

На правах рукописи



ЦУПКИНА МАРИЯ ВЛАДИМИРОВНА

**ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ НА
ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ, СОПРЯЖЕННЫХ С
ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ МЕДНО-КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальности

2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем

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 геотехнологии комплексного освоения недр

Научный руководитель:

Рыльникова Марина Владимировна
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
ИПКОН РАН

Официальные оппоненты:

Стась Галина Викторовна
доктор технических наук, профессор кафедры
механики материалов и геотехнологий,
Тульский государственный университет

Тюленев Максим Анатольевич
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой открытых горных работ,
Кузбасский государственный технический
университет им. Т.Ф. Горбачева

Ведущая организация:

Институт горного дела Уральского отделения
Российской академии наук, г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «15» мая 2024 г. в 11 ч. 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:
https://xn--80apgmbdfl.xn--p1ai/wp-content/uploads/2024/02/diss_Tsupkina_M.V.pdf

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



В.С. Федотенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Поиск дополнительных источников минерального сырья является одним из наиболее актуальных направлений развития горнодобывающей промышленности, обеспечивающих восполнение минерально-сырьевой базы России, что является важнейшей составляющей экономического роста. Анализ современного состояния минерально-сырьевой базы РФ свидетельствует о том, что интенсивная отработка высокорентабельных месторождений привела к истощению благоприятных к выемке запасов и необходимости вовлечения в эксплуатацию бедных, ранее некондиционных руд и техногенного сырья.

В этой связи, в настоящее время важнейшим направлением повышения эффективности функционирования горнотехнических систем, особенно при добыче руд цветных, драгоценных и редких металлов, является комплексное использование георесурсов недр Земли. В мировой практике прослеживаются перспективные направления комплексного освоения недр, связанные с управлением отходами недропользования путем их использования в различных сферах. Кроме того, накопление отходов горнопромышленного комплекса приводит к интенсивному загрязнению окружающей среды. Ежегодно в результате освоения месторождений полезных ископаемых на поверхности земли складывается более 8 млрд т твердых отходов.

Сложившаяся ситуация в области обращения с отходами не только создает реальную угрозу здоровью населения и жизнедеятельности организмов в горнопромышленных регионах, но и приводит к потере качества складированного техногенного минерального сырья при его хранении. В связи с тем, что уровень экологического воздействия хвостохранилищ на экосистему регионов имеет прямую связь с технологией и продолжительностью складирования и хранения отходов, особую опасность представляют старогодние хранилища отходов переработки руд, складирование которых происходило десятки лет назад.

Среди огромного количества источников загрязнения окружающей среды следует выделить отходы переработки медно-колчеданных руд в связи с высоким классом их опасности. Это обусловлено тем, что активное окисление минералов в процессе хранения в хвостохранилище ввиду наличия в вещественном составе хвостов сульфидной составляющей, приводит к образованию вторичных минералов, способствующих образованию в растворах значительной концентрации серной кислоты, которая служит хорошим растворителем и способствует образованию кислотного дренажа с миграцией металлов в окружающую среду.

Наряду с ухудшением экологических показателей среды горнопромышленных регионов, следует отметить, что длительная разработка большинства медно-колчеданных месторождений сопровождается устойчивой тенденцией истощения минерально-сырьевых ресурсов и снижения качества добываемых руд. Такая ситуация весьма характерна для минерально-сырьевой базы Южного Урала, где разработка медно-колчеданных руд ведется на протяжении длительного времени.

Современное состояние горной промышленности требует развития ресурсосберегающих технологий, предусматривающих высокую полноту извлечения запасов из недр, обеспечение извлечения сопутствующих ценных компонентов,

снижение техногенной нагрузки на компоненты окружающей среды с освобождением территорий от складированных отходов. Это предопределяет необходимость обоснования режима горных работ, в основу которого должны быть заложены результаты комплексных исследований состава, структуры и свойств сырья техногенных образований для районирования разрабатываемого объекта и выбора порядка его разработки.

Обоснование технологических решений по утилизации техногенного сырья посредством его эффективного и своевременного вовлечения в эксплуатацию, сформированных в период складирования и хранения отходов переработки медно-колчеданных руд, является актуальной научно-практической задачей.

Целью работы является обоснование режима горных работ, обеспечивающего планомерную, безопасную и эффективную разработку старогодних техногенных образований, сформированных из отходов переработки медно-колчеданных руд, для снижения экологической нагрузки и расширения минерально-сырьевой базы горнодобывающего предприятия.

Идея работы состоит в том, что обоснование режима горных работ, обеспечивающего планомерную, безопасную и эффективную разработку старогодних техногенных образований из отходов переработки медно-колчеданных руд со снижением экологической нагрузки на горнопромышленный регион должно базироваться на определении наличия и особенностей развития зоны гипергенеза, качественно-количественных характеристик преобразованного в ней техногенного сырья с учетом влияния закономерностей окислительных процессов на изменение его физико-механических характеристик.

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

- обобщение и систематизация практики оценки и эксплуатации техногенных минеральных образований из отходов переработки руд в свете перспектив повышения полноты и комплексности освоения недр;

- развитие научно-методического подхода к районированию хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд с установлением закономерностей развития процессов сегрегации, цементации и вторичного минералообразования, протекающих в техногенных массивах;

- исследование закономерностей изменения в результате гипергенеза вещественного состава, физико-механических и физико-химических характеристик техногенного сырья на примере старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики, как перспективного объекта расширения минерально-сырьевой базы Южно-Уральского горнопромышленного региона;

- выбор технико-технологических решений и обоснование режима открытых горных работ на старогоднем хвостохранилище Сибайской обогатительной фабрики с оценкой эколого-экономической эффективности.

Предмет исследования: закономерности изменения состава и свойств техногенного сырья по глубине и площади техногенного объекта, с учетом распро-

странения зоны гипергенеза, а также особенностей характеристик сырья, определяющих выбор технологии разработки техногенного образования, сформированного в результате складирования и хранения отходов переработки медно-колчеданных руд.

Объект исследования: техногенные образования, сформированные в период складирования и хранения отходов переработки медно-колчеданных руд месторождений Южного Урала

Методы исследования. Анализ и обобщение фундаментальных исследований в части изучения особенностей преобразования состава и структуры техногенных образований, сформированных из отходов обогащения медно-колчеданных руд, а также выбора технологии разработки с учетом установленных закономерностей строения; анализ первичной информации о природных типах руд медно-колчеданных месторождений и изучение горно-геологических условий сформированного в результате их переработки старогоднего хвостохранилища; комплексное исследование химического состава хвостов обогащения в независимых лабораториях методами атомно-эмиссионной и рентгенофлуоресцентной спектromетрии; рентгеноструктурный анализ на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000; оптико-минералогический анализ хвостов под микроскопом Olympus BX41 на базе анализатора «Минерал С7»; исследование растворимости минеральных форм; физико-механические испытания образцов техногенного грунта; создание на основе полученных данных геомеханических моделей устойчивости техногенного массива; применение геоинформационных и горно-геологических информационных систем для моделирования рельефа (ArcGIS и QGIS) и создания блочной модели хвостохранилища (ГИС Micromine).

Положения, выносимые на защиту:

1. При комплексном освоении месторождений медно-колчеданных руд, сопровождающемся формированием техногенных образований, представленных отходами обогащения, регулирование режима горных работ должно производиться для компенсации выбывания производственных мощностей природного месторождения путем вовлечения в эксплуатацию техногенного сырья с учетом характера его окисления в зоне гипергенеза.

2. Обоснование режима горных работ при эксплуатации техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд базируется на районировании техногенного массива по глубине с учетом развития зоны гипергенеза с разделением ее на подзоны в зависимости от стадий окисления техногенного сырья, отличающегося минеральным составом, растворимостью минеральных форм и видами сформированных бактериальных сообществ, что определяет последовательность выемки техногенных запасов, выбор технологической схемы, типа и средств механизации, а также мест их размещения.

3. Физико-механические свойства техногенного сырья из отходов обогащения медно-колчеданных руд зависят от содержания в его составе вторично образованных минеральных форм, представленных преимущественно сульфатами,

доля которых определяется стадией окисления в зоне гипергенеза, что необходимо учитывать при выборе технологий добычи и переработки многокомпонентного техногенного сырья.

Научная новизна работы:

1. Научно-методический подход к определению режима горных работ при эксплуатации техногенных образований из отходов переработки медно-колчеданных руд, отличающийся тем, что последовательность эффективной выемки техногенного сырья определяется на базе районирования техногенного образования с учетом доли растворимости минеральных форм, зависящей от развития стадий окисления техногенного сырья в зоне гипергенеза.

2. Закономерности строения техногенного образования, представленного отходами обогащения медно-колчеданных руд, заключающиеся в снижении доли растворимых минеральных форм по глубине хвостохранилища, что обусловлено направлением развития зоны гипергенеза от поверхности в глубину.

3. Систематизация техногенного сырья по стадиям окисления, определяющим в массиве хвостохранилища соотношение первичных сульфидов и вторично образованных минеральных форм, отличающаяся учетом доли их растворимости при обосновании режима горных работ при освоении техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд

4. Классификация технологических схем освоения техногенных образований из отходов переработки медно-колчеданных руд, основанная на характеристиках способов разработки и схем механизации выемочно-погрузочных средств, выбор которых определяется степенью окисления техногенного сырья и его физико-механическими свойствами.

Достоверность научных положений выводов и результатов обеспечена представительным объемом исследуемых проб, применением современных методов анализа горно-геологических условий хранения сырья в старогоднем хвостохранилище с оценкой его состава и свойств, использованием апробированных методов и положений теории открытой геотехнологии, а также привлечением проектных и фактических материалов по освоению старогодних хвостохранилищ; сопоставимостью теоретических и экспериментальных результатов исследований с практикой разработки техногенных минеральных объектов.

Практическая значимость работы заключается в обосновании режима горных работ и параметров технологических схем своевременного эффективного вовлечения в эксплуатацию отходов переработки медно-колчеданных руд, что обеспечивает расширение минерально-сырьевой базы горнодобывающих предприятий и способствует решению экологических проблем Южно-Уральского горнопромышленного региона, вызванных складированием и хранением техногенного сырья.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались на научных семинарах, научно-технических советах, международных конференциях: международной научно-практической конференции «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее» (к 100-летию МГРИ–РГГРУ), г. Москва, 2018; восьмой

Российской молодёжной научно-практической школы «Новое в познании процессов рудообразования», г. Москва, 2018; XVII Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов, г. Санкт-Петербург, 2019; X международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу», г. Магнитогорск, 2019; 14 международной научной школе молодых ученых и специалистов, г. Москва, 2019; международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность», г. Севастополь, 2019; II Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы. XXI век», г. Пласт, 2020; конференции международной научной школы академика К.Н.Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр». Г. Москва, 2020; XI международной конференции «Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр», г. Магнитогорск, 2021; 15 международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», г. Москва, 2021; III Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы. XXI век: устойчивое развитие», г. Челябинск, 2022, XII международной конференции «Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых», г. Магнитогорск, 2023.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 19 работах, 6 из которых – в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 170 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков, 24 таблицы, список литературы из 113 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обобщению опыта оценки и эксплуатации техногенных образований, в том числе из отходов переработки медно-колчеданных руд в свете перспектив повышения полноты и комплексности освоения недр. Проведен анализ условий формирования и эксплуатации хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд, а также особенностей преобразования вещественного состава, структуры и свойств складированного в них техногенного сырья при окислении.

Вопросам обоснования технологий и параметров открытых горных работ, а также вопросу вовлечения техногенных образований в комплексное освоение посвящено огромное количество трудов известных ученых, среди которых академики АН СССР и РАН В.В. Ржевский, М.И. Агошков, Н.В. Мельников, К.Н. Трубецкой, член-корреспондент РАН Д.Р. Каплунов, доктора наук А.М. Гальперин, А.Г. Талалай, М.В. Рыльникова, С.Е. Гавришев, Г.В. Секисов, А.А. Таскаев, В.Н. Уманец, И.В. Шадрунова, А.Б. Юн, С.И. Фомин, И.А. Пыталев и многие другие ученые. В работах академика В.В. Ржевского рассмотрены вопросы обоснования параметров и режима открытых горных работ при освоении месторождений твердых полезных ископаемых. В работах других ученых дано развитие научных идей и методологических подходов к обоснованию технологий горных работ и совокупного использования природных и техногенных минеральных ресурсов в ас-

пекте комплексного освоения недр. Несмотря на выдающиеся результаты представленных работ, в них не уделено достаточного внимания вопросу вовлечения в эксплуатацию техногенных образований на основе обоснования режима горных работ при их совместной разработке с природными месторождениями. На основании этого определены цель, задачи и идея диссертационного исследования.

Во второй главе дано развитие научно-методических основ геотехнологии разработки хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд с учетом процессов сегрегации, цементации и вторичного минералообразования. На основании результатов геологической оценки старогоднего Сибайского хвостохранилища (рис.1) установлено, что для исследования возможности вовлечения техногенного сырья из хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд, а также для обоснования последовательности ведения горных работ при разработке техногенных образований необходимо исследование структуры, состава и свойств слагающего их сырья в динамике вторичного минералообразования с учетом значимых факторов (вещественного состава, физико-химических условий и микробиологического фактора), влияющих на характер окислительных процессов и формирование зоны гипергенеза в целом.

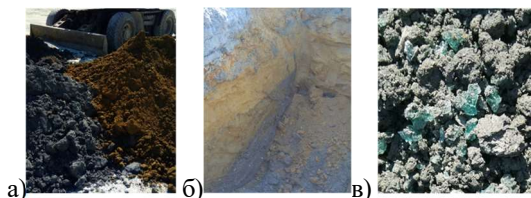


Рисунок 1. Внешний вид слоев массива хвостохранилища с выделением фракций (а): серая (сульфатсодержащая) и бурая (б) и техногенные сульфаты с глубины 1–2 м (в)

В этой связи предложен научно-методический подход к районированию техногенных образований из отходов переработки медно-колчеданных руд, согласно которому районирование техногенного образования при его эксплуатации должно осуществляться с учетом наличия зоны гипергенеза и особенностей ее распространения в глубину с оценкой наличия сульфатредуцирующих бактерий и растворимых минеральных форм, стадий окисления, а также распределения ценных компонентов и вредных примесей, локализации обводненных зон, в совокупности определяющих режим развития горных работ.

Наличие зоны гипергенеза и ее параметры определяются вторичным минералообразованием, растворимостью минеральных форм и образованием сульфатредуцирующих бактерий, поэтому проводились комплексные исследования проб техногенного сырья Сибайского хвостохранилища с учетом его деления на северо-западный и основной отсеки.

Определено, что в северо-западном отсеке содержание ценных компонентов ниже, чем в основном, что обусловлено более продолжительным хранением техногенного сырья и, как следствие, миграцией ценных компонентов в нижележащие слои. В ходе анализа минерального состава техногенного сырья установлено, что: главным сульфидным минералом является пирит, содержание которого изменяется

от 6 до 56 %; минеральная ассоциация, образующаяся в ходе окислительных процессов, развита до глубины 2-3 м и представлена: ярозитом (1–11%), розенитом (1–10%) и мелантеритом (2–37%). Кроме того, установленное соотношение вторичных минералов и природных сульфидов, отличающееся в пределах зоны гипергенеза, свидетельствует о развитии в ней окисления нескольких стадий.

Ввиду наличия в техногенном сырье хорошо растворимых минеральных форм, преобладание которых может снижать устойчивость массива, определялась доля растворимых минералов в различных растворителях (дистиллированной воде комнатной температуры и нагретой до 60, серной кислоте) (рис.2).

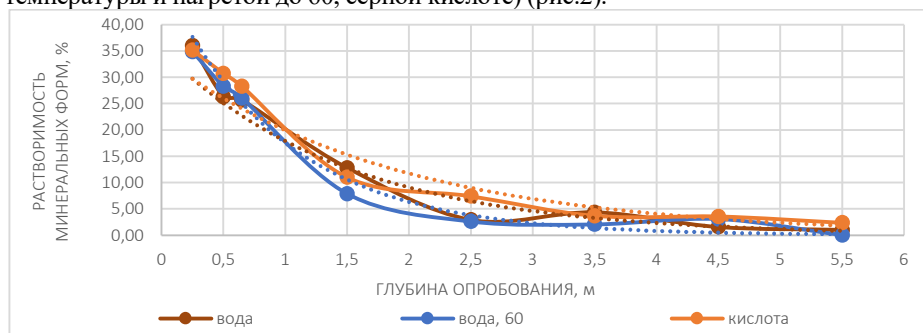


Рисунок 2. Закономерность изменения растворимости в различных растворителях минеральных форм по глубине хвостохранилища (по усредненным данным)

В результате установлено, что от поверхности до глубины 2м растворимость минеральных форм изменяется в пределах от 8 до 36%, на интервале от 2 до 3,5 м — от 2 до 8 %, ниже 3,5 м — максимальная доля растворимости минеральных форм в пробе составляет 3%. Фактически установленное снижение доли растворимых минеральных форм с глубиной определяет необходимость выбора различных технологических схем переработки техногенного сырья, а также первоочередной выемки слоя с повышенной долей растворимости.

Результаты оценки pH среды показали, что для верхнего слоя хвостохранилища от поверхности на глубину до 2,5 м характерна кислая среда, что является благоприятным фактором для развития сульфатредуцирующих бактерий. Методом метабаркодирования производилось определение наличия и видов бактериальных сообществ. В результате установлено, что в зоне гипергенеза, развитой в старогоднем Сибайском хвостохранилище, преобладают серо- и железоокисляющие бактерии, в связи с этим происходит ускоренное преобразование вещественного состава и свойств техногенного сырья, что способствует эффективному применению технологий выщелачивания. Кроме того, установлено отличие преобладающих видов бактерий в различных участках техногенного образования, также отличающихся минеральным составом и характером окисления, что может быть использовано для интенсификации окислительных процессов при переработке хвостов обогащения медно-колчеданных руд. Установлены зависимости развития зоны гипергенеза, на базе которых проведено районирование хвостохранилища по глубине (рис. 3).

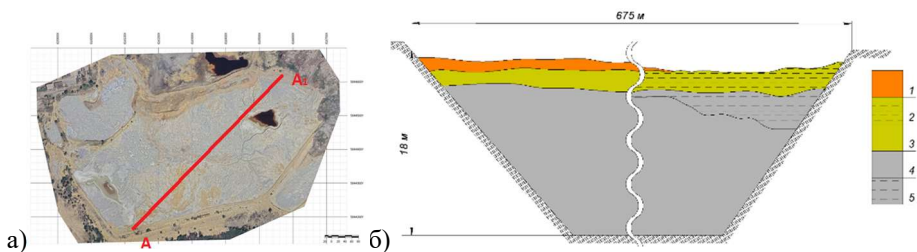


Рисунок 3. Районирование хвостохранилища по глубине: а – план с линией разреза, б – разрез по профилю А-А1. 1–3 – слои в зоне гипергенеза: 1 слой – железистая корка, 2 слой – хвосты второй стадии окисления, нормальной влажности, 3 – хвосты второй стадии окисления, переувлажненные. 4–5 – слои не окисленного техногенного сырья: 4 – нормальной влажности, 5 – переувлажненные

С учётом выявления высокой доли растворимых минералов (мелантерита до 37% и розенита до 10%) техногенного сырья в зоне гипергенеза предложены принципы обоснования параметров геотехнологии, учет которых позволит обеспечить эффективность эксплуатации хвостохранилища за счет раздельной выемки с последующей переработкой окисленного и сульфидного техногенного сырья.

Далее, в связи с тем, что определяющее влияние на выбор средств механизации и мест их размещения оказывают физико-механические характеристики техногенного сырья, произведена их оценка с учетом районирования массива хвостохранилища. В результате установлено, что значения угла внутреннего трения и сопротивления сдвигу техногенного сырья из верхнего слоя (до глубины 2,5 м) меньше, чем у ниже расположенного не окисленного слоя. На базе исследования физико-механических свойств техногенного сырья в зоне гипергенеза, а также особенностей состава и сырья и характера его окисления выделены 4 подзоны: южная (№1), северо-западная (№2) и северо-восточная (№3) части в основном отсеке хвостохранилища и северо-западный отсек (№4) (рис. 4).

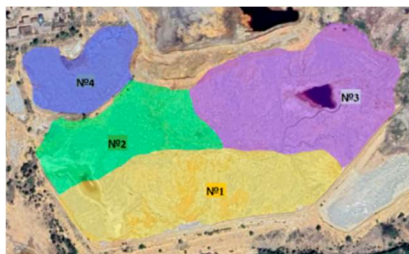


Рисунок 4. Результат районирования старогородного Сибайского хвостохранилища с учетом особенностей рельефа и характера окисления: подзоны №№ 1–3 – участки, выделенные в основном отсеке, подзона № 4 – в северо-западном отсеке

Для обеспечения безопасности горных работ с целью минимизации риска образования провалов выемочно-погрузочного оборудования был проведен анализ предела прочности на сдвиг техногенного сырья каждой из выделенных подзон в зависимости от вертикальной нагрузки (рис. 5).

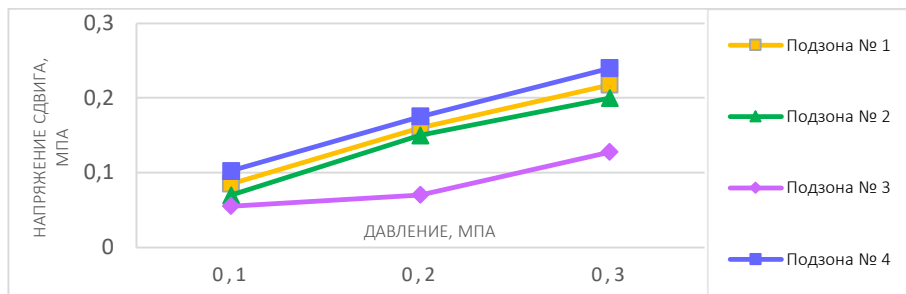


Рисунок 5. Результаты испытания сцепления техногенного сырья по схеме консолидировано-дренированный (медленный) срез в выделенных подзонах: южная (№1), северо-западная (№2) и северо-восточная (№3) части в основном отсеке хвостохранилища и северо-западный отсек (№4)

Установлено, что прочностные свойства отходов переработки в северо-восточной части основного отсека ниже, чем в остальных выделенных частях. Это требует разработки технологических решений, направленных на повышение устойчивости поверхности в северо-восточной части основного отсека хвостохранилища.

Исследование взаимосвязи доли вторично образованных минеральных форм и прочностных свойств техногенного сырья, характерных для каждой из стадий окисления, позволило установить, что при формировании в техногенном сырье мелантерита, наибольшее содержание которого характерно для второй стадии окисления, снижается устойчивость массива техногенного образования (рис.6а). При развитии ярозита, характерного для 3 стадии окисления, напротив, отмечается прямая зависимость повышения устойчивости массива за счет цементации техногенного сырья (рис.6б).

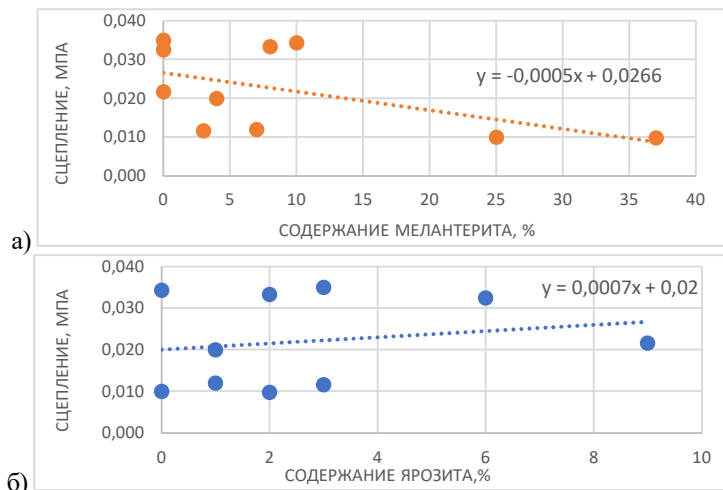


Рисунок 6. Зависимость сцепления хвостов от содержания вторичных минеральных форм: а – от содержания мелантерита, б – от содержания ярозита

Доказано, что сцепление лежалых хвостов зависит от содержания в них вторично образованных минеральных форм – мелантерита и ярозита.

Третья глава содержит обобщение результатов натурных и лабораторных исследований, направленных на обоснование параметров открытой разработки техногенных образований. Разработана систематизация характеристик техногенного сырья с учетом стадии окисления, определяемой соотношением первичных сульфидов и вторичных минеральных форм. Определено, что преобразование отходов обогащения медно-колчеданных руд протекает последовательно по стадиям окисления от 1 до 3, а также, что наиболее окисленная часть приурочена к поверхности техногенного образования, а ниже расположены сульфидные менее окисленные хвосты. Техногенное сырье из отходов обогащения медно-колчеданных руд, характеризующееся различными стадиями окисления в зависимости от сроков его хранения, может быть вовлечено в промышленную переработку в момент, когда его текущие свойства и минеральный состав являются наиболее благоприятными для вторичной переработки с учетом наличия технологий, обеспечивающих максимальное извлечение ценных компонентов. Последовательность выемки техногенного минерального сырья должна определяться не только локализацией границ окисленного и не окисленного слоев в пределах техногенного объекта, но и разделением окисленного слоя с учетом степени окисления, определяющей соотношением первичных сульфидов и вторично образованных техногенных сульфатов.

Ввиду наличия в пределах старогоднего Сибайского хвостохранилища различных по степени окисления подзон, что определяет устойчивость массива и условия эксплуатации горнотранспортного оборудования, на базе установленных характеристик техногенного сырья были выделены слои, отличающиеся характером окисления и влажностью. С учетом выделенных слоев были отстроены разрезы для южной части основного отсека хвостохранилища (№1), где развита ярозитовая корка, и северо-восточной части (№3), где отмечено преобладание переувлажненных грунтов (рис.7).

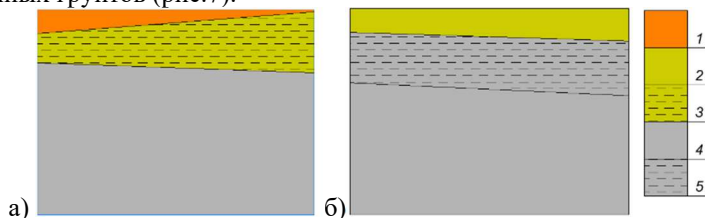


Рисунок 7. Разрезы пляжной (а) и прудковой (б) зон техногенного образования с учетом выделенных слоев: 1–3 – слои в зоне гипергенеза: 1 слой – ярозитовая корка, 2 слой – хвосты второй стадии окисления, нормальной влажности, 3 – хвосты второй стадии окисления, переувлажненные. 4–5 – слои не окисленного техногенного сырья: 4 – нормальной влажности, 5 – переувлажненные

Разработана классификация технологических схем разработки хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд по признаку наличия окисленного слоя и особенностей развития зоны гипергенеза с целью обоснования режима горных работ,

предусматривающего необходимость отдельного снятия окисленного слоя и последующей раздельной добычи и переработки минерального сырья различной степени окисления для повышения полноты и комплексности освоения техногенных образований. В основу выбора технологических схем в качестве определяющих факторов заложены степень окисления, мощность окисленного слоя и наличие растворимых вторичных минеральных форм. Выбор технологического оборудования определяется устойчивостью откосов и основания техногенного массива.

Ввиду того, что рабочие уступы в техногенном образовании из лежалых хвостов могут разрабатываться экскаваторами с обратной лопатой типа Caterpillar 395 при их расположении на устойчивой дамбе хвостохранилища, было произведено моделирование напряженно-деформированного состояния массива с расчетом коэффициента запаса устойчивости формируемого откоса в подзоне № 3, которая занимает около 30 % объема техногенного образования. Коэффициент запаса устойчивости откоса в данном случае равен 1.25, что указывает на то, что сформированный откос обладает достаточной устойчивостью при сроке эксплуатации до 1 года. Размер призмы обрушения по верхней бровке составляет 4 м. Также был рассмотрен вариант отработки этой же зоны, подразумевающий использование малогабаритных мобильных гусеничных бульдозеров типа Caterpillar D6 для перемещения техногенного сырья к установленному на дамбе экскаватору. Коэффициент запаса устойчивости откосов при этом равен 1, что еще меньше, чем в предыдущем варианте. Ширина призмы обрушения – 6 м.

При оценке деформации техногенного массива под давлением гусеничного бульдозера в подзоне № 1 (рис.9а) установлено, что наличие ярозитовой корки изменяющей мощности обуславливает риск ее разрушения под гусеницами и возможность последующего опрокидывания техники набок. Этот факт определяет приоритетное направление движения техники поперек края ярозитовой корки. При оценке деформации в подзоне №3 (рис.9б) установлено, что несмотря на преобладание переувлажненных пород, обуславливающих слабое основание, бульдозер равномерно передвигается по поверхности с погружением в слабые грунты основания на глубину до 0,2 м.

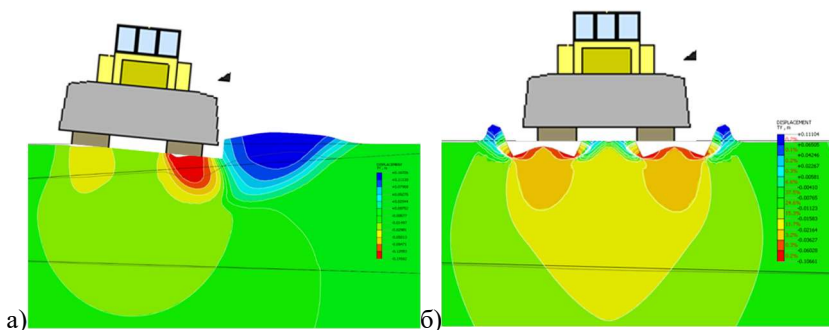


Рисунок 9. Результат геомеханического моделирования деформации поверхности хвостохранилища под гусеничным бульдозером: а – подзона №1, б – подзона №3

Развитие представлений о преобразовании технологических свойств хвостов для их последующей добычи и переработки на базе сопоставимой оценки вещественного состава и физико-механических характеристик хвостов обогащения медно-колчеданных руд с характеристиками микробных сообществ в массивах хвостохранилищ позволило выявить закономерности, определяющие возможность целенаправленной подготовки техногенного сырья с первоначальным снятием окисленного, пригодного для переработки слоя, с последующей подготовкой нового объема сырья иного качества. При этом обоснование режима горных работ или его регулирование должно осуществляться с учетом периодов освоения природного месторождения и факта наличия сопряженных с ним техногенных образований из отходов обогащения руд. Такой подход предусматривает обоснование возможности совокупного использования природных и техногенных минеральных ресурсов, когда вовлечение последних будет способствовать поддержанию проектных объемов добычи при разработке природных месторождений, что отражается в совокупном графике режима развития горных работ (рис. 9).

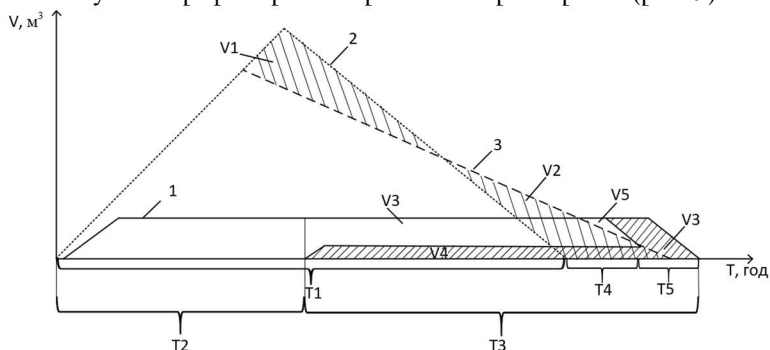


Рисунок 10. Принципиальная схема режима горных работ, предусматривающего совокупное использование природного и техногенного сырья: 1 – объемы добычи руды, 2 – граница вскрышных работ до вовлечения техногенного сырья, 3 – после вовлечения, $V_1=V_2$ – объем смещенных во времени вскрышных работ, $V_3 + V_5$ – исходный объем добываемой руды, $V_4 + V_3$ – замещенный объем техногенным сырьем.

Идея предложенного режима горных работ заключается в том, что в отличие от принятого режима, предусматривающего использование только природного сырья, где периодом добычных и вскрышных работ является T_1 , срок работы горного предприятия увеличивается и становится равным $T_2 + T_3$. С учетом выявленных особенностей окисления складированного в хвостохранилище техногенного сырья выделяется определенный период T_2 , в ходе которого осуществляется накопление и подготовка техногенного сырья с учетом необходимых для последующей переработки качественных характеристик. После периода T_2 начинается период T_3 – вовлечение подготовленных хвостов в переработку, поскольку изменяется соотношение первичных упорных сульфидов и вторичных растворимых

сульфатов. Продолжительность T2 должна определяться необходимыми объемами техногенного сырья, которые в дальнейшем позволят сохранить объемы производства товарной продукции при уменьшении объемов добычи руд, что позволяет увеличить сроки отработки месторождения на период T4 + T5. В данном случае период T4 обеспечивается объемом добычи основного полезного ископаемого V5 за счет добычи объемов подготовленного техногенного сырья V4. Под периодом T5 понимается промежуток времени, когда происходит добыча оставшихся объемов подготовленного техногенного сырья.

Также важно, что при предложенном подходе объемы добычи техногенного сырья не будут замещать объемы добычи природных руд, но в случае необходимости будут использованы для увеличения финансового потока за счет продления общего срока эксплуатации месторождения. Предложенный подход позволяет не только увеличить срок эксплуатации горного предприятия, но и снизить коэффициент вскрыши путем смещения вскрышных работ во времени 2 и 3. Причем, объемы вскрышных работ остаются прежними, но смещаются во времени.

Также стоит учитывать, что в зависимости от стадии эксплуатации техногенного образования будет отличаться порядок подготовки техногенного минерального сырья.

В четвертой главе выполнена технико-экономическая оценка и представлены рекомендации по разработке старогоднего хвостохранилища. На основании привязки данных опробования, а также с учетом установленных параметров зоны гипергенеза создана блочная модель старогоднего Сибайского хвостохранилища. На базе результатов исследования, а также с учетом классификации технологических схем обоснована приоритетная геотехнологическая схема эксплуатации техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд. В результате обоснованы приоритетный порядок и параметры технологии разработки исследуемого объекта. Согласно разработанным рекомендациям, технологическая схема предусматривает предварительное разрушение и снятие ярозитовой корки, снятие слоя с преобладанием растворимых минеральных форм и последующую выемку техногенного сырья из массива хвостохранилища.

Технологическая схема производства выемочно-погрузочных и горнотранспортных работ представлена на рисунке 11. Технологическая схема предусматривает: экскаватор 1 с дамбы производит выемку техногенного сырья, формируя устойчивый уступ для работы бульдозера 3, который, в свою очередь, производит послойное скреперование сырья с последующим заполнением сформированной траншеи. После заполнения бульдозером траншеи, экскаватор изменяет направление ведения работ на противоположное. Таким образом исключаются простои оборудования и обеспечивается планомерность выемочных работ.

Технико-экономические расчеты показали, что совокупное использование природных и техногенных минеральных ресурсов позволяет увеличить срок отработки месторождения на 1,5 года за счет вовлечения в эксплуатацию заблаговременного подготавливаемого в хвостохранилище сырья. Учитывая, что в старогоднем хвостохранилище складировано около 6 т золота и 12 серебра, что обеспечит при извлечении на уровне 65% производство 3,9 т золота и 7,8 серебра.

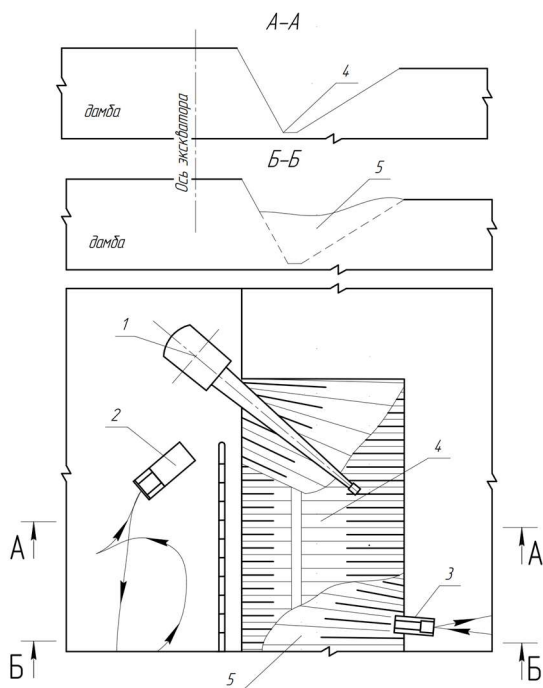


Рисунок 11. Технологическая схема: 1 – экскаватор с обратной лопатой, 2 – авто-самосвал, 3 – бульдозер, 4 – траншея по периметру техногенного объекта, 5 – навал пород, формируемый бульдозером.

В целом доказано, что при комплексном освоении месторождений медно-колчеданных руд, сопровождающимся формированием техногенных образований на основе отходов переработки медно-колчеданных руд, обоснование и регулирование режима горных работ должно производиться путем компенсации выбывания производственных мощностей природного месторождения путем вовлечения в эксплуатацию техногенного сырья с учетом степени и характера его окисления.

Заключение

В диссертации, являющейся завершенной научно-квалификационной работой, обоснованы новые технико-технологические: методика выбора параметров технологии эксплуатации техногенных образований из отходов переработки медно-колчеданных руд, обеспечивающей безопасность и эколого-экономическую эффективность работ, что имеет важное значение для расширения минерально-сырьевой базы цветной металлургии в России.

Основные результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

1. Предложен научно-методический подход к районированию хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд, согласно которому производится их

разделение на зоны для самостоятельной эксплуатации с учетом развития зоны гипергенеза, особенностей ее распространения в глубину техногенного объекта с оценкой наличия сульфатредуцирующих бактерий и растворимых минеральных форм, стадий окисления, наличия магнитных сульфидных минералов.

2. Разработана методика комплексного изучения старогодних хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд в динамике вторичного минералообразования, заключающаяся в исследовании факторов, влияющих на характер протекания окислительных процессов, вещественный состав, физико-химические свойства техногенного сырья и микробиологическую среду. Установлено, что в зоне интенсивного развития гипергенеза, развитой на глубину 2–3 м и отличающейся степенями окисления, преобладают серо- и железоокисляющие бактерии, инициирующие окислительно-восстановительные процессы.

3. Показано, в верхней части южной зоны основного отсека хвостохранилища формируется ярозитовая корка с содержанием ярозита – 1–10%, долей нуклеотидных последовательностей, отнесенных к *Ferroacidibacillus* sp. от 71 до 90%, что в 2,4 раза ниже, чем на глубине 1,5 м, где не обнаружено ярозита. В северо-западной зоне основного отсека, характеризующейся высоким содержанием пирита (снижающимся с глубиной от 56 до 36%) и отсутствием ярозита, что свидетельствует о незначительном биоокислении, – сообщество было представлено двумя преобладающими родами: *Pseudomonas* (доля, 48–56% всех последовательностей) и *Stenotrophomonas* (21–23%). В северо-восточной зоне основного отсека, где протекает наиболее активное окисление сворой степени, качественная структура сообществ отличается от других зон: *Ferroplasma* (Fm.) spp. В северо-западном отсеке, который был сформирован раньше основного, за счет чего техногенное сырье является более окисленным и содержащим наименьшее количество пирита 6% и 3% ярозита, в окислительные процессы слоя внесли вклад два основных рода: *Sulfoacidibacillus* (Sf.) и сульфобациллы.

4. Разработана классификация технологических схем эксплуатации хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд с учетом развития зоны гипергенеза и степени, предусматривающего необходимость отдельного снятия окисленного слоя и последующей селективной добычи и переработки различных типов минерального сырья.

5. Обоснована технологическая схема разработки старогоднего Сибайского хвостохранилища, предусматривающая предварительное разрушение и снятие ярозитовой корки, далее извлечение слоя с преобладанием растворимых минеральных форм и последующую выемку нижележащего сырья с преобладанием сульфидных форм. Перемещение горного оборудования по ярозитовой корке необходимо осуществлять перпендикулярно ее краю. С учётом ширины призмы возможного обрушения рекомендуемая ширина транспортной бермы – 8 м, предельный угол откоса уступа, обеспечивающий его устойчивость в зоне переувлажненных пород, должен составлять не более 20°, а в зоне осушенной части – не более 35°.

6. С учётом строения, состава и физико-механических свойств техногенного сырья для разработки хвостохранилища рекомендуется следующее горнотранспортное оборудование: для разрушения ярозитовой корки необходимо применение одного, а для выемки техногенного сырья двух облегченных гусеничных бульдозеров типа Caterpillar D6; для разработки техногенного образования необходимо 2 экскаватора типа Caterpillar 395; для транспортирования – 6 автосамосвалов типа Shacman 366. Предложены технология и порядок производства выемочно-погрузочных и горнотранспортных работ при разработке техногенного образования.

7. Предложена методика обоснования режима горных работ, предусматривающая совокупное использование природного и техногенного сырья с заблаговременной подготовкой последнего для эксплуатации со снижением объемов добычи руды для продления срока отработки месторождения. При эксплуатации старогоднего Сибайского хвостохранилища срок отработки Сибайского карьера увеличится на 1,5 года за счет добычи объема техногенного сырья 3 200 000 м³. Только в старогоднем хвостохранилище складировано около 6 т золота и 12 т серебра, что с учетом извлечения на уровне 65% обеспечило бы добычу дополнительного сырья около 3,9 т золота и 7,8 серебра.

Основные научные и практические результаты диссертации изложены в следующих опубликованных работах автора

В изданиях, рекомендуемых ВАК России:

1. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Цупкина М.В., Сафонов В.А. Исследование экологического воздействия Новотроицкого хвостохранилища на растительный покров и живые организмы // Известия тульского государственного университета. Науки о Земле. Вып. 1. — Тула. Издательство ТулГУ. 2020. С. 108–120.

2. Рыльникова М. В., Радченко Д. Н., Цупкина М. В., Кирков А.Е. Оценка воздействия техногенных образований из отходов переработки многокомпонентных руд на экосистемы горнопромышленных регионов // Известия тульского государственного университета. Науки о земле. 2020. № 3. С. 5–17.

3. Радченко Д.Н., Цупкина М.В., Джаппуев Р.К. Эколого-экономическая оценка техногенных минеральных образований для обеспечения устойчивого развития горнопромышленной индустрии // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021, Вып. №1. — Тула: Издательство ТулГУ. С:303-315.

4. Рыльникова М.В., Швабенланд Е.Е., Цупкина М.В., Джаппуев Р.К. Нормативно-правовые подходы к вовлечению в эксплуатацию техногенных минеральных образований // Рациональное освоение недр. 2021, Вып. №1 (57). — М.: Научно-информационный издательский центр "Недра-XXI". С: 24–29.

5. Рыльникова М.В., Джаппуев Р.К., Цупкина М.В. Проблемы и перспективы вовлечения в промышленную эксплуатацию отходов переработки руд Тырнаузского месторождения // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 4. С. 86–96.

6. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Цупкина М.В. Оценка влияния гипергенеза в хранилищах отходов переработки медно-колчеданных руд на выбор технологических схем их разработки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 2. С. 283–299.

В прочих изданиях:

7. Радченко Д.Н., Цупкина М.В., Залевская К.Н. Обоснование параметров экологически сбалансированного освоения месторождений АО «ЮГК» при вовлечении в отработку техногенного сырья // Материалы восьмой Российской молодёжной научно-практической школы «Новое в познании процессов рудообразования». М: ИГЕМ РАН. - 2018. - С. 302–303.

8. Цупкина М.В. Методика исследования техногенных объектов с целью определения технологических решений по их вовлечению в промышленную эксплуатацию на примере Сибайского хвостохранилища // Материалы XVII Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов. Санкт-Петербург: СПбГУ. - 2019. - С. 83.

9. Цупкина М.В., Гавриленко В.В., Князькин Е. А. Результаты исследований параметров осушенного массива лежалых хвостов обогащения медно-колчеданных руд // Сборник статей X Международной конференции «Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу», Магнитогорск. - 2019. С. 351–356.

10. Цупкина М.В. Обоснование методики и параметров геологической разведки осушенной части хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики // М: ИПКОН РАН, Материалы 14 международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». – 2019. – 208–209.

11. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Цупкина М.В., Гавриленко В.В. Вовлечение техногенных минеральных объектов в полный цикл освоения рудных месторождений: решение проблем техносферной безопасности // Сборник статей по материал международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность». – Севастополь: СевГУ, 2019. – С. 1428–1432.

12. Радченко Д. Н., Цупкина М. В., Джаппуев Р.К. Результаты эколого-экономической оценки перспективности эксплуатации складированных в Пластовском районе отходов переработки золотосодержащих руд // материалы II Всероссийской научно-практической конференции «ЗОЛОТО. ПОЛИМЕТАЛЛЫ. XXI ВЕК» — М.: ИПКОН РАН. 2020. С. 65–66.

13. Цупкина М.В. Обобщение современных методов оценки техногенных образований из отходов обогащения руд // Материалы конференции Международной научной школы академика К.Н.Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр». – М.: ИПКОН РАН. - 2020.С. 325–328.

14. Цупкина М.В. Развитие научно-методической базы вовлечения в промышленную эксплуатацию хранилищ отходов переработки многокомпонентных

руд // Материалы 15 Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». 2021. С. 219–221.

15. Цупкина М.В. Влияние процессов гипергенеза в хранилищах отходов переработки колчеданных руд на выбор параметров геотехнологии их вовлечения в промышленную эксплуатацию // Материалы XI Международной конференции «Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр. 2021. С. 172–173.

16. Цупкина М.В., Джаппуев Р.К. Проблемы и перспективы вовлечения в промышленную эксплуатацию лежалых отходов переработки многокомпонентных руд Тырныаузского месторождения // Материалы XI Международной конференции «Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр. 2021. С. 168–169.

17. Цупкина М.В. Оценка перспектив и условий эксплуатации хвостохранилищ для устойчивого развития Южно-Уральского региона // материалы Всероссийской научно-практической конференции III Всероссийской научно-практической конференции «ЗОЛОТО. ПОЛИМЕТАЛЛЫ. XXI ВЕК: УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ». 2022. С. 55–57.

18. Цупкина М.В. Исследование физико-механических свойств старогорных отходов обогащения медно-колчеданных руд как основа обоснования параметров их разработки // Материалы конференции Международной научной школы академика К.Н.Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр». – М.: ИПКОН РАН. - 2022. С. 233–236.

19. Каплунов Д.Р., Цупкина М.В. Принципы обоснования геотехнологических решений по эксплуатации техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд. Материалы XII Международной конференции «Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых» 2023. С. 99–101.