемешивание с водным щелочным продуктом из силикатов натрия и калия с обеспечением протекания реакции геополимеризации, а также подачу геополимера с требуемыми реологическими характеристиками в камеру.

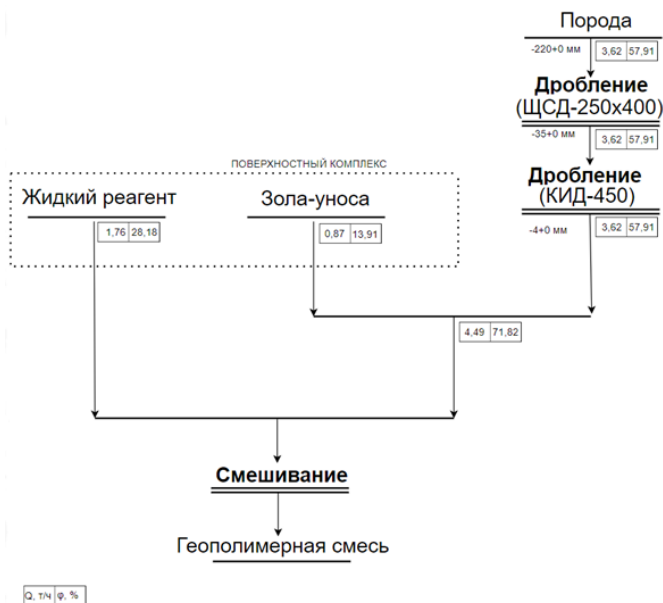


Рисунок 10 – Качественно-количественная схема технологического процесса: Q - производительность; γ - выход продукта

Результаты выполненной углубленной оценки риска ключевых опасностей, связанных с реализацией технологии подземного блочного выщелачивания, выполненного в соответствии с методологией многоуровневой оценки риска, свидетельствуют о том, что для основных сценариев аварий, включающих миграцию агрессивных растворов за пределы контура выемочных участков, загазованность подземных горных выработок, пожар и завалы и обрушения, уровень риска характеризуется как «Возможный». В целях обеспечения приемлемого уровня риска разработаны организационные и технические мероприятия, направленные на снижение вероятности возникновения и тяжести последствий аварии. При соблюдении компенсирующих мероприятий, для указанных сценариев аварии обеспечивается уровень риска «Приемлемый».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, решена актуальная научно-практическая задача - обоснованы параметры технологии изоляции подземных камер для сернокислотного выщелачивания руд цветных металлов. Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Разработана методика выбора параметров технологии и материалов для изоляции камер выщелачивания, отличающаяся тем, что выбор направлений использования вмещающих пород месторождений, включая отходы добычи руд, сопровождается оценкой содержания в них аморфной фазы кремния и алюминия в свете перспектив реализации технологии выщелачивания руд цветных металлов.

2. Обоснована и запатентована технология формирования изолированных камер выщелачивания заключающейся в выемке руды, формировании стенок на

основе твердеющей смеси и днища камеры с изолирующим слоем, загрузке минерального сырья, бурении в возведенном днище скважин для подачи окисляющего газа и, по окончании процесса окисления, скважин для отвода продуктивного раствора, причем, оформление изолирующего слоя в основании камеры может осуществляться путем возведения устойчивых конструкций в днище камеры из изолирующего материала на весь объем или создания защитного слоя на ранее возведенном днище требуемой прочности.

3. Определены требования к параметрам конструкций в основании днищ камер подземного выщелачивания и материалам для их формирования, исключающих утечку растворов за пределы блока. Установлено, что наиболее перспективным материалом для изоляции днищ камер выщелачивания являются геополимеры, обладающие высокой прочностью, гидронепроницаемостью и устойчивостью к воздействию агрессивных растворов и высоких температур.

4. Установлено, что содержание аморфного кремнезема – ключевого показателя сырья, свидетельствующего о возможности формирования на его основе геополимеров, во вмещающих породах медно-колчеданных месторождений Южного Урала составляет от 6 до 11%: для дацитов – 11%, серицит-кварцевых метасоматитов – 7% и туфов дацитов – 6%. а требуемое содержание аморфной фазы в составе смеси может быть обеспечено добавлением отходов сжигания углей, требующих утилизации.

5. Исследование закономерностей формирования технологических свойств геополимеров на основе отходов производства показало, что геополимер следующего состава: дациты - 1457 кг/м³, зола - 350 кг/м³, жидкий компонент - 709 кг/м³ характеризуется высокими прочностными характеристиками. Пределы прочности на одноосное сжатие для полученных образцов на 7, 14, 30, 60 сутки составили 4, 8, 15,9, 21,75 МПа, соответственно.

6. Выполненная оценка свойств массивов, полученных на основе разработанных смесей, свидетельствует об их высокой кислото- и термостойкости. Прочность на одноосное сжатие образцов в возрасте 60 сут., погруженных в 10% раствор H₂SO₄ на 30 сут., составила 22,4 МПа, а для образцов, подверженным воздействию высоких температур - 22МПа. Достижение указанных свойств в подземных условиях обеспечивается применением передвижных закладочных комплексов в составе виброщековой дробилки, конусной инерционной дробилки, питателей, растаривателей, шнековых конвейеров и смесителей обеспечивает условия для мобильного формирования изолирующих оснований камер подземного выщелачивания, обеспечивая подготовку вмещающих пород до требуемого гранулометрического состава, шихтовку твердых компонентов, перемешивание с водным щелочным продуктом из силикатов натрия и калия.

7. Выполненный анализ опасностей и оценка уровня риска возникновения и развития аварий, связанных с применением технологии подземного блочного выщелачивания, показал, что риски миграции агрессивных растворов за пределы блоков выщелачивания превышают допустимый уровень, вероятность инцидента составляет $1,2 \times 10^{-3}$ ед/год. В связи с чем разработаны организационные и технические мероприятия, реализация которых позволила снизить риск возникновения и развития аварии до уровня «Приемлемый».

**Основное содержание диссертации опубликовано: в изданиях,
рекомендованных ВАК России:**

1. Radchenko, D.N., Gadzhieva, L.A., Gavrilenko, V.V. Research of Concentrations of Ultrafine and Finely Dispersed Aerosols in the Atmosphere of a Southern Urals Mining Region // 3rd International Innovative Mining Symposium. IIMS 2018; E3S Web of Conferences. - 2018. - V. 41. - article number 01035.

2. Юн Ю.А., Есина Е.Н., Рыльников А.Г., Гаджиева Л.А. Обоснование паарметров рудничной сепарации рудничной массы при разработке медных месторождений Жезказганского региона // Известия Тульского государственного университета «Науки о земле». – Тула: Изд-во ТулГУ. - 2019. – № 3. – С. 203–211.

3. Федосеев В.В., Гаджиева Л.А. Опыт и результаты переоценки золоторудных месторождений Челябинской области для открытой разработки и выщелачивания путем понижения бортового содержания // Известия тульского государственного университета. Науки о Земле. — Тул: Издательство ТулГУ. - 2020. - №1 - С. 328–339.

4. Рыльникова М.В., Айнбиндер Г.И., Митишова Н.А., Гаджиева Л.А. Исследование закономерностей возгорания сульфидных руд и пород при комбинированной разработке месторождений // Известия Тульского государственного университета «Науки о земле». - Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. – №2. – С. 341–356.

5. Гаджиева Л.А., Рыльников А.Г., Власов А.В., Кливер С.Я. Оценка промышленных рисков при внедрении циклично-поточной технологии на глубоких горизонтах карьера // Известия тульского государственного университета. Науки о Земле. — Тула: Издательство ТулГУ. - №4. - 2020. С. 99-111.

6. Федосеев В.В., Рябов Ю.И., Гаджиева Л.А. Переоценка золоторудных месторождений Челябинской области – основа развития минерально-сырьевой базы АО «ЮГК» // Известия тульского государственного университета. Науки о Земле. Вып. 4. — Тула: Издательство ТулГУ. – 2020. - №4 - С. 547–560.

7. Патент № 2747275 С1 Российская Федерация, МПК E21C 41/22, E21B 43/28, C22B 3/04. Способ подземного выщелачивания металлов из сульфидсодержащего минерального сырья: № 2020136767: заявл. 10.11.2020; опубл. 04.05.2021 / Д. Р. Каплунов, Д. Н. Радченко, Л.А. Гаджиева [и др.].

В прочих изданиях:

8. Радченко Д.Н., Лавенков В.С., Гаджиева Л.А. Закономерности формирования технологических свойств минерально-сырьевых потоков как база имитационного моделирования нового технологического уклада развития подземных рудников. // Материалы X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу», - Магнитогорск: МГТУ - 2019. - С.288-300

9. Гаджиева Л.А., Юн Ю.А., Рыльников А.Г. Современные технологии управления качеством рудной массы при вовлечении в разработку бедных руд комбинированными геотехнологиями // Материалы X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. - 2019. - С. 165-167

10. Радченко Д.Н., Гаджиева Л.А. Состав и свойства закладочных смесей при формировании горнотехнических конструкций для подземного выщелачивания //

материалы к конференции Международной научной школы академика К.Н.Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» - М.: ИПКОН РАН. - 2020. - С. 310–313

11. Гаджиева Л.А. Повышение надежности эксплуатации горнотехнических конструкций при комбинировании подземной добыче руд и выщелачивании // Материалы XI Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу» - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. - 2021. - С.72-74

12. Радченко Д.Н., Гаджиева Л.А., Гавриленко В.В. Сравнительный анализ свойств закладочных массивов на цементной и геополимерной основе в свете перспектив формирования камер для шахтного подземного выщелачивания // Материалы 15 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М: ИПКОН РАН. - 2021. - С. 207–209.

13. Гаджиева Л.А., Гавриленко В.В. Результаты исследований состава и свойств геокомпозитов для формирования в недрах прочных кислотостойких гидроизолирующих конструкций в камерах выщелачивания // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «ЗОЛОТО. ПОЛИМЕТАЛЛЫ. XXI ВЕК: УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ» - М.: ИПКОН РАН. - 2022. - С. 103–105

14. Радченко Д.Н., Гаджиева Л.А. Результаты исследований свойств вмещающих пород месторождений многокомпонентных руд Урала для формирования на геополимерной основе горнотехнических конструкций в системах подземного выщелачивания // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ» - Магнитогорск.: Издательство «Перо». - 2022. - С. 95–98

15. Гаджиева Л.А. Оценка свойств вмещающих пород месторождений для формирования на их основе горнотехнических конструкций специального назначения // Материалы 5 Международной научной школы академика К.Н.Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» - М.: ИПКОН РАН. - 2022. - С. 190–193

16. Гаджиева Л.А. Повышение эффективности комбинированного способа подземной добычи руд и выщелачивания путем формирования горнотехнических конструкций на основе геополимерных композитов // Материалы научно-практической конференции «Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых» - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. – 2023. - С. 74–76.