

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
проблем комплексного освоения недр им. Академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук**

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

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

профессор, доктор технических наук

М.В. Рыльникова

Москва 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА ОЦЕНКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ИЗ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНО-КОЛЧЕДАНЫХ РУД В СВЕТЕ ПЕРСПЕКТИВ ПОВЫШЕНИЯ ПОЛНОТЫ И КОМПЛЕКСНОСТИ ОСВОЕНИЯ НЕДР	13
1.1. Условия формирования и эксплуатации хранилищ отходов переработки руд	13
1.2. Особенности преобразования в ходе окислительно-восстановительных процессов вещественного состава, структуры и свойств техногенного сырья из отходов переработки медно-колчеданных руд.....	25
1.3. Систематизация современных подходов к разработке старогодних хранилищ отходов переработки руд с целью вовлечения техногенного сырья в промышленный передел.....	35
1.4. Анализ условий формирования и результаты исследований горно-геологических особенностей старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики.....	45
1.5. Цели, задачи и методы исследования	48
ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ГЕОТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ХРАНИЛИЩ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНО-КОЛЧЕДАНЫХ РУД С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ СЕГРЕГАЦИИ, ЦЕМЕНТАЦИИ И ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ.....	53
2.1. Формирование научно-методического подхода к районированию техногенных образований из отходов переработки медно-колчеданных руд, определяющего режим горных работ	53
2.2. Разработка методики комплексного изучения старогодних хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд в динамике вторичного минералообразования	64

2.3. Комплексное исследование старогоднего хранилища отходов переработки медно-колчеданных руд Сибайской обогатительной фабрики в динамике вторичного минералообразования	70
2.4. Классификация технологических схем эксплуатации хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд и условий их применения	92
Выводы по главе 2.....	103
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИБАЙСКОГО СТАРОГОДНЕГО ХРАНИЛИЩА И ПРЕДСТАВЛЕННОГО В НЕМ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА ЭКСПЛУАТАЦИИ	106
3. 1. Методика и результаты исследования физико-механических свойств лежалых отходов обогащения медно-колчеданных руд, и определение характера их изменения в старогоднем хвостохранилище.....	106
3. 2. Систематизация особенностей преобразования состава и свойств техногенного минерального сырья, определяющих порядок и условия освоения техногенного минерального образования	117
3. 3. Обоснование режима горных работ, предусматривающего реализацию подхода использования техногенных георесурсов, сопряженных с природными месторождениями, для повышения полноты и комплексности освоения недр	122
3. 4. Алгоритм выбора приоритетной последовательности производства горных работ при эксплуатации техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд на базе исследования протекающих в них окислительных процессов.....	128
Выводы по главе 3	131
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ	133

4. 1. Обоснование приоритетного порядка разработки старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики.....	133
4. 2. Обоснование выбора горнотехнического оборудования для разработки старогоднего Сибайского хвостохранилища, сформированного из отходов обогащения медно-колчеданных руд	136
4. 3. Обоснование режима развития горных работ при разработке старогоднего хранилища отходов переработки медно-колчеданных руд Сибайской обогатительной фабрики	146
4. 4. Оценка экономической эффективности разработки Сибайского хвостохранилища совместно с природным месторождением.....	150
Выводы по 4 главе	153
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	155
Список литературы	158

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и исследование дополнительных источников минерального сырья является одним из самых актуальных направлений развития современной горнодобывающей промышленности, обеспечивающих пополнение минерально-сырьевой базы России, что является важнейшей составляющей экономического развития индустриальных стран. Анализ современного состояния минерально-сырьевой базы РФ свидетельствует о том, что интенсивная отработка высокорентабельной приповерхностной части большинства эксплуатируемых 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 цветных, драгоценных и редких металлов, является рациональное и комплексное использование ресурсов недр Земли. В мировой практике комплексного освоения недр прослеживаются перспективные направления, связанные с управлением отходами горной промышленности путем их использования в различных сферах. Также важно отметить, что 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 создает угрозу жизнедеятельности растительных и животных организмов в горнопромышленных регионах, но и приводит к потере качества техногенного минерального сырья при его хранении в результате миграции из хвостохранилищ в окружающую среду ценных для промышленности и токсичных для жизнедеятельности организмов компонентов.

В связи с тем, что уровень экологического воздействия хвостохранилищ на экосистему регионов имеет прямую зависимость с технологией и продолжительностью складирования и хранения отходов [92], особую опасность представляют старогодние отходы переработки руд, складирование которых происходило десятки лет назад.

Среди огромного количества источников загрязнения окружающей среды следует выделить отходы переработки медно-колчеданных руд, так как именно они представляют высокий класс опасности. Это обусловлено тем, что активное окисление минералов в процессе хранения в хвостохранилище ввиду наличия в вещественном составе 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 последующей миграцией тяжелых металлов в окружающую среду. Это свидетельствует о необходимости скорейшего принятия и внедрения технологических рекомендаций по утилизации лежалых хвостов обогащения медно-колчеданных руд с обоснованием возможности их вторичного промышленного использования.

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

Резюмируя вышесказанное, стоит отметить, что 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 и восстановление нарушенных в результате

освобождения территорий от складированных отходов обогащения медно-колчеданных руд.

Однако наибольший эффект от освоения старогодних техногенных образований может быть достигнут лишь при обосновании режима горных работ, в основу которого должны быть заложены результаты предварительных комплексных исследований состава, структуры и свойств техногенных образований, на базе которых будет произведено районирование разрабатываемого объекта и определен порядок его разработки.

Комплексный подход к исследованию техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд, а также установленные закономерности преобразования состава, структуры и свойств техногенного материала при его хранении позволят определить режим ведения горных работ, обеспечивающий планомерную, безопасную и эффективную разработку таких объектов. Таким образом, обоснование технологических решений по утилизации посредством эффективного и своевременного вовлечения техногенных минеральных образований, сформированных в период складирования и хранения отходов переработки медно-колчеданных руд, является актуальной научно-практической задачей, решение которой позволит обеспечить устойчивое функционирование горнопромышленных предприятий и снизить экологические последствия их деятельности.

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.

Основными задачами исследования являлось:

- 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.

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

Предмет исследования: закономерности изменения состава и свойств техногенного сырья по глубине и площади техногенного объекта, с учетом распространения зоны гипергенеза, а также особенностей характеристик сырья, определяющих выбор технологии разработки техногенного образования, сформированного в результате складирования и хранения отходов переработки медно-колчеданных руд.

Научные 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.

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.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций 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.

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 спектрометрии; 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 (ГГИС Micromine).

Апробация результатов. 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. Результаты проведенных исследований опубликованы в 19 научных работах, в том числе 6 статей – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Российской Федерации, рецензируемых в международных базах Scopus и Web of Science.

Структура и объем 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.

ГЛАВА 1. ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА ОЦЕНКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ИЗ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНО- КОЛЧЕДАНЫХ РУД В СВЕТЕ ПЕРСПЕКТИВ ПОВЫШЕНИЯ ПОЛНОТЫ И КОМПЛЕКСНОСТИ ОСВОЕНИЯ НЕДР

1.1. Условия формирования и эксплуатации хранилищ отходов переработки руд

Горнодобывающий и перерабатывающий комплекс горнопромышленных стран является важнейшей составляющей ее экономического развития, а его интенсивную деятельность по масштабам и глубине воздействия на окружающую среду можно приравнять к мощному инициатору преобразования геосферы в техногеосферу.

Продолжительная деятельность горных предприятий по переработке полезных ископаемых сопровождается формированием техногенных минеральных образований посредством складирования отходов добычи и переработки руд. В странах ЕС образование отходов на душу населения составляет в среднем 6 т (160 кг на единицу ВВП) [29], а в России — 34,5 т (3810 кг на единицу ВВП на душу населения, 2015 г.). Для горнорудного предприятия средней производительности требуется земельный отвод, площадью 2–3 тыс. га. С учетом влияния ветров и миграции вод площадь, подвергаемая влиянию, увеличивается в 10–15 раз [86, 39].

Как показывает анализ общего мирового тренда, объемы накопления отходов горной промышленности непрерывно растут из года в год (рисунок 1.1).



Рисунок 1. 1. Динамика образования отходов горной промышленности в России, 2010–2018 гг., млн т

Это объясняется тем, что рост объемов извлечения рудной массы, сопровождаемый широкомасштабным бессистемным складированием отходов горнопромышленных производств, приводит к потере ценных компонентов, не извлеченных при первичной переработке руд, а также ухудшению экологических показателей в районах расположения таких объектов.

Кроме того, бессистемное складирование отходов сопровождается отведением значительных площадей под их хранение, что приводит к изменению рельефа, частичному нарушению инженерно-геологических, гидрогеологических и эколого-геологических условий горнопромышленного района [83]. К тому же, вследствие длительного складирования техногенного сырья ввиду естественного выщелачивания в отвальных породах значительно снижается содержание ценных компонентов. Например, за длительный период хранения отвалов, от 20 и более лет с момента их формирования, отвальными водами и посредством пыления поверхности хвостохранилищ в поверхностном слое в окружающую среду выносятся практически все основные компоненты, как ценные, так и токсичные [52]. В целом продолжительное хранение отходов обогащения вызывает экологические и экономические риски (рисунок 1.2).

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ	ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РИСКИ
<ul style="list-style-type: none"> • миграция токсичных элементов в окружающую среду путем: <ul style="list-style-type: none"> – прорыва вод отстойного пруда хвостохранилища в нижний бьеф по грунтам основания – прорыва дамбы – пыления поверхности хвостохранилища • пагубное воздействие на здоровье человека и растительный и животный миры • изъятие и потеря природных и промышленных земель • утрата лесного ландшафта и природных систем 	<ul style="list-style-type: none"> • затраты на сооружение и содержание хвостохранилищ • устранение катастрофических, местных и локальных аварий • потеря потенциального минерально-сырьевого ресурса • затраты на проведение мониторинга окружающей среды • средства контроля рисков и связанные с ними проверочные меры • утрата значительного количества плодородных земель

Рисунок 1. 2. Экологические и экономические риски, обусловленные бессистемным складированием и хранением отходов переработки руд

Одной из важнейших проблем эксплуатации техногенного сырья является отсутствие в базовых и рабочих проектах, составляемых в период

функционирования горных производств, уточнения данных об основных количественных и качественных характеристиках некондиционного сырья, в том числе, в динамике его складирования и хранения. Также весьма важно, что в условиях освоения месторождений твердых полезных ископаемых параметрам формирования хвостохранилищ уделяется особое внимание, регламентированное нормами эксплуатации и требованиями экологических служб, лишь с позиций экономической эффективности – наиболее экономичного складирования отходов. Однако при прекращении эксплуатации хвостохранилища вследствие завершившейся работы горно-обогатительного комплекса в целом или перехода на новое место складирования внимание к техногенным отвалам ослабевает [90].

Значительная часть таких техногенных объектов по окончании их наполнения была заброшена, что привело к серьезным экологическим и социальным последствиям. Поэтому объемы техногенных образований, сформированных в прошлом столетии в результате переработки руд без учета их дальнейшего использования, представляют собой значительную угрозу экосистемам горнопромышленных регионов [89]. Так, например, в районах размещения хвостохранилищ происходит образование дренажных вод, что способствует миграции в водные объекты региона значительного количества не только потенциально опасных элементов таких, как ртуть, сера, мышьяк, бериллий, марганец, хром, кадмий, таллий и пр., но и ценных компонентов, не извлеченных при первичной переработке руд.

Явное негативное воздействие на экосистемы горнопромышленных регионов и потеря ценных компонентов ввиду их миграции их отвалов в результате длительного хранения отходов требуют разработки рекомендаций, способных обеспечить решение этого вопроса посредством ликвидации техногенных образований с учетом перспектив дальнейшего промышленного использования отходов горнопромышленного комплекса.

В отечественной практике, начиная с начала 80-х годов 20-го века, развивается научная идея комплексного освоения недр, целенаправленного формирования и изменения характеристик техногенных ресурсов с целью

обоснования целесообразности и перспектив на фоне истощения основных природных минеральных ресурсов вовлечения в промышленный цикл горнодобывающего производства [57, 99].

Вопросам использования техногенных минеральных ресурсов в свете комплексного освоения недр посвящены исследования ведущих ученых, среди которых [114, 94, 111]: академики АН СССР и РАН М.И. Агошков, А.А. Барях, В.Н. Захаров, М.В. Курленя, Н.В. Мельников, К.Н. Трубецкой, В.В. Ржевский, член-корреспондент РАН Д.Р. Каплунов, доктора наук С.Е. Гавришев, А.М. Гальперин, О.Е. Горлова, В.С. Литвинцев, А.Б. Макаров, И.П. Маляров, И.А. Пыталев, М.В. Рыльникова, Г.В. Секисов А.Г. Талалай, В.Н. Уманец, И.В. Шадрунова, С.И. Фомин, Г.А. Холодняков и другие ученые.

Академиками М.И. Агошковым и Н.В. Мельниковым еще в 60-е годы XX века было определено направление исследований, связанное с изучением и рациональным применением техногенных минеральных ресурсов. В дальнейшем оно получило достаточно широкое распространение в научных трудах академика К.Н. Трубецкого, член.-корр. Д.Р. Каплунова и проф. М.В. Рыльниковой. Авторы обосновали в своих работах новую в то время научно-производственную категорию минеральных георесурсов, включающих в себя природные, природно-техногенные и техногенные минеральные образования, представленные соответствующим природным, техногенно измененным и техногенным сырьем.

К.Н. Трубецкой на ранних стадиях изучения проблемы освоения техногенных минеральных образований особое внимание уделял условиям их формирования и эксплуатации, а также качеству отходов переработки руд [100, 101]. Это было обусловлено тем, что на протяжении долгих лет в ходе первичной переработки руд из них извлекались исключительно основные полезные компоненты, находящиеся в необходимом качестве и количестве, представляющем промышленный интерес, остальные неизлеченные полезные компоненты складировались вместе с хвостами в хранилища.

Таким образом, научный интерес к изучению техногенных минеральных образований обусловлен следующими факторами:

– мировое потребление минерального сырья непрерывно растет в связи с увеличивающимся спросом на металлы и нерудные материалы, причем, наблюдается тенденция одновременного снижения качества вовлекаемых в эксплуатацию полезных ископаемых;

– в различных сформированных на поверхности техногенных минеральных образованиях накопилось огромное количество отходов, занимающих при складировании значительные территории вблизи горнопромышленных городов и пагубно влияющих на окружающую среду горнопромышленных районов;

– содержание полезных компонентов, поступающих в хранилища после переработки руд и перераспределяющихся по завершению эксплуатации горнопромышленных объектов, зачастую сопоставимо с концентрациями ценных компонентов в вовлекаемых в настоящее время природных месторождениях;

– накопление техногенного сырья в хранилищах происходит непрерывно;

– как правило, техногенные минеральные образования имеют весьма благоприятное географическое расположение для последующего освоения, так как находятся вблизи действующих градообразующих горнодобывающих предприятий с развитой инфраструктурой.

Однако сегодняшние условия формирования хранилищ отходов не позволяют обеспечить комплексное использование техногенного сырья в будущем, поскольку его бессистемное складирование без учета особенностей преобразования состава и свойств техногенного материала в процессе формирования и хранения затрудняет его выемку и повторную переработку. Поэтому возможность дальнейшего использования отходов переработки руд как минерально-сырьевого источника может быть обеспечена лишь с помощью разработки рациональных решений экономических, экологических, технологических, организационных и социально-эстетических задач по управлению хранилищами отходов с учетом горно-геологических особенностей техногенных минеральных объектов [59, 84].

Несмотря на актуальность темы, не существуют утвержденного перечня универсальных стратегий и доступных технологий в области обращения с отходами горнопромышленного комплекса. Поскольку каждый отдельный случай или проект должен быть индивидуально проанализирован и оценен с учётом таких факторов как:

- географо-экономические условия освоения района (наличие необходимой инфраструктуры, и т.п.);
- технологические свойства (вовлечение техногенного сырья на определенном этапе научно-технического развития общества);
- экономическая эффективность технологических решений;
- экологические риски как при хранении, так и при вовлечении в эксплуатацию отходов.

В России существуют примеры эксплуатации техногенных образований с вовлечением техногенного сырья в промышленный оборот [97]. Так, например, в Мурманской области ведется доизвлечение ценных компонентов из отходов обогащения Хибинских апатитовых месторождений с получением апатитового и бадделеитового концентратов; в Бурятии из лежалых хвостов переработки руд Джидинского ГОКа извлекают товарный вольфрам [103]; на Дальнем Востоке разработаны проекты доизвлечения россыпного золота из эйфелевых отвалов с получением концентрата, содержащего до 95% золота.

Кроме этого, авторами [56] разработаны методические принципы обоснования параметров техногенных минеральных образований при открытом способе разработки месторождений и предложена методика определения рационального уровня и сроков вовлечения техногенных запасов в переработку. Предложены экономико-математические модели, позволяющие оптимизировать основные параметры формируемых техногенных минеральных образований [102]. Разработанные методика, алгоритмы и программы были успешно реализованы при оптимизации параметров техногенных месторождений, формируемых из отходов добычи и переработки руд при освоении открытым способом месторождения

Чекмарь Лениногорского полиметаллического комбината и месторождения Ушкатын-III Жайремского ГОКа.

Основные сложности вовлечения связаны с тем, что складирование отходов проводилось без учета технологических характеристик техногенного сырья с возможностью его последующего использования, а лишь с учетом двух основных факторов: минимума затрат на складирование техногенного сырья и обеспечения механической устойчивости откосов отвалов [100]. Поэтому на сегодняшний день отсутствие данных о составе, свойствах и строении техногенных образований вызывает необходимость их получения, что может быть осуществлено лишь в ходе комплексных исследований с учетом первичной информации об отходах переработки и особенностях их преобразования в ходе хранения.

Все это определяет необходимость рассмотрения техногенных образований как сложных объектов, а обоснование их разработки должно базироваться на предшествующих исследованиях состава и свойств на момент вовлечения в эксплуатацию и определять последовательность горных работ, обеспечивающих планомерность и эффективность разработки в аспекте комплексного освоения недр.

Анализ опыта зарубежных стран по управлению отходами горно-перерабатывающих производств доказывает, что в мировой практике степень рациональности использования отходов значительно выше [35]. Так, с 2010 года Европейская комиссия установила перечень критических сырьевых компонентов с высоким риском поставок и обеспечения в экономическом контексте [9]. Таким образом, Европейская директива преследует цель оказания поддержки в разработке технологий, способствующих увеличению производства товарного сырья.

В целом все способы управления сформированными отвалами в развитых странах делятся на две обширные группы: 1) подавление активности химических элементов методом консервации хвостохранилищ или сгущения хвостов; 2) полная очистка, предусматривающая удаление вредных компонентов или общую утилизацию отходов рудообогащения. Преимущества и недостатки выделенных

концепций управления отходами добычи и переработки руд систематизированы в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Основные концепции управления отходами добычи и переработки руд

Направления управлением отходами	Преимущества	Недостатки
<p>Подавление активности вредных веществ консервацией или сгущением хвостов</p>	<p>приостановление процессов окисления в массиве хвостохранилища за счет ограничения доступа кислороду; стабилизация токсичных элементов; снижение экологической нагрузки</p>	<p>провалы подстилающих пород, обусловленные избытком воды в массиве хвостохранилища; потеря перспективного источника техногенно-минерального сырья; потеря обширных земельных участков; затраты на поддержание условий хранения</p>
<p>Полная очистка, предусматривающая удаление вредных веществ или утилизацию отходов переработки руд</p>	<p>возможность вовлечения в промышленный передел потенциального источника минерального сырья; применение некондиционного материала хвостохранилища в строительстве и закладке; возможность рекультивации территорий после ликвидации отходов и дальнейшее хозяйственное использование; снижение экологической нагрузки</p>	<p>значительные затраты на налогообложение, вовлечение и рекультивацию при освоении хвостохранилищ</p>

Стоит отметить, что достаточно продолжительное время в передовых странах техногенные георесурсы активно используются не только в строительной промышленности, но и для дополнительного извлечения цветных, редких и драгоценных металлов, что доказывает перспективы вовлечения техногенного сырья в промышленный передел и в результате позволяет повысить экономическую эффективность предприятий и улучшить экологию горнопромышленных регионов [107, 110].

С точки зрения экономической эффективности следует отметить, что многообразие ценных компонентов и специфических свойств отходов обогащения приводят к необходимости комплексной оценки ресурсного потенциала техногенного образования и разработки технологических и управленческих решений по его эффективному вовлечению в эксплуатацию.

Одним из основных решений, принимаемых при проектировании системы разработки и обеспечивающих ее эффективность, является решение, определяющее последовательность отработки запасов месторождения. В связи с этим обоснование последовательности выполнения вскрышных и добычных работ, обеспечивающей планомерную, безопасную и экономически эффективную разработку хвостохранилища, т.е. режима горных работ позволит осуществить разработку техногенных образований с обеспечением комплексного извлечения ценных компонентов с целью окупаемости затрат на разработку.

Проблемы регулирования режима горных работ широко исследованы в работах известных ученых и специалистов. В русскоязычной научной литературе вопросы исследования режима горных работ представлены в трудах А.И. Арсентьева, В.В. Ржевского, В.С. Хохрякова, М.Г. Новожилова, В.Н. Сидоренко, С.В. Гавришева. В Казахстане этими вопросами занимались Б.Р. Ракишев, Д.Г. Букейханов, С.Ж. Галиев, А.Ф. Цеховой [62]. Однако большинство работ ведущих ученых связаны с исследованием режима горных работ на карьерах, а не на хвостохранилищах.

Взаимосвязь совокупного использования природных и техногенных георесурсов с режимом горных работ рассмотрена в работе И.А. Пыталева [82]. По мнению автора, в отличие от действующей сегодня концепции, подразумевающей – следование за залежью полезных ископаемых, с целью максимального извлечения запасов при достижении минимальных затрат на выполнение вскрышных работ, в рамках предлагаемого подхода вскрышные работы рассматриваются как неотъемлемая часть формирования продукции горнодобывающего предприятия, не связанной с добычей полезных ископаемых [41].

Стоит отметить, что в связи с актуальностью разработки техногенных образований, а также особенностями их строения и наличия в них слоев с различными качеством и технологическими характеристиками техногенного сырья, что обусловлено преобразованием при хранении, понятие режима горных работ может быть применено и в этом случае. А обоснование режима горных работ на

хвостохранилищах позволит обеспечить их планомерную, безопасную и экономически эффективную разработку с учетом отличающихся в пределах техногенного образования грунтов.

Среди значительного количества формируемых техногенных минеральных образований, как в мировой, так и в отечественной практике, особый интерес представляют хранилища отходов переработки медно-колчеданных руд, что, с одной стороны, связано с их высокой экологической опасностью для окружающей среды [81], с другой – тем, что при добыче и обогащении руд цветных металлов теряется в среднем около 15% золота и серебра, 25 % никеля и 15% меди, потери кобальта доходят до 40%, 20-25% цинка, 10-15% молибдена и свинца и других попутных компонентов [42].

Большая часть хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд в нашей страны была сформирована в результате освоения природных месторождений, открытых на территории Южного Урала. В среднем на Урале, по данным на начало 21 века, ежегодно складировалось 6,5 млн т хвостов обогащения медно-колчеданных руд. В общей сложности в регионе накоплено 220 млн т хвостов обогащения [60]. В настоящее время эти объемы складирования техногенного сырья постоянно растут.

Характеристика хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд месторождений Южного Урала представлена в таблице 1.2. Кроме того, согласно обобщенным данным исследований, вещественный состав систематизирован в таблице 1.3.

Все это предопределяет необходимость рассмотрения техногенных образований как резерва сырьевой базы действующих горно-обогатительных комбинатов, использование которой возможно и должно осуществляться в связи с истощением природных минеральных запасов уже на этапе проектирования освоения месторождений [53].

В большинстве случаев такие хранилища формировались в результате намыва на небольшом удалении от обогатительных фабрик, чаще в депрессиях или на пониженных участках рельефа. Такие хранилища, как правило, представляют

собой пологопадающие емкости, мощностью 100 м и более, и имеют изометрическую или вытянутую форму в плане, что свидетельствует о несложных горно-геологических условиях.

Таблица 1.2. Характеристика хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд Южного Урала

Наименование	Хвостохранилище				
	Башкирский медно-серный комбинат		Учалинский ГОК	Бурибаевское РУ	Гайский ГОК
	Новое	Старое			
Площадь, га	146,2	23,5	113	31	190
Мощность вертикальная, м	до 25	до 22	до 21	до 18	до 40
Влажность, %	до 40	до 29	-	-	-
Длина, м	1560	740	1700	600	-
Ширина, м	600	350	750	600	-
Форма в плане	Вытянутая	Вытянутая	Вытянутая	Изометрическая	-
Тип хвостохранилища	Косогорный	Косогорный	Косогорно-равнинный	Косогорный	-
Период эксплуатации, г	1966–2005	1959–1966	1969-наст. вр.	1942-наст. вр.	до 2010

Таблица 1.3. Содержание основных ценных компонентов в хранилищах отходов переработки руд Южного Урала

Обогащительная фабрика	Содержание элементов					
	Медь, тыс.т	Цинк, тыс.т	Сера, тыс.т	Железо, тыс.т	Золото, тыс.т	Серебро, тыс.т
Гайская	120	92	10640	5548	32	160
Бурибаевская	24,84	11,55	1412,6	1276,2	6,62	56,8
Учалинская	89,7	257,04	6306,3	8050,8	16,38	232,05
Сибайская	34,4	89,44	3646,4	5899,6	13,84	344
Всего:	239,3	326,83	22005,3	20774,6	68,84	792,85

Наиболее представительные типовые схемы формирования намывных хранилищ отходов переработки руд представлены на рисунке 1.3. Рассмотренные типовые схемы не способны в полной мере обеспечить формирование хранилищ отходов с сохранением и контролем вещественного состава и качества как потенциальных дополнительных минеральных источников с возможностью их вовлечения в эксплуатацию в период доработки балансовых запасов месторождений и выбывания мощностей горнодобывающих предприятий,

поскольку бессистемное формирование техногенных объектов не позволяет спрогнозировать изменение состава и свойств техногенного сырья при его складировании и хранении.

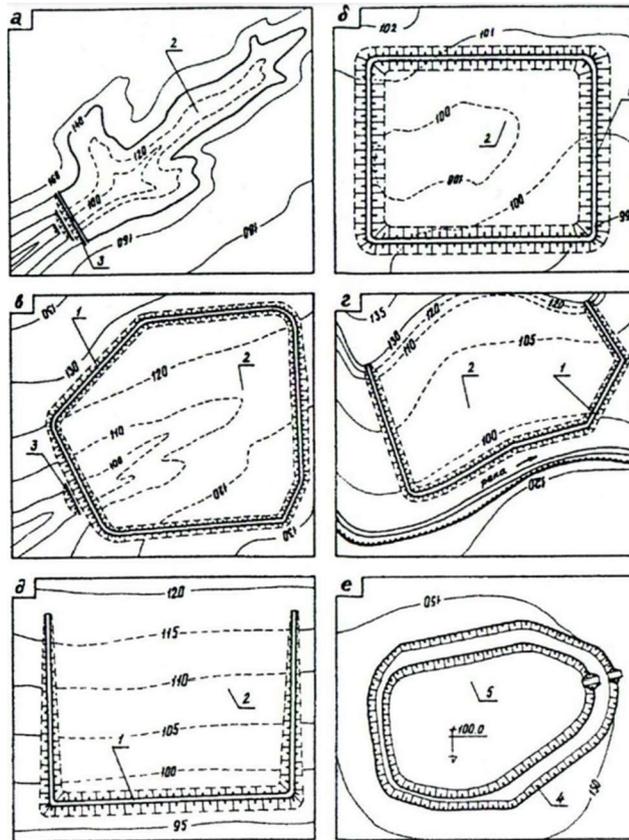


Рисунок 1. 3. Типовые схемы формирования намывных хранилищ отходов переработки руд: 1 — дамба обвалования; 2 — зона размещения хвостов; 3 — упорная плотина; 4 — уступы карьера; 5 — выработанное пространство [36]

Поэтому ввиду отсутствия современных данных о строении таких техногенных образований, а также сведений о составе и свойствах техногенного сырья, преобразованных в результате хранения отходов обогащения, обоснование режима горных работ для разработки бессистемно сформированных в прошлом столетии техногенных минеральных объектов должно базироваться на результатах их комплексного исследования, в результате которого будет произведено районирование объекта с учетом полученных данных о закономерностях преобразования характеристик техногенного сырья в его пределах. Таким образом, обоснованием режима горных работ на старогондних техногенных образованиях, а также разработкой рекомендаций по целенаправленному формированию таких

объектов с обеспечением заданных характеристик техногенного сырья, является актуальной научно-практической задачей и на сегодняшний день.

1.2. Особенности преобразования в ходе окислительно-восстановительных процессов вещественного состава, структуры и свойств техногенного сырья из отходов переработки медно-колчеданных руд

Сформированные техногенные образования из отходов переработки медно-колчеданных руд, в отличие от других геолого-промышленных типов, имеют ряд специфических особенностей и характеризуются интенсивным преобразованием вещественного состава и физико-химических, физико-механических и технологических свойств.

Как правило, при обогащении медно-колчеданных руд наибольшее распространение имеет технология флотации. На выходе хвосты флотации представляют собой тонкодисперсную массу с содержанием фракции 0,074 мм 40–80%, фракции 0,15 мм – 50–80%, при средней плотности 1,3–2,9 г/см³ [65]. В отходах переработки медно-колчеданных руд содержится до 25 ценных компонентов. Кроме минералов меди, отмечается наличие минеральных форм Se, Te, In, Ge, Cd, As, Bi, Co, Au, Ag, Mo, Zn, S и Fe. При обогащении в медный концентрат извлекаются Te, Cd, Au, Co, Zn, In, Ag и Pb [65]. В пиритный концентрат извлекаются Cu, As, Pb, Zn, In, Se, Te, Ag, Cd и Au. Однако при переработке золото и серебро преимущественно теряются с пиритным концентратом и с хвостами переработки руд [64].

Как правило, на месторождениях медно-колчеданных руд большинство ценных элементов не образуют самостоятельных минералов, а изоморфно входят в кристаллические решетки сульфидных минералов, в частности – пирита, халькопирита и сфалерита [46]. Таким образом, ввиду богатого минерального состава и, благодаря однородности, уже дробленого, часто фракционированного материала, полученного, как правило, в ходе переработки мокрыми способами обогащения, такое техногенное минеральное сырье представляет особую ценность и перспективу эффективного использования в промышленности [64].

Характерными процессами, влияющими на изменение свойств и структуры техногенных минеральных образований их отходов переработки руд, являются сегрегация и цементация слагающего минерального сырья, а также образование вторичных минералов.

Согласно данным из работы [65], общими закономерностями для хранилищ хвостов обогащения руд цветных металлов с использованием флотации установлены:

- в нижних частях хвостохранилищ отмечается повышение концентрации благородных металлов, что связано с отработкой более богатых руд на ранних стадиях освоения месторождений, а также просадкой тяжелых фракций хвостов; кроме того, отмечается резкое обогащение золотом мест поступления (слива) пульпы в гидроотвал;

- золото находится в свободном виде или связано с сульфидными минералами;

- золото, высвобождающееся в процессе окисления из сульфидных минералов, может быть сосредоточено в верхней части техногенного массива до момента его гравитационного перемещения в нижележащие слои;

- содержание благородных металлов повышается в мелких и тонких фракциях вещества хвостов;

- интенсивность процессов окисления сульфидных минералов хвостов зависит от уровня грунтовых вод, процента сульфидной составляющей и наличия сульфатредуцирующих бактерий.

С позиций формирования хвостохранилищ следует учитывать, что в процессе намыва из пульповода происходит гравитационная дифференциация твердой фазы пульпы. Поэтому для места выпуска пульпы характерна наибольшая скорость потока, в связи с чем именно в этой зоне откладываются более тяжелые и наиболее крупные частицы. По мере продвижения потока и уменьшения его скорости осаждаются более легкие частицы вплоть до уреза воды пруда осветления, где стекают в основном илистые и коллоидные фракции хвостов переработки руд цветных металлов.

Так, техногенное сырье всегда отличается от природных полезных ископаемых минералогическими характеристиками минералов, образующихся в зонах гипергенеза, и является технологически сложным объектом для переработки [75]. Кроме того, в процессе складирования и хранения отходов обогащения ввиду влияния различного рода факторов происходит преобразование структуры, состава и свойств техногенного сырья, поэтому с позиций геологического строения старогодние хранилища отходов являются сложными для изучения объектами. Например, в процессе намыва хвостов возникают макро- и микрослоистые текстуры, образование которых обусловлено особенностями технологии намыва и турбулентностью взвесенесущего потока, соответственно

Еще одной структурной особенностью таких объектов является характерно выраженная слоистость. В мировой практике также отмечены подобные случаи. В работе [4] описаны исследования двух заброшенных старогодних хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд методом флотации. В ходе опробования материала хвостохранилища авторами исследований были выявлены две фракции техногенного сырья: одна – окисленная, с характерным желтым цветом, и вторая – не окисленная, с преобладанием серого оттенка (рисунок 1.4).

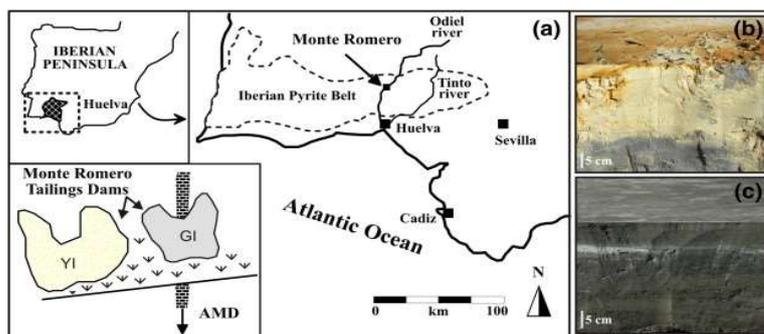


Рисунок 1. 4. (a) Карта рудника Монте-Ромеро (юго-запад Пиренейского полуострова) и вид сверху двух хвостохранилищ. Полевые изображения разрезов выработок с различными фракциями YI (b) и GI (c) [4]

Причем, несмотря на схожие условия образования, окисленная фракция была выделена лишь в разрезе одного хвостохранилища. По мнению автора [4], это связано с разницей массовой доли сульфидных минералов в текущих хвостах при складировании отходов в хвостохранилище.

В работе [11] хвосты переработки медно-колчеданных руд (рисунок 1.5) были собраны по профилю выветривания через 50 лет после отложения, что позволило оценить, как преобразование минералов связано с изменением состава основных элементов (железа и серы) во время окислительного выветривания в полусухом климате.

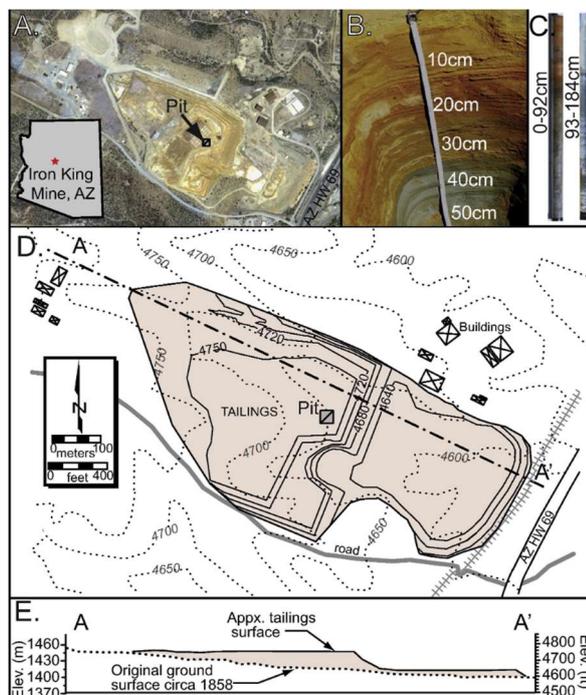


Рисунок 1. 5. Карта и разрез Дьюи-Гумбольдт, Аризона. (А) Вид с воздуха на хвостохранилище (из Google Earth TM), (В) яма до 55 см, (С) керны до 185 см, (D) карта участка и (Е) поперечное сечение отвала, содержащего 3,9 млн м³ хвостов [11]

Результаты этого исследования показали, что при малом потоке воды, связанном с полусухим климатическим воздействием, выветривание хвостов сульфидных рудников может привести к протеканию реакции в непосредственной близости (<2м) от поверхности. По мнению авторов [11], хвосты, расположенные ниже этой глубины, имеют первоначальный вид и состав.

Таким образом, характерная для хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд слоистая структура доказывает необходимость комплексных исследований таких техногенных образований, поскольку различный состав и свойства выделенных фракций обуславливают необходимость детального геологического моделирования на базе результатов геологической оценки, что позволит выделить зоны с различными особенностями вещественного состава и

свойств техногенного сырья, оказывающих влияние на обоснование как способа разработки, так и технологических параметров обогащения различных фракций сырья.

Также необходимо учитывать, что распределение в отходах ценных компонентов и их минеральный состав постоянно изменяется с течением времени, что обусловлено протеканием окислительно-восстановительных процессов с образованием зоны гипергенеза. Глубина развития такой зоны ограничивается диффузией кислорода с поверхности. Также немаловажно, что со временем глубина распространения окисленного слоя увеличивается и, следовательно, происходит изменения основных технологических свойств техногенного сырья в верхней части массива хвостохранилища, которые необходимо учитывать при выборе способа разработки хвостохранилищ.

Несмотря на то, что за последние полвека накопился огромный материал результатов геолого-минералогических исследований гипергенеза, развитие современной концепции этого процесса, опирающейся на достижения науки, сдерживается отсутствием единой теоретической концепции, необходимой согласованности понятий и терминов, а также методологических определений [115]. Как правило, характеристики зоны гипергенеза зависят от ряда влияющих на окисление факторов. Анализ научной литературы позволил определить, что скорость и особенности протекания таких процессов зависят от трех групп факторов [91]:

- свойств минеральной составляющей (тип, минеральный и химический составы техногенного сырья, размер и площадь поверхности частиц, пористость, гидрофобность, гальваническое взаимодействие и формирование вторичных минералов);

- физико-химических свойств (температура, водородный показатель, окислительно-восстановительный потенциал, доступность и концентрация кислорода, углекислого газа и питательных веществ, массообмен, освещенность, давление, поверхностное натяжение, присутствие ингибиторов);

– микробиологических свойств (биоразнообразие, плотность и активность клеток популяции, устойчивость к металлам и адаптационная способность микроорганизмов).

Также следует обратить внимание на стадийность окислительных процессов, характеризующуюся различными характеристиками. Согласно [95] развитие зоны окисления сульфидных руд можно разделить на следующие стадии, определяемые изменением рН растворов в сторону возрастания по мере убывания сульфидов:

– начальная стадия (1) – начало изменения сульфидных минералов, мало растворимых новообразований;

– средняя стадия (2) – когда большинство сульфидов окислено, сульфаты преобладают как в растворах, так и в твердой фазе;

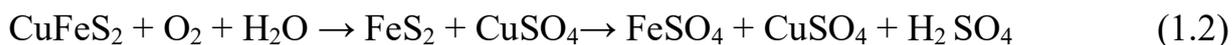
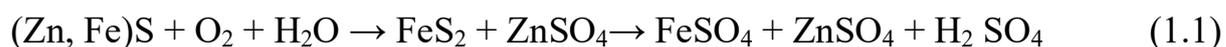
– заключительная стадия (3) – сульфидных минералов практически нет, сокращается количество сульфатов, рост количества карбонатов, ярозитовая корка.

Механизм изменения технологических характеристик утилизируемых хвостов обогащения представляется следующим. На первой стадии гипергенных преобразований гипогенных минералов в хвостохранилищах преобладают процессы растворения [78]. Из таблицы 1.4 следует, что быстрее всего распадается кристаллическая решетка сфалерита, наиболее устойчив к растворению халькопирит.

Таблица 1.4. Характеристика распада кристаллической решетки сульфидов

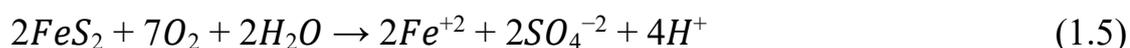
Минерал	$-\lg K_{SP}/n$	S_0/V_0
Сфалерит ZnS	12,27	0,59
Галенит PbS	12,85	0,69
Пирит FeS ₂	14,77	0,53
Халькопирит CuFeS ₂	15,28	0,73

Стоит отметить, что устойчивость сульфидов в условиях кислых сред (рН < 3) увеличивается в ряду: сфалерит–халькопирит–пирит, а разложение их в общем виде происходит по реакциям:



Под воздействием активных агентов водонерастворимые сульфиды окисляются до окислов, гидроокисей и сульфатов. Подкисленные растворы растворяют эти соединения, переводя медь, цинк и железо в раствор в виде сульфатов [2, 23, 25].

Так, в присутствии кислорода и воды происходит окисление сульфидов с последующим выделением сульфатных анионов (SO_4^{-2}) и Fe^{+3} [33]. Причем, сульфаты Fe чаще встречаются при кислом pH среды.

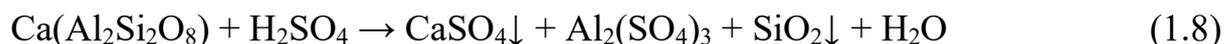


Микроэлементы, которые встречаются в качестве примесей в пирите, также могут высвободиться в результате его окисления (1.5). Например, пирит является весьма распространенным носителем таких микроэлементов, как Pb, Sb, Bi, Cu, Co, Ni, Zn, Au, Ag, Se и Te [91, 3].

Процесс окисления минералов и переход их в растворимые формы может быть приостановлен, за счет образования на поверхности окисляемых рудных минералов сплошной пленки из сульфатов трехвалентного железа по реакции [77],

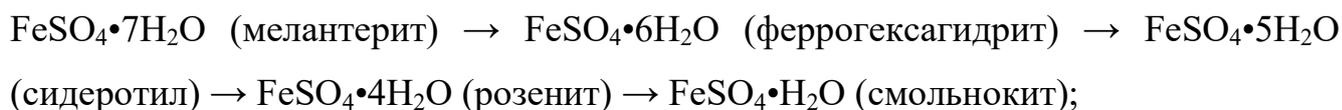


Полевые шпаты и карбонаты разлагаются с образованием кварца и водорастворимых гидроксидов по реакциям:

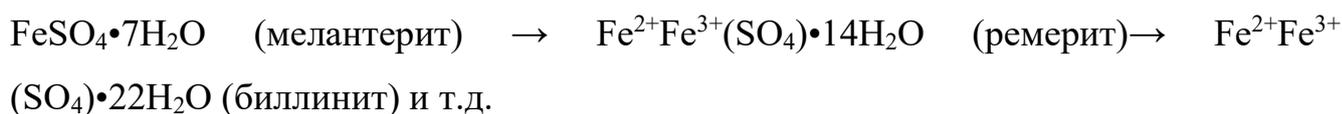


Железосодержащие сульфаты, образующиеся по реакциям (1.1–1.4), достаточно быстро подвергаются гидратации с образованием мелантерита $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и образуют в результате стадийной дегидратации иные сульфаты железа по последовательно протекающим реакциям [116]:

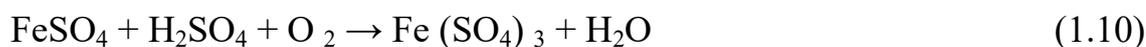
1) Дегидратация мелантерита, приводящая к появлению водных сульфатов двухвалентного железа с меньшим содержанием воды:



2) Частичное окисление Fe^{2+} в сернокислых растворах с появлением различных сульфатов двух- и трехвалентного железа в последовательности:



Вследствие гидролиза возможно также образование устойчивых сульфатов железа по реакциям [44]:



Продукты разложения полевых шпатов по реакции (1.7), взаимодействуя с гидросульфатами железа, по реакции (1.12) образуют ярозит по реакции:



Ярозит, как весьма устойчивый гипергенный минерал, может выступать в виде основной составляющей части сульфатного цемента, определяющего устойчивость грунтов техногенного минерального образования.

Макаров Д. В. в своей работе [66] обратил внимание на то, что интенсивность окисления сульфидов напрямую связана с их процентным содержанием в техногенном материале. В этой связи автор предложил классификацию сульфидсодержащих техногенных отходов по типу возможных минеральных ассоциаций, в основе которой заложено 2 типа месторождений [66]:

1. Группа месторождений, в составе руд которых главную роль играют сульфиды железа, а общее содержание сульфидов сопоставимо с суммарным содержанием нерудных минералов (около 10% проанализированной выборки).

2. Группа месторождений, в отходах обогащения руд которых содержание сульфидов составляет доли процента или первые проценты.

В ходе исследования зоны окисления двух хвостохранилищ в работе [4] ученые также отметили, что при одинаковых климатических условиях

наблюдаются различные картины выветривания объектов ввиду различного содержания пирита: для одного из них характерен желтоватый верхний слой, толщиной 20 см, в другом – хвостохранилище выявлены равномерный сероватый по всей глубине и отсутствие видимого окислительного слоя. В данном случае это связано с качественно различным содержанием пирита (80 и 30 масс. %, соответственно).

Следует отметить и важную роль микробиологического фактора. Биогеохимический цикл S и Fe влияет на окисление сульфидных минералов и, следовательно, на образование кислоты и выделение ионов металлов в теле хвостохранилища. Следовательно, в этих отложениях часто встречаются микроорганизмы, которые получают энергию за счет окисления восстановленных форм S и Fe [32]. Наличие архей и бактерий, способных окислять S или Fe, характерны для хвостохранилищ и других сульфидсодержащих отходов шахт. Как правило, бактерии, демонстрируют оптимальный рост между 20 и 45°C (т. е. мезофилы) и, как правило, встречаются чаще, чем S- и Fe-окисляющие археи, обилие которых характерно для более высоких температур (т. е. термофилы) [17].

Считается, что этот процесс повышает скорость окислительного процесса за счет ограничения образования вторичных S-содержащих осадков и, следовательно, предотвращает пассивацию сульфидно-минеральных поверхностей [14]. Следовательно, S-окисляющие бактерии играют важную роль в развитии условий кислотного дренажа шахт в пределах сульфидных хвостохранилищ. Кроме того, сульфидные хвосты демонстрируют повышенную популяцию ацидофильных Fe-окисляющих бактерий [14].

Из этого следует, что специфичный характер окисления сульфидных хвостов способствует повышению растворимости минеральных форм в верхней окисленной части техногенного минерального объекта, что является весьма важным фактором, который следует учитывать при выборе способов и параметров разработки хвостохранилищ, определяющих режим горных работ.

Физико-химические преобразования техногенного сырья в процессе окисления провоцируют изменение физико-механических свойств. Как правило,

твердые отложения образуются естественным образом в открытых мелкозернистых сульфидных хвостах, имеющих контакт с кислородом [10, 19]. В хвостохранилищах твердые отходы образуются в виде сплошных или прерывистых слоев в зависимости от рельефа участка. Как правило, толщина цементированных слоев варьирует от нескольких миллиметров до нескольких метров. Это определяет необходимость районирования техногенных минеральных образований с учетом различных свойств техногенного сырья с целью обоснования последовательности выемки при их разработке.

Стоит отметить, что физические характеристики цементированных отходов обогащения руд отличаются от характеристик складированных отходов: твердые хвосты характеризуются низкой пористостью и гидравлической проводимостью, по сравнению с исходными хвостами, за счет цементации зерен [18]. Поэтому цементированные хвосты обогащения руд, зачастую, обладают большей концентрацией тяжелых металлов, чем только что образованные. Этот фактор может быть учтен при обосновании направления фронта работ при разработки техногенных образований, представленных отходами обогащения медно-колчеданных руд.

Целесообразность изучения преобразованных физико-механических свойств также подчеркивается в работе [93]. И. В. Терентьева отмечает, что обоснование способов разработки хвостохранилищ сульфидсодержащего техногенного сырья должно базироваться на классификации техногенного материала по физико-механическим характеристикам, определяющим структуру техногенных массивов и условия промышленного освоения техногенных образований.

Помимо перспектив промышленного использования, ликвидация старых хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд путем их вовлечения в промышленное использование имеет и экологические преимущества. Это связано, в первую очередь, с растворимостью вторично образованных минералов, которые служат концентраторами потенциально токсичных химических элементов, в первую очередь, тяжелых металлов [38]. Так, результаты исследования хвостов обогащения руд Джидинского месторождения, законсервированных в 1997г., в

динамике в течение 3 лет показали, что содержания подвижных форм Cu, Pb и Zn имеют тенденцию к увеличению их относительной доли на фоне снижения валового содержания.

Весьма важно, что несмотря на схожесть протекания физико-химических процессов, каждое техногенное образование является уникальным, что требует дифференцированного подхода к его освоению на базе изучения особенностей строения, состава и свойств сырья, а также наличия зоны гипергенеза и закономерностей ее развития. Также стоит отметить, что комплексное изучение сформированных техногенных минеральных образований и особенностей динамичного изменения физико-химических и физико-механических характеристик минерального сырья в ходе развития гипергенеза позволит получить достоверную информацию о текущих особенностях строения техногенного образования, оказывающих влияние на выбор подходов к разработке и позволяющих прогнозировать особенности процессов преобразования состава и свойств техногенного сырья при целенаправленном формировании хранилищ отходов по заданным технологическим характеристикам.

Это позволит разработать базу фундаментальных научных знаний, позволяющую производить эффективную разработку старогодних техногенных образований и формировать отвалы из текущих хвостов обогащения медно-колчеданных руд с учетом контроля их параметров с целью получения техногенного сырья с заданными минералогическими и технологическими характеристиками, позволяющими вовлечь техногенное минеральное сырье в промышленное освоение.

1.3. Систематизация современных подходов к разработке старогодних хранилищ отходов переработки руд с целью вовлечения техногенного сырья в промышленный передел

В отечественной практике, начиная с конца XX в., вопросом переработки техногенного минерального сырья из отходов переработки руд в аспекте идеи

полноты и комплексности освоения недр занимаются как недропользователи, так и научно-исследовательские организации. Перспективы вовлечения техногенного сырья в промышленный передел зачастую зависят от возможностей технических и технологических схем, реализация которых возможна в условиях действующих горнопромышленных производств, которым принадлежат хранилища отходов либо иным производствам, расположенным вблизи накопленных техногенных минеральных образований. В этой связи, следует отметить, что первостепенным является доказательство принципиальной технической возможности освоения хвостохранилищ с оценкой экономической целесообразности их разработки, что в результате позволит более обоснованно подходить к решению рассматриваемой в диссертации задачи обоснования режима горных работ на техногенных образованиях, сопряженных с эксплуатацией месторождений полезных ископаемых на стадии истощения балансовых запасов.

Несмотря на то, что понятие режима горных работ, как правило, включает установленную проектом или исследованиями последовательность выполнения во времени объёмов вскрышных и добычных работ на карьерах, ряд ученых интерпретировал это понятие с учетом совокупного использования природных и техногенных георесурсов при комплексном освоении участка недр. Так, И.А. Пыталев в своей работе предложил стратегию совокупного использования природных и техногенных георесурсов при комплексном освоении участка недр [76] (рисунок 1.6.), что позволит в дальнейшем рассматривать техногенное сырье как источник обеспечения горнопромышленного предприятия дополнительным минерально-сырьевым ресурсом.

Также стоит отметить труды А.Б. Юна [110], в которых предложено включать в добычу и переработку запасы бедных руд и техногенного сырья с целью обеспечения горнопромышленного производства дополнительным сырьем. Календарный график горных работ на Жезказганском месторождении в период истощения балансовых запасов с учетом вовлечения в добычу и переработку бедных руд и техногенного сырья представлен на рисунке 1.7.

Ввиду того, что понятие режима горных работ неразрывно связано с обоснованием технологических схем, технологией и средствами механизации работ, целесообразно рассмотрение современных подходов к разработке старогодних хранилищ отходов переработки руд с целью вовлечения техногенного сырья в промышленный передел.

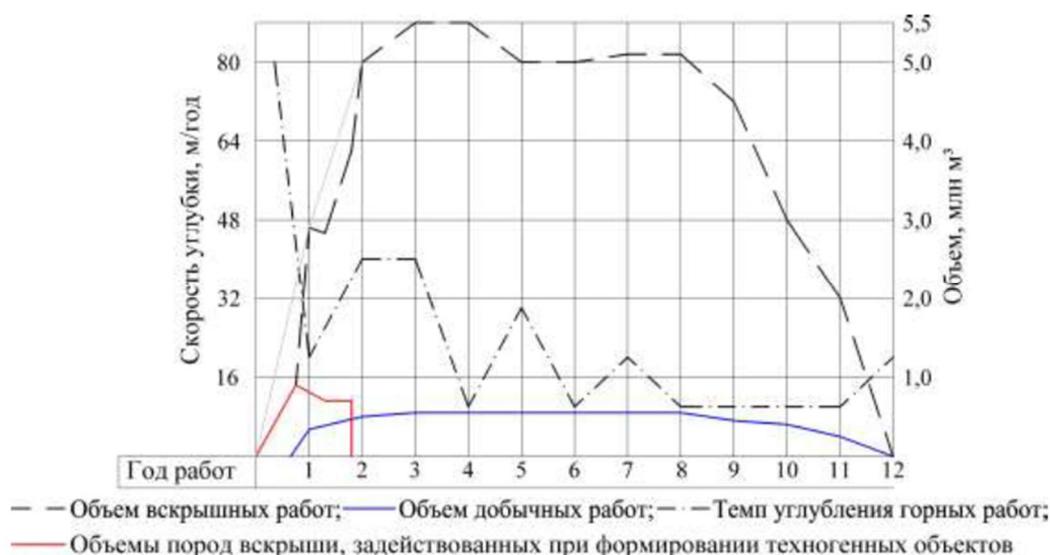


Рисунок 1. 6. Календарный график горных работ при совокупном использовании природных и техногенных георесурсов

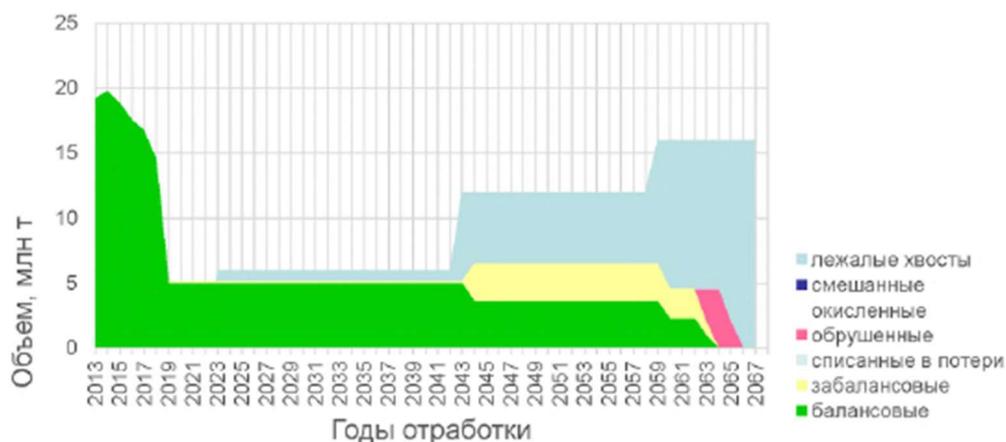


Рисунок 1. 7. Календарный график горных работ на Жезказганском месторождении в период истощения балансовых запасов с учетом вовлечения в добычу и переработку бедных руд и техногенного сырья

Выбор приоритетного вида механизации горных работ при проектировании ГТС освоения техногенного образования определяется, в первую очередь, физико-механическими свойствами техногенных массивов (влажностью, сцеплением и коэффициентом внутреннего трения), определяющими устойчивость

конструктивных элементов систем разработки, которые оказывают определяющее влияние на устойчивость откосов и основания массива при разработке техногенного сырья и являются основными при выборе типа механизации выемочно-погрузочных работ.

В ходе исследования закономерностей изменения механических характеристик техногенного сырья Жезказганского месторождения И.В. Терентьевой [93] установлено, что его физико-механические свойства определяются преимущественно влажностью. Кроме того, в зависимости от однородности вещественного состава и физико-механических свойств техногенного сырья, либо закономерностей распределения изменяющихся характеристик сырья, сезонности изменения свойств, автор предлагает выбор валового или селективного способа отработки отдельных участков. Типовые ГТС, предусматривающие добычу механизированным, гидромеханизированным и комбинацией мокрого и сухого способов из ложа хвостохранилища представлены на рисунке 1.8.

Стоит отметить, что необходимое для применения механизированного способа разработки, предполагающего предварительное осушение хвостохранилища, сдерживается возможной потерей ценных компонентов ввиду растворимости минеральных форм в верхней части отвала.

Разработка хранилищ отходов медно-колчеданных руд с учетом перспектив сезонного промерзания техногенного массива для обеспечения его устойчивости при работе механизированной техники сдерживает интенсификацию горных работ. Кроме того, фактор сезонного промерзания массива применим не для всех техногенных минеральных образований, поскольку окисление в сульфидных отходах под воздействием биоорганизмов, инициирующих процесс сопровождается повышением температуры даже в зимний период, что препятствует промерзанию грунтов.

Технологические схемы механизированной и гидромеханизированной добычи техногенного сырья характеризуются как преимуществами, так и недостатками. Выбор технологических схем освоения сформированных

техногенных объектов в наибольшей степени определяют минеральный состав и структурные особенности техногенного сырья.

Основным недостатком при комбинации механизированной и гидромеханизированной технологии является необходимость применения различных видов механизации [93].

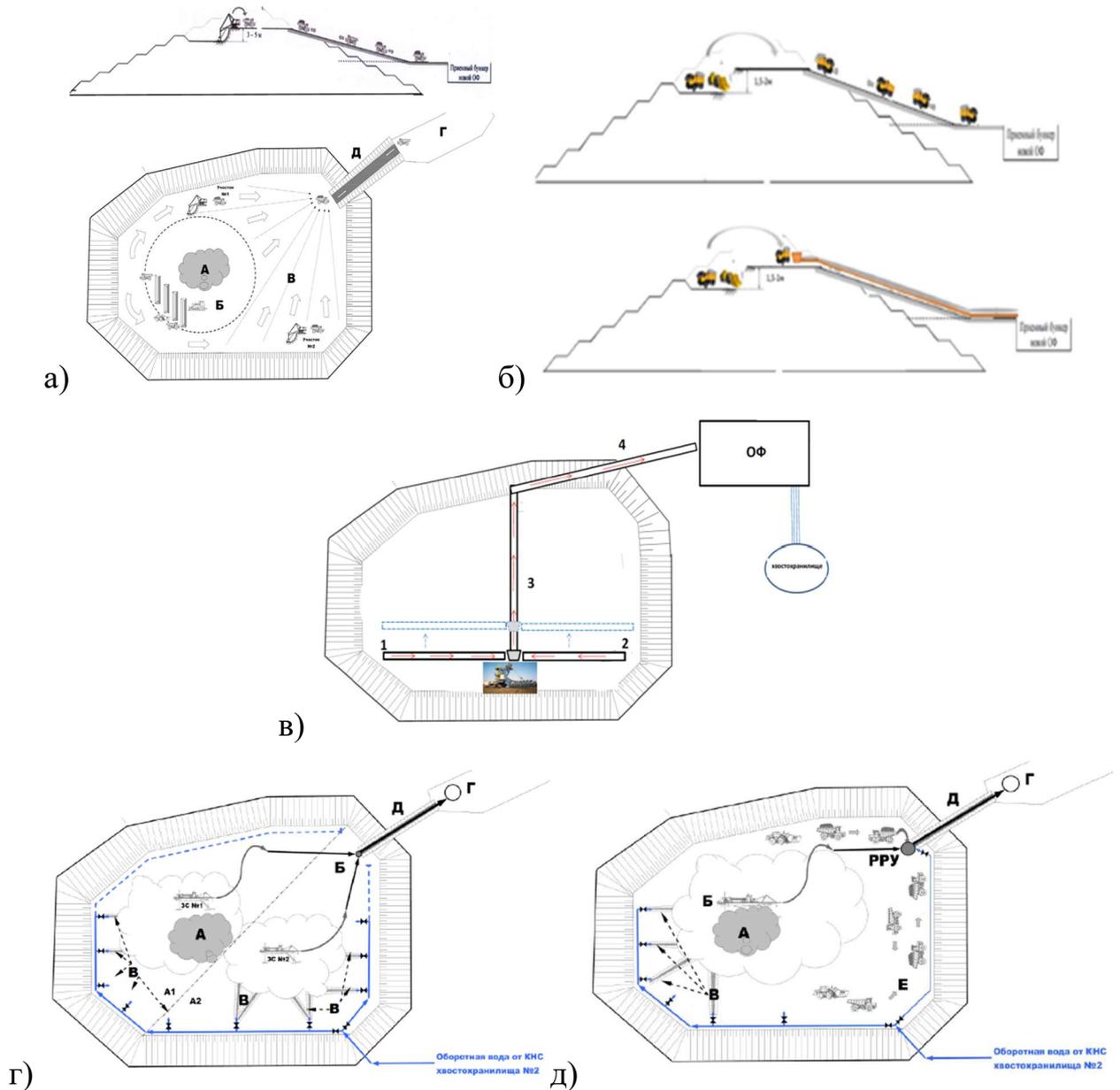


Рисунок 1. 8. Типовые ГТС, предусматривающие добычу сухих и переувлажненных хвостов из ложа хвостохранилища: а, б, в – варианты механизированной разработки с применением одноковшового экскаватора, колесных погрузчиков, многоковшового цепного экскаватора, г – вариант гидромеханизированной разработки, д – вариант, предусматривающий комбинацию разработки хвостов сухим способом и мокрым способом [93]

Для обеспечения гидродобычи показателен пример применения погружных поршневых насосов Putzmeister. Основным недостатком применения такой техники является относительно небольшая производительность и высокие эксплуатационные затраты, связанные с частыми ремонтными работами и высокими затратами на изнашиваемые в процессе эксплуатации насосов материалы.

Высокая производительность – одно из основных преимуществ применения механизированной карьерной техники. Однако представленные выше технологические схемы не учитывают тот факт, что в верхней части переувлажненного техногенного массива может происходить интенсивное окисление сырья, сопровождающееся изменением физико-механических, физико-химических и технологических свойств техногенного материала и, как следствие, происходит снижение устойчивости откосов при эксплуатации отвала, что в результате обуславливает высокую вероятность провалов техники и повышает риски ведения горных работ.

В этом случае, изменяющийся ввиду окисления техногенный материал, представляющий собой высоко растворимую фракцию за счет наличия техногенных сульфатов, снижает устойчивость техногенных грунтов, в связи с чем в основу обоснования возможности применения механизированных средств в целом, а также конкретных видов техники и мест ее расположения на техногенном объекте при разработке старогодних хвостохранилищ должны быть изучены особенности развития зоны гипергенеза, а также состава и свойства преобразованного в ней техногенного материала.

В работе [67], выполненной под руководством профессора М. В. Рыльниковой, была обоснована схема дифференцированного вскрытия участков старогоднего хвостохранилища Бурибаевского ГОКа. Отходы, представленные в обогащенных ценными компонентами серой и бурой фракциях, добываются валовой выемкой большегрузными погрузчиками или экскаваторами заходками в сплошном порядке с развитием фронта горных работ от одного фланга хранилища

к другому, разделяются для переработки по сортам путем грохочения по классу 2 мм.

Однако в случае раскрытия сульфидных минералов, вблизи поверхности техногенного массива, верхний, окисленный слой, содержащий частицы благородных металлов, может быть весьма обогащен, что следует учитывать при выделении рабочих зон и определении последовательности выемки техногенного сырья.

Значительный вклад в понимание процессов гипергенеза в аспекте развития технологий разработки сульфидсодержащих техногенных минеральных образований внесли труды П.П. Бастана, С.Б. Бортниковой, В.А. Бочарова, В.Е. Вигдергауза, А.Е. Воробьева, В.З. Козина, Б.М. Корюкина, А.Б. Макарова, В.Н. Макарова, М.А. Пашкевич, А.Б. Птицына, Б.Л. Халезова, В.А. Чантурия, И.В. Шадруновой и других исследователей [66].

В работе И. В. Шадруновой отмечено [47], что для принятия решения о выборе технологии разработки хвостохранилищ предварительно следует изучать миграционные процессы, происходящие в массиве и производить геологическое картирование, уделив внимание перераспределению элементов по глубине залегания техногенного сырья. Это связано с тем, что преобразование минерального, гранулометрического, фазового и химического составов техногенного сырья способствует сокращению времени выщелачивания при выборе физико-химической геотехнологии.

В США широкое распространение получило кучное выщелачивание хвостов обогащения сульфидных медных руд после предварительного окомкования [109]. Однако кучное выщелачивание сульфидных медно-цинковых хвостов сдерживается низкими коэффициентами фильтрации техногенного сырья. Особая роль при вовлечении отходов добычи и переработки медно-колчеданных руд отведена применению выщелачивания с помощью микроорганизмов. В мировой практике металлические отходы металлургических производств являются перспективным ресурсом для биотехнологического извлечения металлов с целью

достижения решения двух задач: рециклинга минеральных ресурсов и снижения экологического воздействия на горнопромышленный регион [8].

Впервые возможность биологического выщелачивания цветных металлов из хвостов обогащения изучали Дункан и Трасел (Канада) [7], Банчи (Румыния) [37], А. М. Кондрашина (СССР) [61]. С микробиологической точки зрения научное сообщество предлагает целый ряд исследований по биовыщелачиванию с использованием аэробных, ацидофильных, хемоавтотрофных микроорганизмов [34, 28, 30, 16], поскольку все они способны ускорять окислительное растворение сульфидных минералов, присутствующих в рудах [22]. В этой связи кучное и отвальное выщелачивание с участием микроорганизмов все чаще применяется во всем мире [5, 27].

Для извлечения металлов из пиритных хвостов старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики Бишевым Л. З. была предложена технология слоевой отработки осушенного участка пиритсодержащего хвостохранилища с размещением добычных механизмов по его площади с использованием процессов биоокисления в рабочей зоне [40].

Предпосылкой для создания этой технологии является выявленный факт вторичного минералообразования в хвостохранилище, протекающий за счет естественного биоокисления.

Технология, предложенная Бишевым Л. З., предусматривает разработку хвостов в соответствии с технологической схемой на рисунке 1.9.

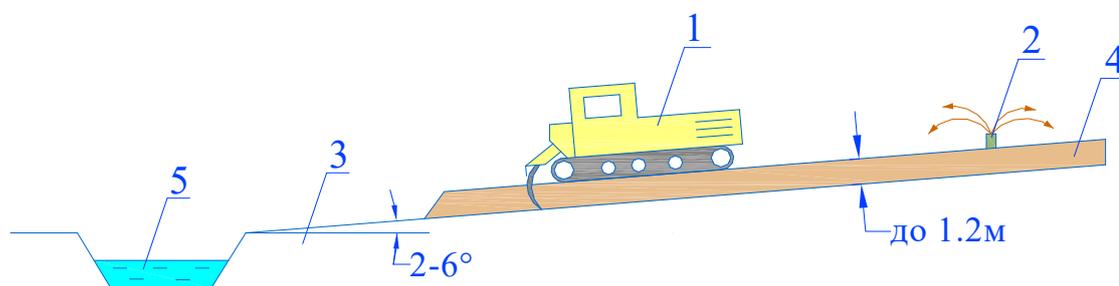


Рисунок 1. 9. Схема разработки хвостов с их предварительным биоокислением в теле хвостохранилища: 1 – рыхлитель; 2 – оросительный трубопровод; 3 – тело хвостохранилища; 4 – слой хвостов, подвергаемый биоокислению; 5 – сборная канава

В ходе промышленных испытаний предложенной технологии не удалось осуществить разработку Сибайского техногенного образования, ввиду низкой устойчивости его поверхности, что обусловило провалы горнотранспортного оборудования, определенного расчетами автора.

В целом, зная, что сообщество бактерий интенсифицирует окислительные процессы в рудной массе, возможно создание оптимальных условий в слое отвальных хвостов обогащения медно-колчеданных руд. Однако биовыщелачивание непосредственно в техногенном образовании определяет сложности, обусловленные необходимостью выбора технологии сбора растворов, препятствующей миграции ценных компонентов.

Кроме того, основными недостатками биодобычи являются продолжительное время, необходимое для получения экономически выгодных уровней извлечения металлов, длительность которого варьирует от нескольких дней в случае применения чанов с механическим перемешиванием до одного или нескольких лет в случае эксплуатации биоотвалов и отвалов пустой породы. С другой стороны, биодобыча обычно воспринимается как гораздо более благоприятный вариант для состояния окружающей среды за счет течения процессов при более низких температурах и, следовательно, меньших затратах на энергию и меньшим углеродным следом. Кроме того, сложность заключается в определении параметров технологии эффективного биовыщелачивания в масштабах техногенного образования с учетом особенностей вещественного состава техногенного сырья из различных участков в плане и разрезах техногенного образования. в таком случае может быть рассмотрен вариант биовыщелачивания в специальных емкостях.

Стоит отметить, что несмотря на очевидный ресурсный потенциал техногенного сырья, большинство отходов горно-обогажительного производства в России либо утилизируются в составе производственного цикла рудников, выступая в качестве материала для закладки и забутовки выработанного пространства, отсыпки балласта и дамб хвостохранилищ, либо используются как сырье для стройиндустрии. Так, на Урупском руднике для добычи и доставки

хвостов обогащения на закладочный комплекс была спроектирована и внедрена опытная установка по добыче хвостов из хвостохранилища земснарядом с последующей перекачкой необходимого объема хвостов на закладочный комплекс и дозировкой пульпы в состав смеси (рисунок 1.10) [67].

Однако следует отметить, что техногенное сырье нужно утилизировать таким способом только в случае, если оно не содержит в своем составе ценных компонентов и не представляет экономической ценности, как источник минерального сырья.

По мнению авторов работы [45], в России низкий уровень использования отходов обогащения медно-колчеданных руд в качестве вторичного минерального ресурса обусловлен не только отсутствием эффективных технологических решений, обеспечивающих высокую окупаемость затрат на извлечение ценных компонентов, но и несовершенством организационно-экономического механизма обращения с отходами производства.

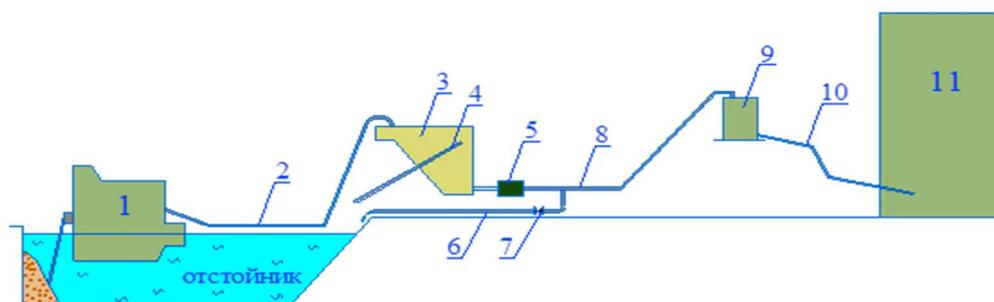


Рисунок 1. 10. Опытная установка по добыче хвостов и транспортированию пульпы на закладочный комплекс Урупского рудника: 1 – земснаряд; 2 – пульповод; 3 – сгуститель; 4 – перелив; 5 – насос; 6, 7 – система сброса избыточных объемов сгущенных хвостов; 8 – пульповод сгущенных хвостов; 9 – перемешивающее устройство; 10 – трубопровод подачи хвостов на закладочный комплекс 11

В связи с этим, с целью эффективного комплексного использования техногенного минерального сырья с единовременным решением социально-экономических аспектов в масштабах горнопромышленного региона с последующей рекультивацией техногенно нарушенной территории необходимо обоснование режима горных работ, обеспечивающего планомерную, безопасную и экономически эффективную разработку хвостохранилища. Это, в свою очередь,

будет достигнуто за счет разработки научно-методического подхода к районированию хвостохранилищ, в основу которого заложены результаты исследования отходов обогащения медно-колчеданных руд, а именно пространственно-временных закономерностей преобразования структуры техногенного объекта, вещественного состава и свойств техногенного сырья как в окисленном, так и не окисленном слоях.

1.4. Анализ условий формирования и результаты исследований горно-геологических особенностей старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики

Одним из характерных старогодних техногенных объектов, образованных в результате складирования отходов обогащения медно-колчеданных руд, является хвостохранилище Сибайской обогатительной фабрики (ОФ). Общее количество заскладированных хвостов в хвостохранилище по состоянию на 01.01.2016 года составляет 42,2 млн. т., содержание полезных компонентов в хвостах составляет: медь – 0,27%, цинк – 0,3%, сера – 28,74%, железо – 28,42%; золото – 0,78 г/т; серебро – 6,34 г/т [54].

Сибайская обогатительная фабрика, введенная в эксплуатацию в 1959, перерабатывала и обогащала руды нескольких месторождений, находящихся в непосредственной близости. В числе которых Сибайское, Юбилейное, Майское и ряд мелких месторождений Баймакского района. Во всех рудах основным рудным минералом является пирит. Основной медный минерал – халькопирит. Цинк, как правило, заключен в сфалерите. Руды отличаются тонкой взаимной вкрапленностью сульфидных минералов. Преобладание сульфидных минералов в природном типе руд позволяет отнести хвосты обогащения к первой группе отходов по классификации Макарова Д. В. [66], характер окисления которых обусловлен образованием кислых сульфатных поровых растворов ввиду образования серной кислоты.

На Сибайской обогатительной фабрике медные и медно-цинковые руды обогащаются методом прямой селективной флотации, результатом которой является получение медного и медно-цинкового концентрата и отвальных хвостов. Принципиальная схема обогащения руды на фабрике представлена на рисунке 1.11.

Хвостохранилище Сибайской ОФ расположено в черте г. Сибай, в юго-восточной части. Участок размещения гидротехнических сооружений хвостохранилища находится в 1,0 км к югу от промплощадки Сибайской ОФ, в ~ 0,15 км от правого берега р. Карагайлы.

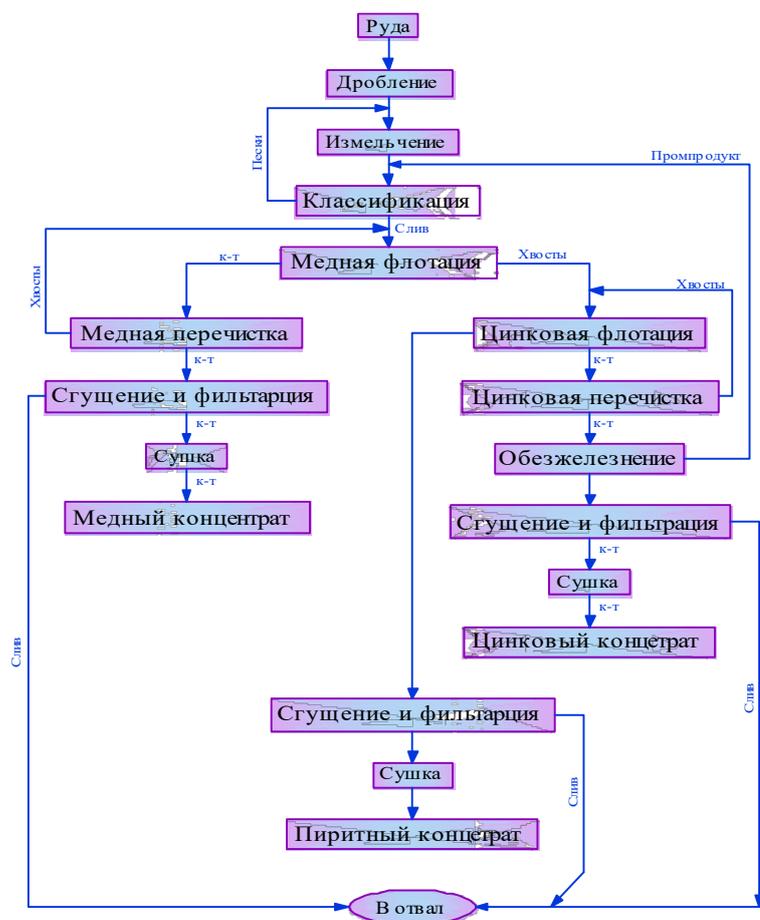


Рисунок 1.11. Принципиальная технологическая схема обогащения руды на Сибайской обогатительной фабрике [73]

На сегодняшний день хвостохранилище Сибайской ОФ представлено четырьмя отсеками: старогодним хвостохранилищем, отсеками I, II и III очереди (рисунок 1.12). Ввиду повышенного интереса к проблеме вовлечения техногенного сырья в промышленный передел с целью повышения устойчивости

горнопромышленных предприятий осушенная часть данного хвостохранилища была исследована различными учеными [40, 46, 82].

Старогоднее хвостохранилище Сибайской ОФ формировалось с 1959 по 1965 гг. [46]. Весомым фактором для проведения исследований старогоднего хвостохранилища явился экологический вопрос, обусловленный миграцией тяжелых металлов из массива хвостохранилища в окружающую среду [82]. В работе [82] было установлено загрязнение тяжелыми металлами почвы прилегающих к хвостохранилищу территорий – валовое содержание меди и цинка в них в 6–6,5 раз превышает ПДК. В почвах садоводческих участков г. Сибая загрязнение медью и цинком соответствует 2 ПДК, подвижными формами меди – 2 ПДК, цинка – 3,4 ПДК. Так, результаты исследования экологической обстановки вблизи Сибайского хвостохранилища доказали, что хранение хвостов обогащения снижает экологическую безопасность прилегающих территорий.



Рисунок 1. 12. Вид на хвостохранилище Сибайской обогатительной фабрики в плане

Как было отмечено ранее, с течением времени в техногенных массивах происходят пространственно-временные геохимические преобразования, обуславливающие изменение минерального состава техногенного сырья посредством образования новых техногенных минералов и структурные изменения в виде скоплений химических элементов, происходящие в связи с перераспределением масс и преобразованием ввиду специфики гравитационных свойств, адсорбционных и окислительных свойств вторичных фаз. Позже для

оценки распределения цветных металлов в толще старогоднего хвостохранилища было проведено опробование техногенного материала [55, 82] (таблица 1.5).

Таблица 1.5. Распределение основных компонентов по глубине опробования старогоднего хвостохранилища [46]

Глубина опробования, м	Содержание элементов, %			
	Медь	Цинк	Сера	Железо
1	0,12	0,15	18,49	19,74
2	0,24	0,57	25,64	24,99
3	0,22	0,31	25,08	24,24
4	0,24	0,41	26,8	27,06
5	0,24	0,50	27,58	26,48
6	0,24	0,73	28,42	28,72
7	0,26	0,99	27,74	22,08

В результате оценки распределения основных компонентов по глубине массива было установлено, что цветные металлы, выщелачиваются из верхних горизонтов и переходят в водную фазу с последующим переотложением на нижних горизонтах, либо мигрируют в окружающую среду

Таким образом, результаты исследований старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики позволяют считать техногенные минеральные образования, сформированные в ходе складирования отходов обогащения медно-колчеданных руд, сложным геологическим объектом, обоснование режима горных работ разработки которого обусловит решение проблемы кислотного дренажа с единовременным доизвлечением запасов цветных и благородных металлов из недр.

1.5. Цели, задачи и методы исследования

Одним из основных направлений развития научно-методических основ по вовлечению техногенных образований является выявление закономерностей изменения, преобразованных при хранении состава, структуры и свойств техногенного объекта, которые должны быть учтены при районировании техногенного объекта для последующего обоснования режима горных работ, способного обеспечить планомерную, безопасную и эффективную разработку. На основании проведенного анализа, представленного в разделах 1.1–1.4 настоящей диссертации, сделаны следующие выводы:

– при переработке медно-колчеданных руд методами флотации в отходы поступают минералы, преимущественно содержащие в своей структуре сложно извлекаемые благородные металлы;

– длительное складирование и хранение отходов обогащения медно-колчеданных руд сопровождается окислительно-восстановительными процессами, способствующими перераспределению ценных компонентов в массиве хвостохранилища с образованием новых форм и изменением физико-механических и технологических свойств техногенного минерального сырья, преимущественно в верхнем слое техногенного образования;

– специфичный характер окисления хвостов медно-колчеданных руд способствует повышению растворимости минеральных форм в верхней окисленной части техногенного минерального объекта, что является весьма важным фактором, который следует учитывать при эксплуатации хвостохранилищ;

– процентное содержание сульфидов в хвостах обогащения обуславливает разницу в формировании хранилищ отходов медно-колчеданных руд за счет интенсивности процессов окисления, что влияет на физико-химические и физико-механические свойства сырья, что необходимо учитывать при обосновании конструктивных параметров ГТС эксплуатации техногенных объектов;

– преобразование состава и свойств отходов переработки медно-колчеданных руд, а также структуры техногенного объекта в целом, доказывает необходимость комплексных исследований таких техногенных образований с последующим районированием объекта в соответствии с выявленными физико-химическими, физико-механическими и минералогическими характеристиками для определения приоритетного направления развития фронта горных работ;

– обоснование режима горных работ, обеспечивающего планомерную, безопасную и экономически эффективную разработку хвостохранилища с целью восполнения минерально-сырьевой базы, должно производиться с учетом районирования на основании результатов исследования физико-химических, минералогических и физико-механических характеристик техногенного материала

с последующим моделированием структуры техногенного массива, что способно обеспечить комплексное освоение техногенного минерального образования с наибольшим извлечением ценных компонентов в период истощения основных запасов горнопромышленных производств;

– учитывая, что процессы природного выщелачивания, протекающие в хвостохранилище, наносят несомненный ущерб окружающей среде региона, необходимо уже в настоящее время изменить существующий подход к проектированию горнотехнической системы в части вариантов складирования хвостов, предусматривая возможность целенаправленного формирования и освоения техногенных георесурсов из текущих отходов добычи и переработки медно-колчеданных руд;

– продолжительное складирование и хранение хвостов переработки медно-колчеданных руд не только представляет существенную угрозу экологическому благополучию окружающей среды, но и со временем способствует потере качества техногенного сырья, что подтверждает необходимость совершенствования существующих вариантов освоения техногенных минеральных образований, результаты которых позволят заложить научно-практическую базу для эффективного доизвлечения ценных компонентов и своевременной утилизации конечных отходов производства в едином цикле комплексного освоения недр;

– отходы выщелачивания, не содержащие ценные компоненты, могут быть использованы в технологии подземной и открытой разработки месторождений для локализации подземных пустот, реализации более безопасного способа «сухого» складирования хвостов и в иных целях.

В этой связи цель исследования – обоснование режима горных работ разработки хранилищ отходов медно-колчеданных руд на базе исследования особенностей изменения структуры, состава и свойств техногенного сырья на примере изучения старогоднего хранилища отходов Сибайской обогатительной фабрики.

Для достижения цели решены задачи:

– обобщен опыт оценки и эксплуатации техногенных образований из отходов переработки медно-колчеданных руд, а также выполнена систематизация способов их разработки в свете перспектив повышения полноты и комплексности освоения недр;

– развиты научно-методические основы геотехнологии разработки хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд с учетом процессов сегрегации, цементации и вторичного минералообразования, протекающих в техногенных массивах;

– исследовано влияние гипергенеза на формирование физико-механических и физико-химических характеристик техногенного сырья на участках хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики, проведена оценка его структурного строения, как перспективного объекта расширения минерально-сырьевой базы Южно-Уральского горнопромышленного региона;

– обоснован режим горных работ на хвостохранилище Сибайской обогатительной фабрики, обеспечивающий его планомерную, эффективную и безопасную отработку с оценкой экологической и экономической эффективности.

Достоверность выводов и рекомендаций, полученных в результате диссертационной работы, подтверждает применение совокупности системных методов исследования.

Изучение опыта и условий формирования, а также особенностей преобразования состава и структуры техногенных объектов, сформированных из отходов обогащения медно-колчеданных руд, позволяет выявить особенности текущей структуры техногенных объектов с локализацией обогащенных и обводненных зон.

Систематизация результатов фундаментальных исследований в части существующих способов разработки таких техногенных объектов в свете перспектив повышения полноты и комплексности освоения недр позволила определить возможности эксплуатации старогодних техногенных образований из

отходов переработки медно-колчеданных руд с учетом выявленных в ходе исследований закономерностей.

Анализ архивной литературы позволил оценить условия формирования Сибайского хвостохранилища и определить геолого-промышленные типы природных руд, отходы переработки которых были складированы в отвалы за годы работы Сибайской обогатительной фабрики.

Аналитические исследования показали, что для оценки вещественного состава сырья требуется применение методов химического и оптико-минералогического анализов хвостов под микроскопом Olympus BX41 на базе анализатора «Минерал С7», комплекс химических анализов минерального сырья и фазовый анализ на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000, который позволит получить сведения о минеральном составе.

Для обоснования режима горных работ, обеспечивающего планомерность и эффективность разработки техногенного образования, целесообразно использование ГГИС типа Micromine для блочного моделирования и районирования техногенного образования с учетом установленных закономерностей изменения состава и свойств техногенного сырья в пределах техногенного объекта, а также подсчёта накопленных объёмов и запасов ценных компонентов.

Для обоснования параметров выбора горнотранспортного оборудования и его рабочих площадок, выбора мест заложения автодорог и типа механизации, обоснования предельных и рабочих углов откоса уступов требуется выполнение комплекса исследований физико-механических свойств образцов техногенных грунтов из различных по степени окисления и влажности зон, включая определение деформационных показателей, прочностных и физических свойств, согласно действующим государственным стандартам.

Реализация комплекса исследований позволит обосновать режим горных работ на неоднородных техногенных образованиях, сопряженных с эксплуатацией медно-колчеданных запасов на стадии истощения их запасов, обеспечивающий повышение полноты и комплексности освоения ресурсов.

ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ГЕОТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ХРАНИЛИЩ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНО-КОЛЧЕДАНЫХ РУД С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ СЕГРЕГАЦИИ, ЦЕМЕНТАЦИИ И ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

2.1. Формирование научно-методического подхода к районированию техногенных образований из отходов переработки медно-колчеданных руд, определяющего режим горных работ

Как показал анализ результатов исследований техногенного минерального сырья из отходов переработки медно-колчеданных руд, характеристики преобразованного состава, структуры и свойств техногенного материала с высоким процентом сульфидной составляющей, особенности их строения определяются характером окисления техногенного сырья, зависящим от продолжительности хранения хвостов, климатических условий, первичного состава перерабатываемых руд и наличия инициирующего процессы окисления микробиологического фактора.

Ввиду характерного для такого типа техногенных минеральных образований окисления верхней части, сопровождающегося образованием вторичных минералов с изменением технологических и физико-механических свойств техногенного материала, обусловлена необходимость исследования наличия зоны гипергенеза и особенностей ее развития с целью определения предпочтительного порядка разработки техногенного образования на базе районирования техногенного образования с выделением зон с различным по степени окисления и характеристикам техногенного сырья [105]. Кроме того, понимание механизмов окисления позволит определять своевременность вовлечения техногенного сырья, характеризующегося на момент вовлечения требуемыми характеристиками.

Опыт многолетних исследований на горных предприятиях свидетельствует, что методики, перенятые преимущественно на основе многолетней практики геологоразведочных работ, не позволяют получать достоверную информацию о составе, структуре и свойствах техногенных массивов, сложенных

тонкоизмельченными отходами обогащения руд. Это связано с перераспределением в ходе хранения вещественного состава и свойств техногенного сырья, а отсутствие такой информации требует детальной разведки непосредственно перед обоснованием возможности, сроков и порядка вовлечения техногенного сырья, а также со сложными горно-геологическими условиями намывных техногенных массивов, которые затрудняют проведение геологоразведочных работ на обводненных участках.

В настоящее время методы исследования лежалых отходов переработки руд регламентируются методиками руководства по изучению и эколого-экономической оценке техногенных месторождений (утв. ГКЗ 25.02.1994) [65]. Исследования базируются на использовании широкого арсенала методов, применяемых в различных отраслях геологии, т. е. подобные исследования требуют применения комплексного подхода к изучению техногенного минерального объекта. Так, исследование отходов переработки руд должно осуществляться в два этапа: анализ исходной геологической и горнотехнической информации о характеристиках состава, структуры и свойств техногенного образования.

Анализ исходной геологической и горнотехнической информации, подразумевает сбор данных о [95]:

- морфоструктурном и вещественном составе исходной руды;
- способе и системе разработки природного месторождения руд;
- изменчивости качественных показателей освоения природного месторождения и нормах разубоживания руды при принятой системе разработки;
- способах транспортировки и складирования рудной массы;
- технологических схемах рудоподготовки и показателях обогащения руд;
- способах складирования и хранения отходов добычи и переработки руд.

На основании первичной информации, как правило, определяется комплекс необходимых геологоразведочных работ и лабораторных аналитических методов исследования хвостохранилища с целью оценки его экономической

привлекательности с последующим обоснованием перспектив вовлечения отходов обогащения руд в промышленный передел на базе выявления зон повышенной концентрации цветных, редких и благородных металлов, образующихся в массивах хвостохранилищ, как на этапе их формирования, так и под воздействием более поздних процессов окисления, нейтрализации и перераспределения элементов в техногенных массивах под воздействием сегрегации и химических преобразований с участием водных растворов.

Для районирования техногенных образований из отходов переработки медно-колчеданных руд, определяющего последовательность горных работ, предложен подход к изучению подобных техногенных объектов, включающий комплексные исследования состава и свойств преобразованного при хранении техногенного сырья, представленного отходами обогащения медно-колчеданных руд. Предметом исследований являются закономерности изменения свойств и структуры техногенных массивов и распределения вещественного состава техногенного сырья по глубине массива, оказывающие влияние на выбор технологических решений по эффективной разработке техногенных образований для обеспечения перерабатывающих производств техногенным минеральным сырьем заданного качества [88].

В рамках изложенного подхода методика выполнения исследовательских работ с целью выявления перспектив вовлечения техногенных минеральных образований из отходов переработки медно-колчеданных руд в эксплуатацию, а также обоснования режима горных работ предусматривает:

- анализ исходной информации о природных типах руд, способах их переработки и складирования хвостов в отвалы из геологических фондов и архивов предприятий;

- геологическую оценку техногенного минерального образования с целью подсчета прогнозных ресурсов и определения возможных направлений использования техногенного сырья в промышленности;

– геолого-технологические исследования с использованием методов технологической минералогии и петрографии, позволяющие определить взаимное расположение минералов в отходах переработки, оценку их технологических характеристик;

– определение закономерностей изменения структуры техногенного массива, а также состава и свойств техногенного материала по глубине при хранении (выявление зоны развития гипергенеза и особенностей ее развития, определение физико-механических характеристик);

– оценку возможностей применения биоокисления на базе исследований наличия микроорганизмов в техногенном массиве;

– районирование техногенного минерального образования на эксплуатационные участки с учетом выявленных закономерностей в ходе изучения техногенного минерального образования для обоснования режима горных работ для разработки техногенных образований;

– обоснование последовательности и механизации работ по эксплуатации техногенного образования с учетом геомеханических особенностей техногенного образования;

– обоснование алгоритма выбора приоритетной последовательности производства горных работ при эксплуатации техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд на базе исследования протекающих в них окислительных процессов;

– формирование перечня приоритетных задач и рекомендаций для целенаправленного складирования отходов переработки медно-колчеданных руд с обеспечением контроля технологических характеристик техногенного сырья для его дальнейшего эффективного и безопасного промышленного использования и исключения потери перспективного минерального сырья.

Стоит отметить, что складированные в хранилища отходы переработки медно-колчеданных руд ранее практически не рассматривались как перспективное для последующей промышленной эксплуатации минеральное сырье, а в проектной

документации горнодобывающих предприятий зачастую отсутствуют технологические решения по формированию техногенных объектов с проведением исследований свойств техногенных массивов, изменяющихся под воздействием природных геохимических процессов.

В основу исследования характера преобразования техногенного материала был заложен анализ исходных данных о вещественном составе руд, способах их обогащения и особенностях складирования и хранения отходов переработки.

В соответствии с предложенным подходом на базе анализа исходной информации о техногенном материале и особенностях его складирования, приведенной в 3 главе настоящей диссертации, были проведены геолого-оценочные работы на старогоднем хвостохранилище Сибайской обогатительной фабрики. На первоначальном этапе геологической оценки был проведен анализ спутниковых снимков старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики (рисунок 2.1.).

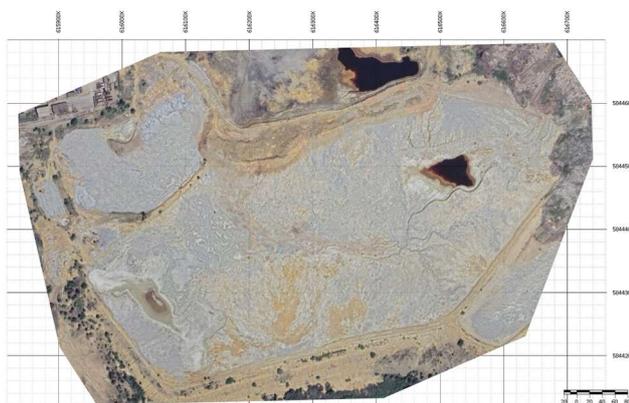


Рисунок 2. 1. Спутниковый снимок старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики

Из анализа рисунка 2.1. видно, что наибольшее развитие зоны окисления характерно для южной части хвостохранилища, это подтверждается наличием окисленной охристой корки на спутниковом снимке вблизи южной дамбы. Вероятнее всего, верхняя часть этой зоны представлена весьма сцементированными породами, что обусловлено длительных хранением хвостов обогащения и в результате должно обеспечить высокую устойчивость этого участка.

Для изыскания эффективных технологий разработки хвостохранилищ и переработки лежалых отходов обогащения медно-колчеданных руд проведены исследования геометрических параметров и объемов хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики и характеристик вещественного состава техногенного сырья. В масштабе космоснимка были определены параметры законсервированного хвостохранилища: длина – 740 м; ширина – 486 м.

С целью выявления возможных магнитных аномалий, обусловленных наличием в техногенном образовании сульфидных минералов с повышенной магнитной восприимчивостью, в 2018 г. на исследуемом объекте были проведены геофизические исследования посредством аэромагнитной съемки на базе применения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) мультироторного типа – квадрокоптера "Геоскан 401".

Схема фактических линий полетов, а также результат интерпретации геофизических исследований поверхности техногенного минерального образования представлен на рисунке 2.2.

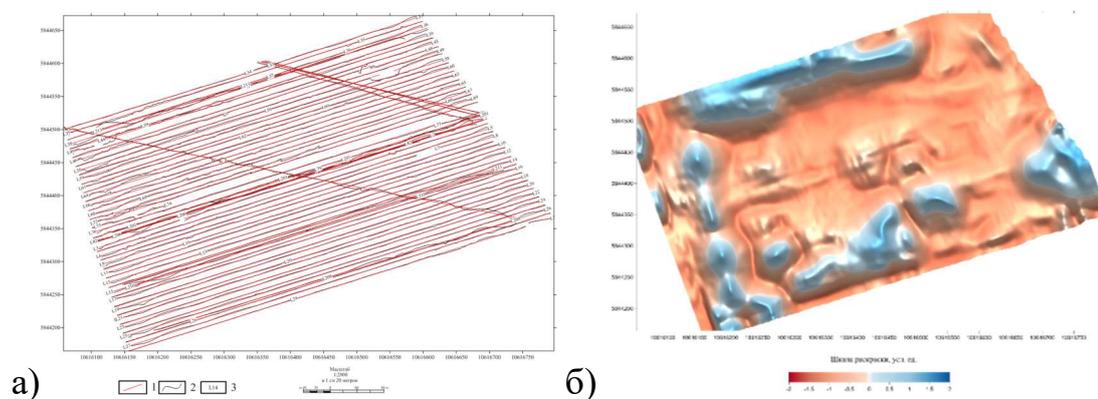


Рисунок 2. 2. Геофизическая съемка старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики: а – схема фактических линий полетов, б – карта вертикальной составляющей трансформации «Tilt»

Как видно из рисунка 2.2.(б), выполненная аэромагнитная съёмка показала неоднородность структуры поверхности техногенного объекта. Однако стоит отметить, что, ввиду отсутствия в природных типах руд магнитных минералов, таких, как пирротин и пр., неоднородность техногенного массива свидетельствует о характере уплотнения зон техногенного объекта, связанного с процессами цементации.

С учётом выявленных аномалий по результатам аэромагнитной съёмки проведено сопоставление данных с изображением на спутниковых снимках и результатами геофизического исследования. Результат сопоставления представлен на рисунке 2.3.

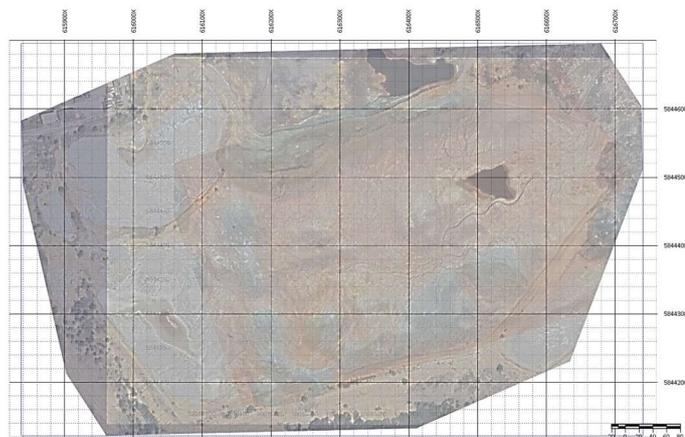


Рисунок 2. 3. Результат наложения результатов геофизических исследований на спутниковый снимок объекта

Стоит отметить, что сопоставление данных геофизических исследований и спутниковых снимков позволило сделать выводы:

- участки, выделенные в процессе интерпретации результатов геофизических исследований синим цветом, сопоставимы с зоной расположения северной дамбы, либо с интенсивно развитой зоной окисления вблизи южной дамбы техногенного образования, что может быть обусловлено уплотнением техногенных грунтов в этой части техногенного массива ввиду более интенсивной цементации сырья в осушенной части, нежели чем в зоне с повышенной обводненностью;

- участки, красного цвета, в целом накладываются на обводненную зону.

Также стоит обратить внимание на то, что, в зависимости от этапов формирования намывных отвалов и смены места слива пульпы, как правило, формируются зоны со скоплением тяжелых минералов – золота, окисленных сульфидов и пр.

Следует отметить, что сопоставление результатов геофизической и аэрофотосъемки может быть использовано при изучении старогодних техногенных образований, однако лишь как один из косвенных признаков.

Далее в ходе исследования горно-геологических условий разработки старогоднего Сибайского хвостохранилища в 2018 г. было определено, что в результате того, что хвостохранилище обогатительной фабрики относится к косогорному типу, из-за влияния естественных факторов (дождевые, талые воды, эоловое выветривание) хвостохранилище на протяжении длительного времени подвергалось постоянной денудации.

Кроме того, установлено, что в целом на территории хвостохранилища несмотря на то, что эксплуатация старогоднего отвала закончилась более 50 лет назад и техногенный материал подвергся цементации, сохранились весьма обводненные участки. Это характеризует техногенное образование как весьма сложный объект разработки и вызывает необходимость районирования техногенного образования с целью обоснования режима горных работ и выбора технологии разработки, предусматривающей безопасную выемку техногенного материала.

Предварительно, с учётом перепада высотных отметок, а также видимой обводненности объекта, было выделено два участка, разделенных дамбой (рисунок 2.4.). Северо-западная часть хвостохранилища и основная, северо-западная его часть наименее обводнена и имеет наиболее пологий рельеф.

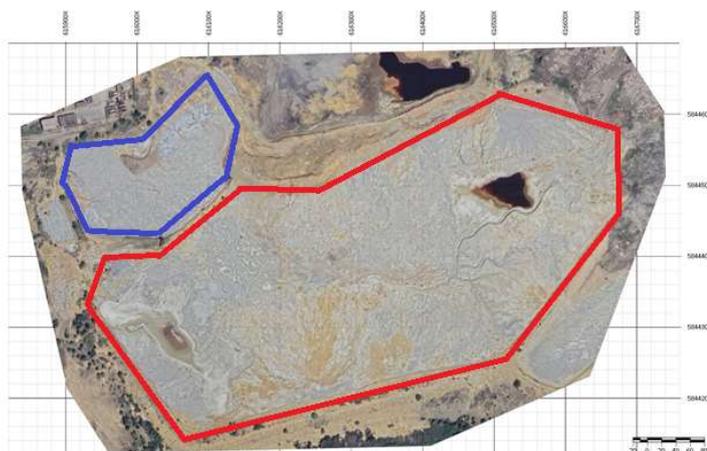


Рисунок 2. 4. Участки старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики: синий контур – более осушенная зона, песчаная фракция; красный контур – зона, обводненная с преобладанием мелкодисперсной фракции

Разведочные работы были проведены с целью предварительной оценки качества и количества ценных компонентов с техногенном материале, выявления

пространственных закономерностей распределения в массиве содержаний химических элементов, изучения особенностей строения техногенного образования и свойств техногенного сырья (рН и влажности среды, растворимости минеральных форм) для обоснования возможностей и выбора эффективной технологии переработки техногенного сырья.

Так, в северо-западной части объекта (синий контур на рисунок 2.4) были пройдены шурфы, а в основной – пробурены скважины на полную мощность техногенного объекта. Проходка шурфов проводилась по квадрату 40х60 м с применением ковшового экскаватора. Диаметр шурфа составил 1 м, а максимальная глубина до упора в плотик – 5–6 м. Стоит отметить, что, ввиду сильной обводненности основной части исследуемого объекта, выработки проходили в местах, куда был возможен проезд буровой установки. Был проведен отбор образцов для дальнейших комплексных исследований техногенного объекта.

Установленное в результате проходки шурфов горизонтально-слоистое залегание двух фракций техногенного материала, отличающихся по цвету (рисунок 2.5 а, б), а также обнаруженные на основе исследований вещественного состава в серой фракции техногенные сульфаты (рисунок 2.5 в), отобранные с глубины до 2 м от поверхности техногенного образования, доказывают наличие окисленной части, формировавшейся под влиянием изменяющихся климатических условий либо условий формирования намывного техногенного образования ввиду изменения характера намыва. Характер образования таких сульфатов связан с испарением сульфатных растворов в более осушенных областях или зонах окисления с пониженным снабжением водой или с хорошей ее испаряемостью.

Также стоит отметить, что минералы по типу техногенных сульфатов, осаждающиеся из сульфатных растворов, не являются конечной формой осаждения тяжелых металлов. Это позволяет считать, что по результатам исследования тяжелые металлы заключены в техногенном материале и подвержены последующим процессам разложения сульфатной части, что подтверждает необходимость их скорейшего извлечения для исключения миграции в окружающую среду.

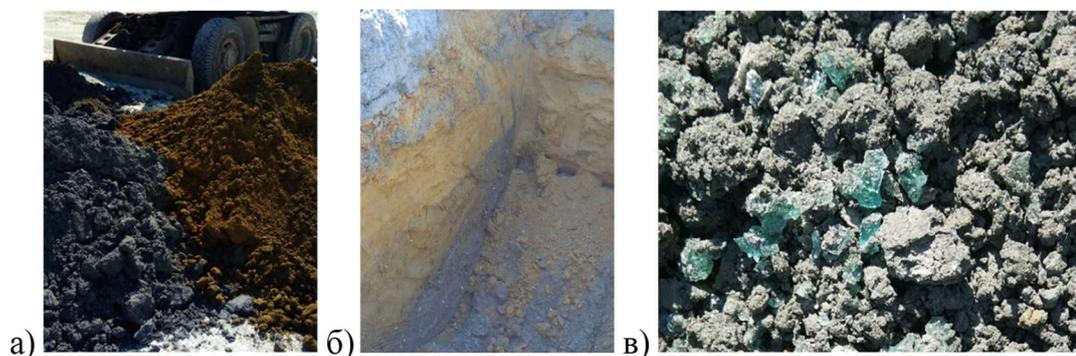


Рисунок 2. 5. Внешний вид слоев массива хвостохранилища с выделением фракций (а): серая – сульфатсодержащая и бурая (б) и техногенные сульфаты с глубины 1–2 м (в)

В результате опробования скважин, пройденных в основной части исследуемого объекта, было определено, что только в верхней части техногенного минерального образования прослеживается слоистость, в целом до глубины 2 м, после этой отметки отобранный техногенный материал представлен разностью темно-серого цвета, что подтверждает развитие окислительных процессов в верхней части хвостохранилища. На основании проведенного отбора проб и выявленных фракций установлено, что зона окисления хвостохранилища развита на глубину 2 м от поверхности. Для уточнения параметров этой зоны предусмотрено проведение дополнительных исследований.

Ввиду ограничений зоны обследования техногенного образования на полную мощность до упора в плотик, установлена мощность объекта, которая варьируется от 5 до 20 м (5–6 м в зоне проходки шурфов, до 20 м в основной части техногенного образования).

Таким образом, в ходе геолого-оценочных работ установлено, что для комплексной разработки хвостохранилищ медно-колчеданных руд недостаточно применения типовых схем их вскрытия на полную мощность, что обусловлено горно-геологическими особенностями и наличием зоны окисления, для которой характерно наличие высоко растворимых минералов. Поэтому применение известных технологий гидродобычи в условиях освоения таких техногенных образований может быть весьма затруднительно, ввиду преобразований минеральной формы в процессе хранения хвостов, что может привести к

значительным потерям ценных компонентов и негативным экологическим последствиям.

Кроме того, наличие окисленного и не окисленного слоев, а также их геометрические параметры и характеристика вещественного состава слагающего их техногенного сырья, должны быть учтены при обосновании последовательности горных работ с целью обеспечения планомерной, безопасной и эффективной разработки техногенного образования в соответствии с идеей комплексного освоения недр.

Так, ввиду характерных особенностей такого типа техногенных минеральных образований, а именно наличия окисленной и не окисленной частей, для обоснования режима горных работ их разработки следует производить районирование исследуемого техногенного объекта из отходов обогащения медно-колчеданных руд с учетом следующих факторов [102]:

- наличия зоны гипергенеза, особенностей ее распространения и характеристик (наличие сульфатредуцирующих бактерий, стадий окисления и растворимых минеральных форм и пр.);

- наличия магнитных сульфидных минералов, а также остатков железных конструкций, оставленных в ходе эксплуатации хвостохранилища и после ее консервации;

- распределения ценных компонентов в техногенном минеральном образовании, а также наличие вредных примесей;

- наличия и локализации обводненных зон в теле исследуемого объекта.

Таким образом, проблема освоения георесурсного потенциала действующих горных предприятий может быть решена за счет вовлечения в эксплуатацию техногенной сырьевой базы, однако для повышения полноты и комплексности освоения техногенных образований следует изучить не только механизмы преобразования слагающего их техногенного материала и его свойств, но и установить характер их изменения по глубине и площади техногенного минерального образования. Это в результате позволит определить

предпочтительную последовательность горных работ на хвостохранилищах, обеспечивающую планомерную, безопасную и эффективную разработку таких объектов.

Предложенный подход к районированию хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд на базе исследования зоны гипергенеза и пространственного характера изменения ее особенностей в техногенном образовании, позволил установить, что выбор последовательности выполнения объемов горных работ, а также технологической схемы, обеспечивающей ее соблюдение должен осуществляться с учетом необходимости комплексных исследований старогодних хвостохранилищ с определением разнородных слоев и их параметров. Параметры окисленного слоя определяются с целью исключения размыва высоко растворимых фаз в окисленной зоне и, как следствие, потери ценных компонентов, а также обоснования требований к выделению зон, характеризующихся недостаточной для расположения техники устойчивостью ввиду сильной обводненности объекта.

2.2. Разработка методики комплексного изучения старогодних хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд в динамике вторичного минералообразования

Обоснование режима горных работ, обеспечивающего планомерную, безопасную и эффективную разработку хранилищ отходов обогащения медно-колчеданных руд невозможно без комплексного изучения целого ряда важнейших свойств и характеристик техногенного сырья в динамике вторичного минералообразования, учет влияния которых необходим для разработки хвостохранилищ с наличием окисленной зоны в аспекте комплексного освоения недр. В этой связи в целях установления закономерностей изменения состава и свойств техногенного сырья в хвостохранилище проведены комплексные исследования отобранных хвостов обогащения медно-колчеданных руд.

В соответствии с анализом первичной информации о природном типе руд, а также с учетом горно-геологических условий техногенного объекта были определены условия опробования техногенного образования. Опробование заключалось в поинтервальном извлечении техногенного материала. Изначально, принятый интервал для опробования составлял 0,4 м, что напрямую связано с наличием в массиве хвостохранилища благородных металлов. Однако в ходе бурения, ввиду особенностей строения хвостохранилища, интервал варьировался от 0,2 м до 2 м.

В процессе отбора проб с целью определения физико-химических особенностей среды, как фактора наличия зоны окисления, с помощью полевого рН-метра BlueLab для каждой пробы были определены показатели кислотности среды.

Каждой пробе был присвоен уникальный номер, после чего техногенный материал был герметично упакован с целью сохранения природных характеристик и дальнейшего направления в задействованные в исследованиях лаборатории для изучения характеристик техногенного материала. Подготовка проб для лабораторных работ и исследований проводилась в соответствии со схемой обработки, представленной на рисунке 2.6.

В соответствии с анализом первичной информации о природном типе руд, описанной в первой главе настоящей диссертации, целью химического анализа было выявление основных ценных компонентов, как Cu, Zn, Au и Ag, а также иных металлов и редкоземельных элементов, имеющих содержание, достаточное для попутного извлечения при комплексном освоении техногенного минерального образования.

Для определения содержания основных элементов в техногенном сырье из различных зон был проведен комплексный химический анализ рядовых проб в лаборатории Сибайского горно-обогатительного комбината. Дубликаты проб были направлены в сертифицированную лабораторию Stewart Geochemical and Assay, где также проводилась оценка содержания попутных компонентов и вредных примесей (в количестве 51 элемента) методами атомно-эмиссионной спектрометрии и масс-

спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой после мультикислотного и царсководочного разложения.

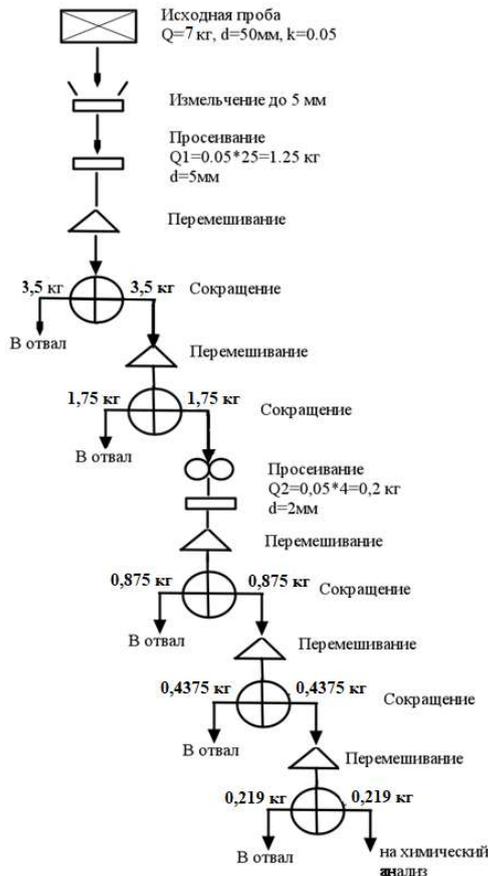


Рисунок 2. 6. Схема обработки проб для лабораторных исследований

Полный качественно-количественный анализ минерального состава проб осуществлялся на базе рентгеноструктурного анализа (XRD) и оптико-минералогических исследований. Рентгеноструктурный анализ был выполнен на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000 (Cu-анод, графитовый монохроматор); расчет содержания минеральных форм был проведен в программном продукте SIROQUANT V4.

Ввиду явного течения процессов окисления, о чем свидетельствует наличие охристой корки и техногенных сульфатов, определение качественно-количественного минерального состава позволяет определить не только технологические особенности переработки сырья с учетом стадии его окисления, но и выделить отличающиеся зоны или слои, что является важным фактором при обосновании общего порядка вовлечения техногенного сырья с различными характеристиками вещественного состава и свойств.

Комплексные оптико-минералогические исследования состава отходов переработки руд осуществлялись с использованием методик ФГБУ ВИМС «Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ», «Минераграфическое изучение руд», «Оптико-минералогический анализ шлиховых и дроблённых проб».

Ввиду наличия растворимых минеральных форм в техногенном материале, сначала оптико-минералогическое исследование производилось под биноклем для исследования структуры поверхности твердых тел. Дальнейшая подготовка образцов к минералогическим исследованиям с целью оценки раскрытия минералов на основе стереологического анализа изображений в шлифах, изучения наличия минералов и их форм выделения в хвостах были изготовлены эпоксидные шашки с предварительным обесшламливанием техногенного грунта для растворения минеральных форм, а также разделением по классам крупности: >2,5 мм; -2,5+1 мм; -1+0,25 мм; -0,25+0,1 мм; -0,1+0,071 мм; -0,071+0,044 мм.

Ввиду видимого наличия в пробах техногенных сульфатов, далее были проведены исследования растворимости минеральных форм, поскольку фактор растворимости определяет возможность применения в качестве способа разработки гидродобычу и иные способы.

Определение в процентном отношении растворимого вещества в пробах проводилось согласно специально разработанной методике определения растворимости [88]. Для этого пробы из массива хвостохранилища, отобранные и упакованные согласно требованиям ГОСТа 12071–2014, во избежание потерь естественной влажности, были предварительно высушены с учетом допустимых температур. Для исключения разрушения сульфатов и испарения кристаллически связанной влаги температура в процессе сушки не превышала 40°C. Затем высушенные пробы помещались в эксикатор на время приготовления растворителей.

Методикой было предусмотрено три серии опытов в соответствии с применением трех типов растворителей: дистиллированной воды комнатной

температуры; дистиллированной воды, нагретой до 60 °С и 2% раствора H₂SO₄, приготовленного на основе дистиллированной воды комнатной температуры [88].

Исследование растворимости минеральных форм осуществлялось последовательно выполнением четырех этапов [88]:

1. Приготовление 1 литра 2% раствора H₂SO₄ с соотношением согласно формуле:

$$V(90\%) = (V(2\%) * \rho(2\%) * 2) / (90 * \rho(90\%)), \quad (2.1)$$

где V(90%) – объем 90% кислоты, ρ(90%) – плотность 90% кислоты; ρ(2%) – плотность 2% кислоты; V(2%) – объем 2% кислоты (готовим 1 дм³).

Плотность растворов серной кислоты бралась из таблицы плотностей при температуре 20°С [63]. В результате рассчитывается объем 90% серной кислоты: $V(90\%) = (1000 * 1.0116 * 2) / (90 * 1.815) = 12,59$ (мл).

Полученный объем серной кислоты, согласно правилу [40], тонкой струйкой добавлялся в воду (по технике безопасности запрещено добавлять воду в кислоту), постоянно помешивая стеклянной палочкой.

Для достоверности полученной концентрации раствора серной кислоты определялась плотность раствора и сверялась с соответствующей таблицей [63].

2. После подготовки растворителей из эксикатора бралась навеска массой 50 г, помещалась в мерный стакан, объемом 150 мл, и заливалась растворителем в объеме 100 мл. Мерный стакан помещался на электронный встряхиватель (рисунок 2.7а) на 40 минут. После перемешивания до однородной массы полученная смесь отфильтровывалась в стеклянные колбы с помощью бумажных фильтров, диаметром 150 мм (рисунок 2.7б).

3. Колбы с фильтрами (рисунок 2.7в) отстаивались до практически полной фильтрации жидкости. Стоит отметить, что полученные водные растворы отличались по цветам, что обусловлено наличием различных растворимых минералов в техногенных пробах. После фильтрации растворителя остаток на фильтре трехкратно промывался дистиллированной водой температурой 60°С.

4. Далее фильтры помещались в сушильный шкаф на сутки, после чего высушенная часть взвешивалась непосредственно после извлечения из шкафа.

Разница между первоначальной массой и итоговой после сушки с навеской хвостов за вычетом массы фильтра принималась как масса растворенного вещества.

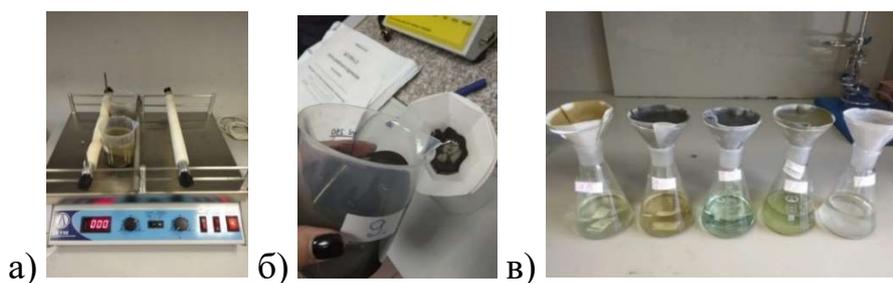


Рисунок 2. 7. Исследование растворимости минеральных форм: а – электронный встряхиватель, б – фильтрование полученного раствора, в – отстаивание фильтров

В рамках эксперимента проводилось макроскопическое описание минерального состава сухого остатка. Для этого, в соответствии с данными химического анализа были определены основные минеральные формы, и проводилась сопоставительная оценка с результатами рентгенофазового анализа.

Ввиду того, что наличие микробиологического фактора в техногенном материале, отобранном в зоне окисления сульфидного хвостохранилища, весьма характерно для таких объектов, а также в связи с тем, что этот фактор способен ускорить процесс окисления сульфидных минералов с высвобождением благородных металлов, были отобраны пробы для изучения бактериальных сообществ.

Образцы проб отбирались из различных зон хвостохранилища от поверхности на глубину 1,5 м с учетом особенностей рельефа его поверхности и местными особенностями циркуляции вод. Так, ввиду наличия видимой окисленной корки вблизи южной дамбы, была определена первая точка опробования (№ 74). Ввиду наличия на поверхности хвостохранилища техногенно образованного русла, обеспечивающего отток накопленных осадков с юго-запада на северо-восток техногенного образования из-за перепада высот, определены точки опробования № 75 и № 73.

Место расположения точки опробования № 75 обусловлено тем, что оно является самой возвышенной зоной в основной части старогоднего хвостохранилища и находится у истока техногенно образованного русла, где уже

протекают окислительные процессы, но еще не сформировалась охристая корка ввиду высокого процента увлажнения пород. Точка отбора № 73 расположена в зоне скопления и выхода на поверхность техногенных вод ввиду пониженной части рельефа. Расположение точек отбора в плане представлено на рисунке 2.8.

В ходе дальнейших исследований с помощью метабаркодирования проб определялось наличие микроорганизмов и выявлялись закономерности распространения их видового разнообразия от характера и стадии окисления.



Рисунок 2. 8. Отображения расположения скважин для исследования микробиологического фактора в зонах с различной степенью окисления

Для установления закономерностей зон формирования гипергенеза в массиве хвостохранилища были изучены характеристики состава, структуры и свойств техногенного сырья с выявлением основных влияющих факторов на формирование участков техногенного сырья в старогоднем хвостохранилище с учетом степени окисления, сегрегации, осаждения, изменения минерализации.

2.3. Комплексное исследование старогоднего хранилища отходов переработки медно-колчеданных руд Сибайской обогатительной фабрики в динамике вторичного минералообразования

С учетом особенностей рельефа поверхности хвостохранилища и местной циркуляцией вод, а также различными по степени окисления участками в основной части техногенного образования, которые выделены на базе отличия видимых характеристик грунтов, и степени их обводненности было произведено

районирование старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики.

Таким образом, в основной части хвостохранилища выделено 3 зоны: зона №1 – южная зона, где развита охристая ярозитовая корка, зона № 2 – юго-западная зона с преобладанием грунтов темно-серого цвета умеренно увлажненных, зона № 3 – северо-восточная зона с весьма обводненными грунтами. Также отдельно рассматривается северо-западная часть – зона № 4. Результат районирования представлен на рисунке 2.9.

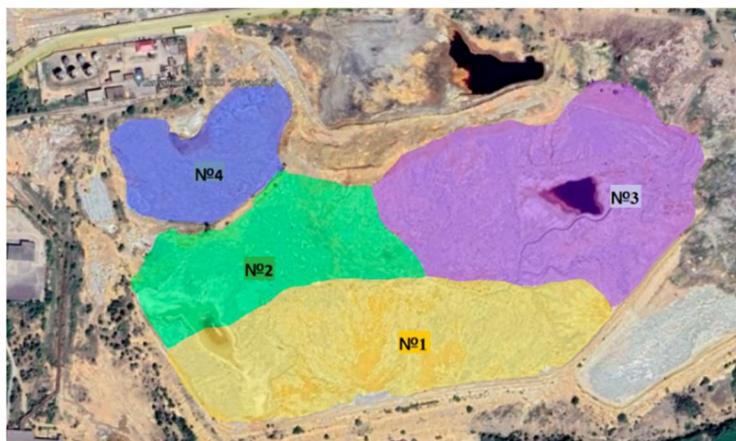


Рисунок 2. 9. Результат районирования Старогоднего хвостохранилища с учетом особенностей рельефа и характера окисления с местами отбора проб: №№ 1–3 – участки, выделенные в основной части хвостохранилища, № 4 – северо-западная часть хвостохранилища

Согласно результатам, полученным при обработке данных оценочных работ [103], произведенных в 2018 г. в ходе проходки шурфов в северо-западной части хвостохранилища (зона № 4 на рисунок 2.9), отделенной дамбой от основной части хвостохранилища (зоны №№ 1–3), содержание золота в техногенном материале изменяется в пределах от 0,3 до 1,9 г/т, серебра – от 3,7 до 16,6 г/т. Общие результаты химического анализа проб, отобранных в шурфах северо-участка № 4, представлены в таблице 2.1.

Характер изменения состава и свойств техногенного материала с глубиной, а также содержания в нем ценных компонентов представлен на примере проб, отобранных из шурфа №2 (рисунок 2.10). Такое чередование слоев, отличающихся по цвету и размерности частиц, содержанию элементов является следствием влияния изменяемых температурных условий, обусловленных сезонной сменой

климата и его влиянием на физико-химические процессы, протекающие круглогодично в хвостохранилище [31].

Таблица 2.1. Результаты химического анализа проб, отобранных в шурфах северо-западной части старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики

Номер образца	Ag	Au	As	Cd	S	Se	Te
	PPM	PPM	PPM	PPM	%	PPM	PPM
	0,01	0,2	0,1	0,01	0,05	0,2	0,01
	100	25	10000	1000	50	1000	500
1К 0-1	12,64	1,0	406,9	1,80	17,17	20,9	19,04
1К 1-2	6,19	0,7	343,1	6,92	16,80	13,4	10,89
1К 2-3	6,11	0,8	366,0	15,57	21,27	15,8	12,89
1К 3-4	7,46	0,9	425,6	10,06	24,16	23,9	20,04
1К 4-5	5,24	0,5	341,0	12,09	14,42	15,0	11,09
2К 0-0,5	9,94	0,8	306,1	1,57	21,00	18,4	10,23
2К 0,5-0,8	9,90	0,6	625,8	1,06	11,98	11,0	28,97
2К 1-2	7,13	0,7	367,9	14,72	18,10	12,3	10,27
2К 2-3	8,33	0,7	460,3	16,37	14,02	19,5	15,89
2К 3-4	9,68	0,5	712,8	8,04	18,75	14,6	16,22
2К 4-5	5,70	0,4	455,2	7,80	13,90	13,2	11,05
3К 0-1	16,60	2,0	526,4	15,26	31,26	29,6	10,97
3К 1-2	3,90	0,4	226,1	9,07	11,63	6,9	5,74
4К 0-1	6,28	0,6	435,8	5,74	15,77	11,1	11,52
4К 1-2	9,75	0,9	442,8	24,75	20,81	19,0	15,19
4К 2-3	7,00	0,7	309,8	11,56	15,78	12,5	11,74
4К 3-4	6,88	0,8	325,8	10,03	16,14	13,3	10,78
4К 4-5	7,34	0,9	444,6	8,45	17,61	15,4	14,71
4К 5-6	7,00	0,9	438,8	8,58	21,85	25,3	21,42

* 1К 0-1 расшифровывается: Шурф №1, глубина опробования 0-1

Анализ изменения содержания основных элементов с глубиной свидетельствует о том, что изменение содержания золота и серебра коррелируют между собой.

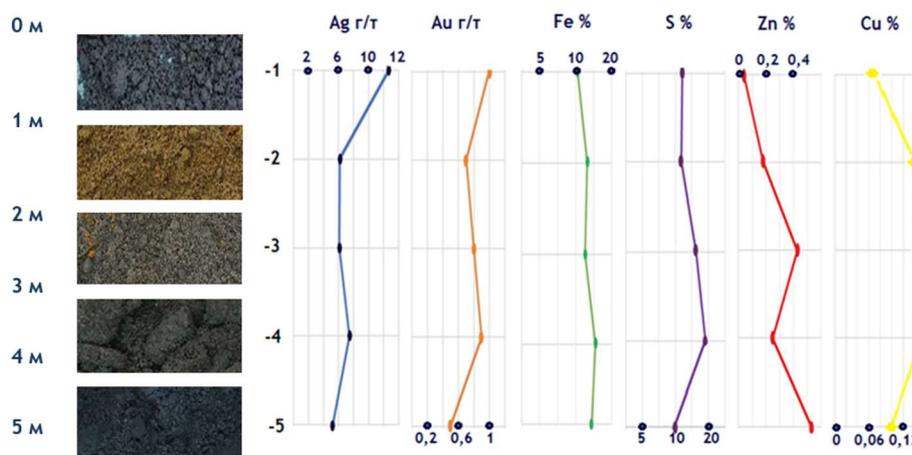


Рисунок 2. 10. Анализ изменения содержания химических элементов по глубине

Также стоит отметить, что наибольшие содержания этих элементов зафиксированы в верхнем слое хвостохранилища, в пробах, отобранных с глубины

0–1 м. В целом это подтверждает то, что благородные металлы, высвободившись из сульфидных соединений в процессе окисления верхней части техногенного образования, еще не успели гравитационно опуститься на глубину. Кроме того, выше по разрезу расположен склад пиритного концентрата, обогащенного драгоценными металлами. Этот факт подтверждает экономическую привлекательность верхнего слоя в северо-западной части данного техногенного объекта и доказывает необходимость выемки техногенного сырья без снятия верхней части в виде рекультивационного слоя почвы.

Визуальное наблюдение вторичных форм в техногенном массиве (рисунок 2.7в) обусловило проведение комплекса исследований физико-химических условий и минералогических особенностей техногенного сырья в верхней части хвостохранилища с целью установления границ и особенностей развития зоны гипергенеза. Ввиду того, что зона окисления характеризуется показателем рН среды < 3 , были проанализированы значения кислотности в отобранных пробах. По результатам исследования рН среды в техногенном материале, отобранном в верхней части хвостохранилища, построены профили, представленные на рисунке 2.11.

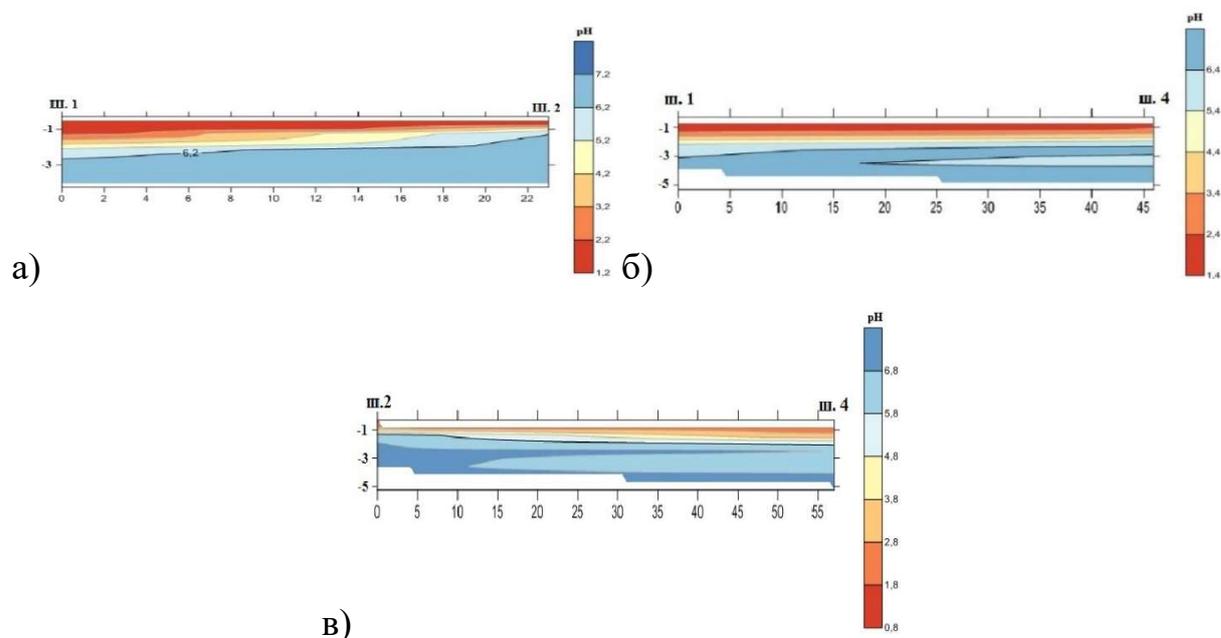


Рисунок 2. 11. Результаты исследования рН среды в техногенном материале, отобранном в шурфах №№1-4, по профилям: а - ш.№1 – ш.№2, б - ш.№1 – ш.№4, в - ш.№2 – ш.№4.

В ходе анализа полученных результатов и построенных профилей установлено, что значение рН среды в пробах с глубины отбора до 2 м изменяется от 1 до 2, в пробах с глубины отбора ниже 2 м приближается к нейтральному уровню – от 5 до 6. На основании усредненных значений рН по всем пробам, построен график изменения кислотности среды с глубиной (рисунок 2.12).

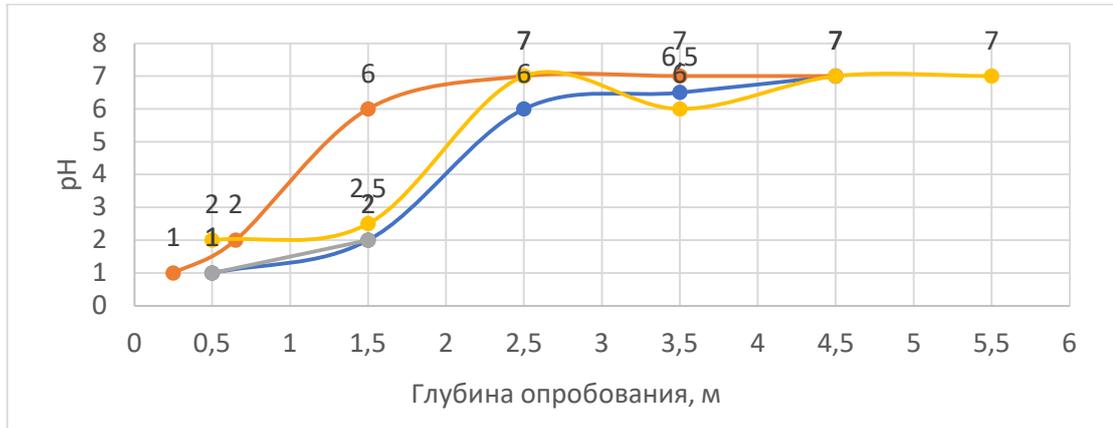


Рисунок 2. 12. График изменения рН среды по глубине хвостохранилища по данным опробования шурфов

Анализ графика изменения рН среды по глубине хвостохранилища позволил определить, что интенсивное окисление протекает в верхней части хвостохранилища, на глубине до 1,5–2 м.

С учетом перспектив продолжения исследований хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики в пределах основной части хвостохранилища были пробурены скважины на полную мощность техногенного объекта. Исследование рН среды в пробах из скважин подтвердило результаты определения рН в пробах, отобранных из шурфов. До глубины 2 м характерна кислая среда, а ниже по разрезу приближается к нейтральной.

Анализ данных о химическом составе проб показал, что содержание Au изменяется в теле хвостохранилища от 0,3 до 2,2 г/т, Ag – от 3,6 до 23,7 г/т, Cu – от 0,04 до 0,39 %, Zn – от 0,13 до 1,41 %, Fe – от 3,6 до 23,7 %, S – от 8,17 до 43,4 %. Кроме того, на базе обработанных результатов химического анализа, с целью выявления корреляционных зависимостей между содержанием ценных элементов были построены графики изменения усредненного содержания основных компонентов с глубиной (рисунок 2.13–2.15).

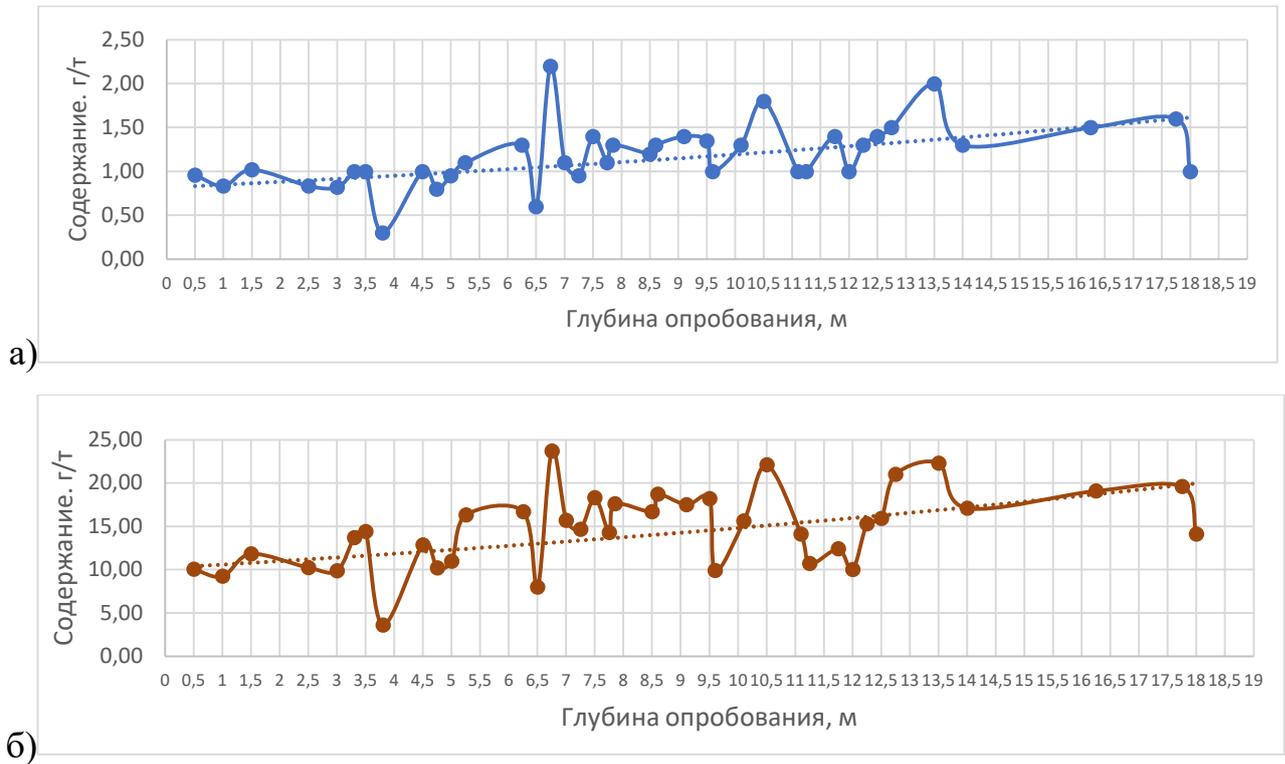


Рисунок 2. 13. Сравнительный анализ изменения усреднённого содержания химических элементов (г/т) с глубиной (м) по результатам опробования скважин: а – Au, б – Ag.

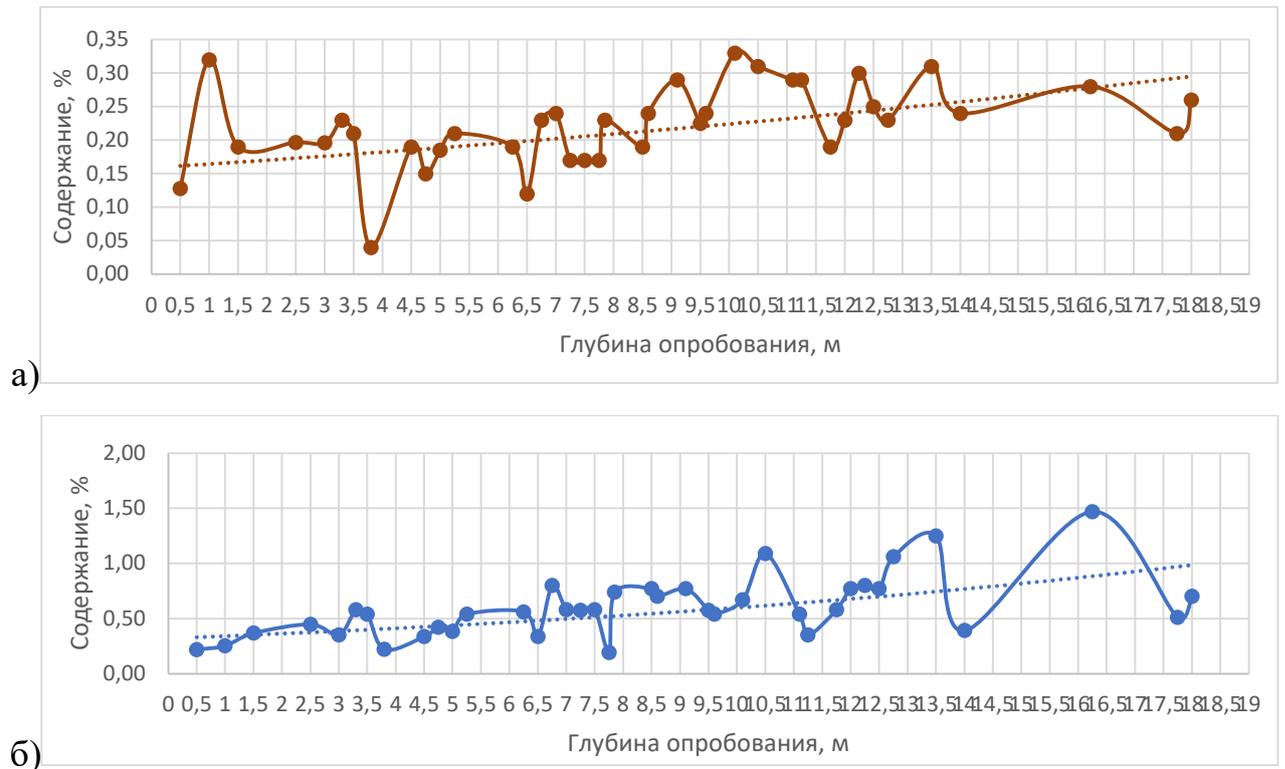


Рисунок 2. 14. Сравнительный анализ изменения усреднённого содержания химических элементов (%) с глубиной (м) по результатам опробования скважин: а – Cu, б – Zn.

Анализ данных о содержании Au и Ag (рисунок 2.13 а, б), показывает их полную корреляцию, как и в случае опробования шурфов. Несмотря на пики концентраций благородных металлов на глубинах 6.7, 10.5 и 13.5 м, в целом можно отметить повышение их содержания с глубиной. Снижение концентрации драгоценных металлов на отметке 18 м обусловлено близостью плотика, представленного глинистыми породами.

Между содержанием Cu и Zn корреляция отсутствует (рисунок 2.14).

Корреляция среднего содержания Fe (красный) и S (синий) (рисунок 2.15) обусловлена наличием сульфидов железа, в данном случае – пирита.

Выявленные корреляционные связи позволяют производить оценку запасов техногенного сырья по компонентам на базе детального и моделирования хвостохранилища, что позволяет снизить затраты на опробование содержания иных элементов.

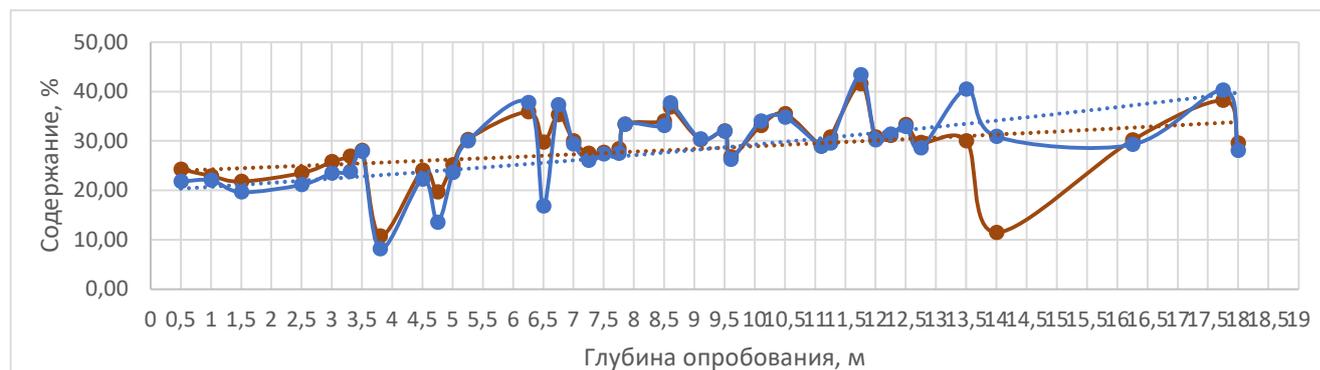


Рисунок 2. 15. Сравнительный анализ изменения усреднённого содержания химических элементов (%) с глубиной (м) по результатам опробования скважин

Для подтверждения гипотезы о потере качества техногенного сырья в период его хранения ввиду миграции тяжелых металлов в окружающую среду за счет природного выщелачивания были систематизированы результаты исследований химического состава хвостов в динамике их хранения (таблица 2.2). Данные из таблицы 2.2 свидетельствуют о том, что в процессе хранения хвостов обогащения содержание меди практически не изменилось, цинка – увеличилось примерно в 1,5 раза. Это может быть связано с несовпадением точек оценки в различные периоды. Кроме того, стоит отметить, что содержание железа и серы снизилось, что обусловлено окислением сульфидных минералов с последующим разложением и

дальнейшей миграцией элементов вглубь хвостохранилища и в окружающую среду.

Таблица 2.2. Характер изменения усредненных содержаний ценных компонентов в старогоднем хвостохранилище Сибайской ОФ

Наименование объекта	Год исследования	Содержание основных элементов	
Старогоднее хвостохранилище Сибайской ОФ	2013	Cu %	0,2
		Zn %	0,16
		S %	28,68
		Fe %	34,44
		Au г/т	0,4
		Ag г/т	3,7
	2022	Cu %	0,21
		Zn %	0,51
		S %	26,28
		Fe %	27,32
		Au г/т	1,09
		Ag г/т	13,47

Содержание благородных металлов увеличилось. Поскольку окисление сульфидов происходит уже в хвостохранилище, предполагается переход золота из окисляющихся сульфидов в растворённую форму и его дальнейшая миграция. Таким образом, на момент исследования верхняя часть техногенного образования на глубину развития зоны гипергенеза является весьма обогащенной благородными металлами, что доказывает необходимость ее выемки в последующую переработкой до момента миграции благородных металлов.

Также установлен крайне неравномерный характер распределения ценных компонентов по классам крупности в исследуемых пробах техногенного сырья. Данные таблиц 2.3 и 2.4 свидетельствуют о том, что наибольшее содержание благородных металлов приурочено к мелким классам крупности отходов переработки руд, что объясняется тонкозернистой вкрапленностью благородных металлов.

Для установления минерального состава, определения содержания сульфатных форм, указывающих на развитие зоны гипергенеза, и характера изменения их количества с глубиной был проведен рентгенофазовый анализ проб (таблица 2.5.).

Таблица 2.3. Содержание химических элементов по классам крупности

№ п/п	Класс крупности, мм	Содержание			
		Au, г/т	Ag, г/т	Cu, %	Zn, %
1.	-5+0,25	0,44	0,04	0,16	0,15
2.	-0,25+0,071	0,21	0,03	0,084	0,16
3.	-0.071+0,04	0,66	0,12	0,13	0,21
4.	-0,04+0	1,26	0,17	0,33	0,27

Таблица 2.4. Распределение химических элементов по классам крупности

№ п/п	Класс крупности, мм	Распределение по классам крупности, %			
		Au	Ag	Cu	Zn
1.	-5+0,25	1,34	0,90	1,83	1,94
2.	-0,25+0,071	2,93	3,09	4,42	9,54
3.	-0.071+0,04	2,28	3,06	1,69	3,10
4.	-0,04+0	93,45	92,96	92,07	85,42

Таблица 2.5. Результаты исследования фазового минерального состава техногенного сырья старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики

Минеральный состав (прибл. вес. %)	Основная часть												Северо-западная часть (№4)
	Северо-восточная зона (№3)						Южная зона (№1)			Юго-западная зона (№2)			
№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
кварц	32	28	27	13	20	17	38	18	24	7	21	21	55
плагиоклаз	19	19	19	10	14	16	26	16	35	6	15	20	11
пирит	16	32	25	25	38	48	10	39	18	56	39	36	6
доломит					3								
ярозит	11	6	8	2	2	1	10	1	1				3
роценит	2	4	3	7	1		4	10		3			
мелантерит	2	3	7	37	14	3			4	25	10	8	
гипс	12	8	11	5	4	3	10	5	8	4	4	4	17
хлорит					5	8	3	7	9		8	9	
слюда	5					4		4			2	2	8

Согласно данным из таблицы 2.5, главным сульфидным минералом является пирит (6–56 %), а породные минералы, среди которых преобладает кварц и плагиоклаз, составляющие соответственно, 7–55% и 6–35% от массы хвостов. Стоит отметить практическое отсутствие карбонатных минералов (доломит обнаружен лишь в одной пробе в объеме 3%), это обеспечивает большую скорость окисления за счет отсутствия сдерживающих этот процесс восстановительных

минералов. Также установлено, что минеральная ассоциация, образующаяся в процессе вторичного минералообразования, представлена: ярозитом (1–11%), роценитом (1–10%) и мелантеритом (2–37%).

Наличие вторичных высоко растворимых минеральных форм, таких как роценит и мелантерит, образование которых связано преимущественно с кристаллизацией из растворов, свидетельствует о том, что в верхней части техногенного минерального образования протекают процессы окисления и выщелачивания, что также позволяет рассматривать хвосты обогащения как сырье, пригодное для реализации комбинированных способов переработки. Также стоит отметить, что мелантерит – редкий сезонный минерал. Рост кристаллов происходит в жаркую погоду на агрегатах (в т. ч. на биоморфозах) пирита и марказита, окисляющихся на воздухе при участии аэробных бактерий. Этот факт может определить необходимость сезонной разработки техногенного образования.

Анализ минерального состава проб из основной части техногенного образования позволил установить:

– наибольшее количество хорошо- и среднерастворимых сульфатов, характеризующих степень засоленности грунтов, выявлено в пробах, отобранных в северо-восточной зоне техногенного минерального образования: содержание мелантерита, роценита и гипса достигает 37, 7 и 12%, соответственно, что свидетельствует о слабой устойчивости техногенных грунтов в этой зоне и, следовательно, обуславливает риск ведения горных работ по условиям нарушения устойчивости горнотехнических конструкций;

– минеральный состав техногенного грунта южной зоны – наличие ярозита до 10%, содержание мелантерита 4%, пирита 10–39% – указывает на то, что эта зона характеризуется окислением 3 стадии;

– отсутствие ярозита в юго-западной зоне, при одновременном содержании пирита в количестве 36–56% и мелантерита – 8–25%, указывает, что в этой зоне протекает окисление 2 стадии;

– несмотря на наличие по результатам фазового минерального анализа ярозита в северо-восточной зоне техногенного минерального образования, где отсутствует видимая окисленная ярозитовая корка, эта зона также характеризуется 2 стадией окисления, а именно, ее условно большей интенсивностью вторичного минералообразования относительно характера окисления в юго-западной зоне: ввиду более низкого содержания пирита (16-48%) и более высокой концентрацией мелантерита (2-37%).

Привнос ярозита в верхние слои северо-восточной зоны хвостохранилища обусловлен особенностями рельефа поверхности, а именно ее расположением в пониженном участке рельефа, ввиду чего, благодаря климатическим условиям осуществляется перенос ярозита с южной, более возвышенной зоны, где развита ярозитовая корка.

Также стоит отметить, что наименьшее содержание пирита в количестве 6% зафиксировано в пробах, отобранных с северо-западной части техногенного объекта, характеризующейся более осушенными условиями, преобладанием кварца (55%) и гипса (17%). Это свидетельствует о том, что в данной части техногенного объекта процессы окисления пирита происходят дольше, чем в основной, и находятся в завершающей 3 стадии.

По данным оптико-минералогического анализа в составе хвостов обогащения главным рудным минералом является пирит. Нерудные минералы представлены кварцем, гипсом и полевыми шпатами. Ярозит, как весьма устойчивый гипергенный минерал, является основной составляющей сульфатного цемента в фракциях серого цвета, поэтому минеральная масса техногенного образования в зонах, где только начинается образование ярозита, взаимодействует с сульфатным цементом и в результате образует более прочные связи с иными минералами.

Так, в процессе хранения техногенного сырья соотношение сульфидных минералов и нерудных сокращается. Выполненная оценка минерального состава сырья показала достаточно хорошее раскрытие сростков сульфидных минералов, благоприятное для переработки их физико-химическими технологиями при минимальных дополнительных энергетических затратах на доизмельчение сырья.

Ввиду высокой растворимости многих техногенных сульфатов проведены исследования растворимости минеральных форм в отобранных пробах. Для визуального представления полученных данных были построены графические изменения процента растворимости минеральных форм на примере результатов по одному из профилей опробования (рисунок 2.16).

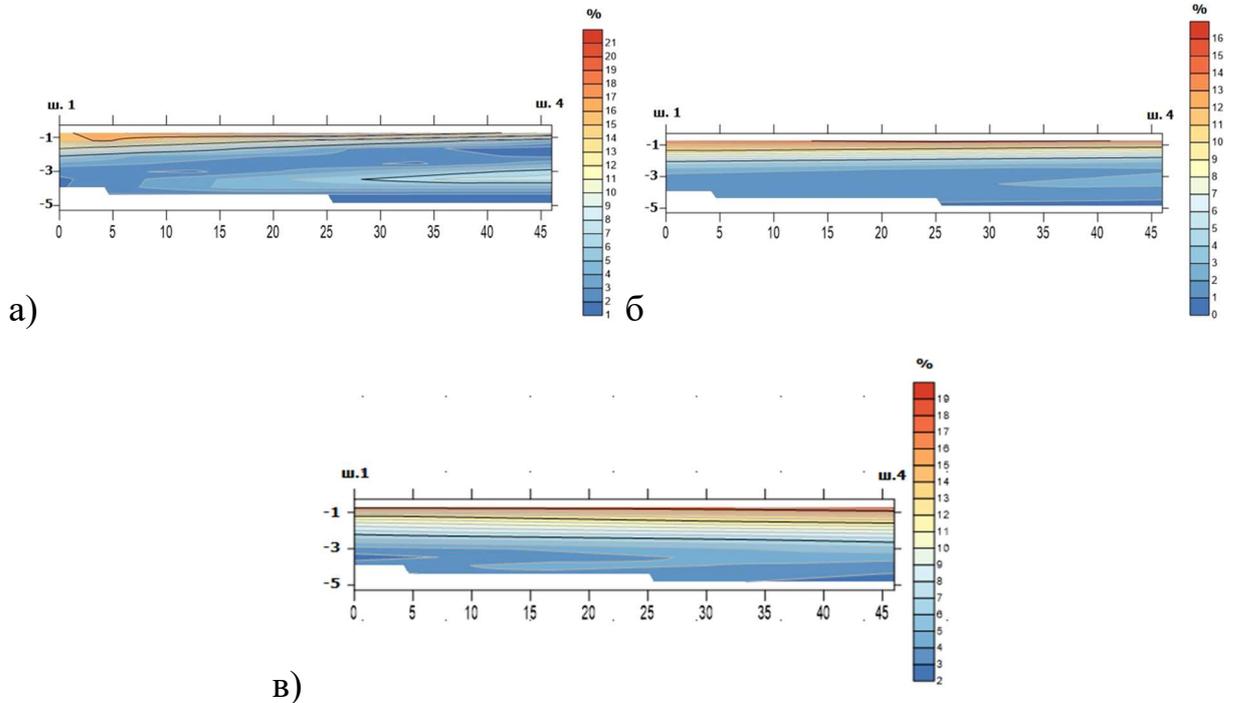


Рисунок 2. 16. Графики изменения растворимости минеральных форм с глубиной по данным опробования шурфов. Растворители: а - дистиллированная вода комнатной температуры, б - дистиллированная вода, нагретая до 60 °С, в - 2% раствор H_2SO_4

На основании полученных данных установлена закономерность снижения растворимости минеральных форм по глубине хвостохранилища (рисунок 2.17).

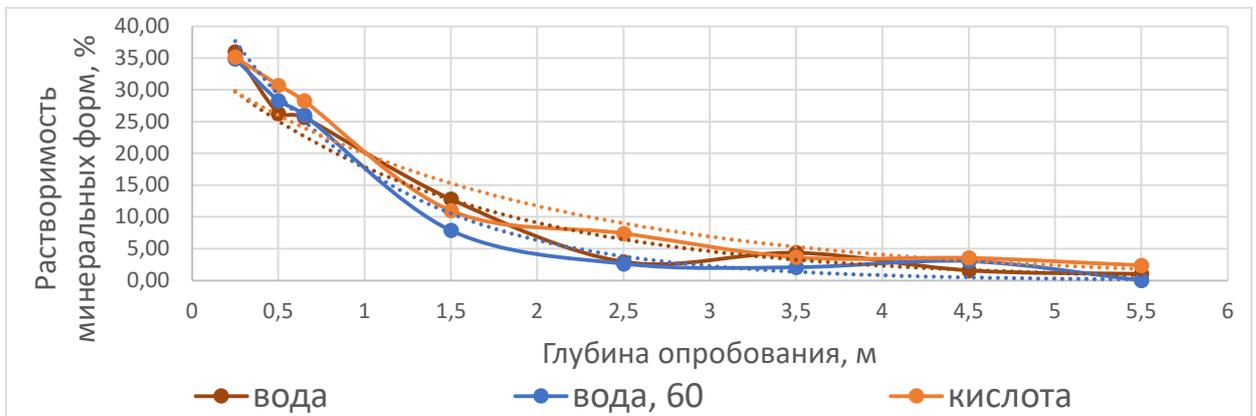


Рисунок 2. 17. Закономерность изменения растворимости минеральных форм с глубиной по усредненным данным в различных растворителях

Представленные на графике закономерности свидетельствуют о том, что в настоящий момент глубина зоны с высоко растворимыми минералам развита до глубины 3,5 м. При этом, до глубины 2 м растворимость минеральных форм изменяется в пределах от 8 до 36% в единичных пробах, на интервале от 2 до 3,5 м – от 2 до 8 %, после 3,5 м – максимальная доля растворимости минеральных форм в пробе составляет 3%. Этот факт доказывает необходимость ее снятия отдельно от основной части массива для последующей гидрометаллургической переработки методами выщелачивания.

Как было доказано ранее, верхняя часть техногенного массива, образованного из отходов переработки медно-колчеданных руд, характеризуется кислыми условиями (рН – 1–2) вследствие протон-генерирующего процесса окисления остаточных сульфидов кислородом воздуха. Это обуславливает наличие благоприятной среды для образования и дальнейшего развития микробиологических организмов, поскольку основными требованиями к условиям их благоприятного развития является устойчивость к высоким концентрациям ионов металлов и низким значениям рН (до 3).

В связи с тем, что наличие микробной деятельности в отвалах способно ускорить окисление сульфидных минералов, а также оказать влияние на химические и физические процессы в техногенных образованиях, в ходе дальнейших исследований проб, отобранных из различных зон техногенного образования, с помощью метабаркодирования определялось качественно-количественное содержание микроорганизмов, результаты которого представлены в таблицах 2.6–2.9.

Анализ наличия бактериальных сообществ в южной зоне хвостохранилища позволил установить, что там преобладает сообщество *Ferroacidibacillus* spp (таблица 2.6).

Нуклеотидные последовательности фрагментов гена 16S рРНК показали 100% сходство с видом *Ferroacidibacillus* (*Fr.*) *organovorans*. Бактерии этого рода отнесены к гетеротрофам, которым для получения энергии для эффективного роста необходимы как неорганические, так и органические соединения.

Таблица 2.6. Систематизация данных изменения минералогического состава с результатом метабаркодирования в пробах, отобранных в южной зоне основной части хвостохранилища по глубине

№ пр	Глубина отбора (м)	Основные минералы (%)	Состав сообщества пробы (в % от общего числа нуклеотидных последовательностей переменного участка гена 16S рРНК), определенный метабаркодированием
7	0,5	Кварц 38, Плагиоклаз 26, Пирит 10, Ярозит 10, Роценит 4, Гипс 10, Хлорит 3	<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Acinetobacter</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ <i>Kocuria</i> ■ <i>n/o, Staphylococcaceae</i> ■ <i>Ochrobactrum</i> ■ <i>n/o, Staphylococcaceae</i> ■ <i>Brevundimonas</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Acidibacillus</i> ■ <i>Acidibacillus</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе
8	1	Кварц 18, Плагиоклаз 16, Пирит 39, Ярозит 1, Роценит 10, Гипс 5, Хлорит 7, Слюда 4	<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Acinetobacter</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ <i>Acidibacillus</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе
9	1,5	Кварц 24 Плагиоклаз 35 Пирит 18 Ярозит 1 Мелантерит 4 Гипс 8 Хлорит 9	<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Acidibacillus</i> ■ <i>Sulfobacillus</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ <i>Staphylococcus</i> ■ <i>Lactobacillus</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе

Оптимальная температура и pH для *Fr.organovorans* составляют 30°C и 2,9 (1,9 в случае типового штамма) соответственно. Мезофильные виды *Fr.organovorans* осуществляют диссимиляционное окисление двухвалентного железа и, следовательно, окислительное растворение сульфидных минералов, таких как пирит [15, 21, 12].

В слоях южной зоны хвостохранилища, характеризующихся ярозитовой коркой, где содержание ярозита – 1–10%, доля нуклеотидных последовательностей, отнесенных к *Ferroacidibacillus* sp. изменялась от 71 до 90%, снижаясь в 2,4 раза на глубине 1,5 м (таблица 2.6, проба 9). В этом слое преобладали и другие ацидофилы, вероятно, способствующие окислению сульфидов: *Sulfobacillus* spp. (три разные последовательности гена 16S рРНК), с общей долей в микробном сообществе 43%. Наибольшая доля нуклеотидных последовательностей фрагмента гена 16S рРНК показала сходство на 99,5% с одним из валидированных видов *Sulfobacillus*: *Sb. thermotolerans* Kr1T [1, 26]. Наибольшее сходство (99,8%) отмечено с некультивируемым *Sulfobacillus* sp. Два других преобладающих вида *Sulfobacillus* spp. выявлено в ацидофильном сообществе зоны № 1 на глубине 1,5 м, что показало 100% идентичность *Sulfobacillus* sp. Y0017 и некультивированные *Sulfobacillus* sp. (сходство 99,8%) из кислой области (pH 2,7) заброшенного полусушливого хвостохранилища свинцово-цинкового рудника [20]. Штамм Y0017 представляет собой высокоэффективный изолят, окисляющий пирит при 45 °С, с верхним температурным пределом 50 °С [13].

Бактерии рода *Sulfobacillus* идентифицируются в процессах биовыщелачивания и отходах шахт, а также в месторождениях сульфидных руд, содержащих драгоценные и цветные металлы, кислых шахтных дренажах и термальных источниках. По сравнению с *o. Organovorans*, выявленных в том же микробном сообществе, миксотрофные бактерии *Sulfobacillus* обладают более широкими способностями к окислению неорганических субстратов: двухвалентного железа, восстановленных неорганических соединений серы, элементарной серы и сульфидных минералов в присутствии небольших количеств

органические вещества, использующие в качестве источников энергии как неорганические, так и органические субстраты [77]. Оптимальный рост бактерий *Sulfobacillus* происходит при температуре ≥ 39 °С, а нижний температурный предел – < 20 °С.

Доля остальных бактерий (по доле последовательностей гена 16S рНК), выявленных в структуре сообществ зоны №1, не превышала 1–8%, при этом доля *Pseudomonas* spp. – 2–8% (таблица 2.6, проба 9). Хотя чрезвычайно низкие значения рН выходят за пределы оптимального диапазона роста этих второстепенных бактериальных компонентов сообществ, они могут быть характерны для кислых искусственных сред. Данные, полученные в этом исследовании и предыдущих исследованиях разных авторов, а также небольшое количество этих бактерий по сравнению с преобладающими членами в микробных сообществах могут свидетельствовать об их способности выживать в таких условиях без активной пролиферации и функционирования.

В юго-западной зоне хвостохранилища сообщество было представлено двумя преобладающими родами: *Pseudomonas* (доля, 48–56% всех последовательностей) и *Stenotrophomonas* (21–23%) (таблица 2.7). Остальные бактерии были второстепенными компонентами сообществ. Эта зона хвостохранилища характеризовалась высоким содержанием пирита (снижающимся с глубиной от 56 до 36%) и отсутствием ярозита, что свидетельствует о незначительном биоокислении двухвалентного железа и, следовательно, сульфидов ацидофильными хемолитотрофами.

Северо-восточная зона характеризовалась качественной структурой сообществ, отличной от других зон: *Ferroplasma* (*Fm.*) spp. (100% сходство с *Fm. acidiphilum*), преобладающее на глубинах ≤ 1 м (таблица 2.8). Эти ацидофильные археи окисляют двухвалентное железо при низких значениях рН в присутствии небольших количеств органического материала. Их часто называют членами ацидофильных сообществ месторождений сульфидных руд, процессов биовыщелачивания сульфидного сырья и кислотного дренажа шахт [101].

Таблица 2.7. Систематизация данных изменения минералогического состава с результатом метабаркодирования в пробах, отобранных в юго-западной зоне основной части хвостохранилища по глубине

№ пр	Глубина отбора (м)	Основные минералы (%)	Состав сообщества пробы (в % от общего числа нуклеотидных последовательностей варибельного участка гена 16S рНК), определенный метабаркодированием
10	0,5	Кварц 7, Плагиоклаз 6, Пирит 56, Роценит 3, Мелантерит 25, Гипс 4,	<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ <i>Staphylococcus</i> ■ <i>Escherichia-Shigella</i> ■ <i>Achromobacter</i> ■ <i>Kocuria</i> ■ <i>Pedobacter</i> ■ <i>Sphingobacterium</i> ■ <i>Corynebacterium 1</i> ■ <i>Alcaligenes</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе
11	1	Кварц 21, Плагиоклаз 15, Пирит 39, Мелантерит 10 Гипс 4, Хлорит 8, Слюда 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ <i>Escherichia-Shigella</i> ■ <i>Staphylococcus</i> ■ <i>Achromobacter</i> ■ <i>Sphingobacterium</i> ■ <i>Kocuria</i> ■ <i>Acinetobacter</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе
12	1,5	Кварц 21, Плагиоклаз 20, Пирит 36, Мелантерит 8, Гипс 4, Хлорит 9, Слюда 2	<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ <i>Escherichia-Shigella</i> ■ <i>Staphylococcus</i> ■ <i>Achromobacter</i> ■ <i>Kocuria</i> ■ <i>Pedobacter</i> ■ <i>Sphingobacterium</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе

Таблица 2.8. Систематизация данных изменения минералогического состава с результатом метабаркодирования в пробах, отобранных в северо-восточной зоне основной части хвостохранилища по глубине

№	Глубина отбора (м)	Основные минералы (%)	Состав сообщества пробы (в % от общего числа нуклеотидных последовательностей варибельного участка гена 16S рРНК), определенный метабаркодированием
1	2	3	4
1	0,3	Кварц 32, Плагиоклаз 19, Пирит 16, Ярозит 11, Роценит 3, Мелантерит 2, Гипс 12, Слюда 5	<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Ferroplasma</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Acinetobacter</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ <i>Kocuria</i> ■ <i>n/o, Staphylococcaceae</i> ■ <i>Ochrobactrum</i> ■ <i>Staphylococcus</i> ■ <i>n/o, Staphylococcaceae</i> ■ <i>Brevundimonas</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе
2	0,6	Кварц 28, Плагиоклаз 19, Пирит 32, Ярозит 6, Роценит 4, Мелантерит 3, Гипс 8	<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Ferroplasma</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Acinetobacter</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ <i>Kocuria</i> ■ <i>n/o, Staphylococcaceae</i> ■ <i>Ochrobactrum</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе
3	0,8	Кварц 27, Плагиоклаз 19, Пирит 25, Ярозит 8, Роценит 3, Мелантерит 7, Гипс 11	<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Ferroplasma</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Acinetobacter</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ <i>Kocuria</i> ■ <i>n/o, Staphylococcaceae</i> ■ <i>Ochrobactrum</i> ■ <i>Brevundimonas</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Escherichia-Shigella</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе

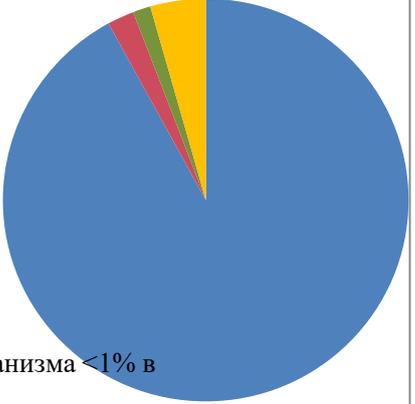
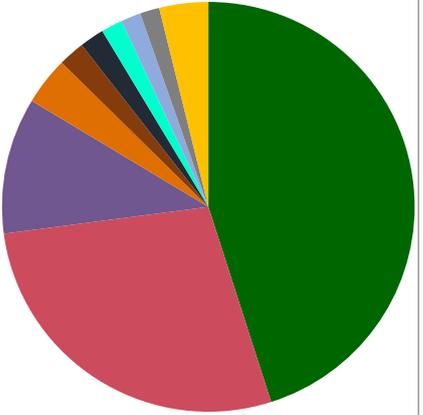
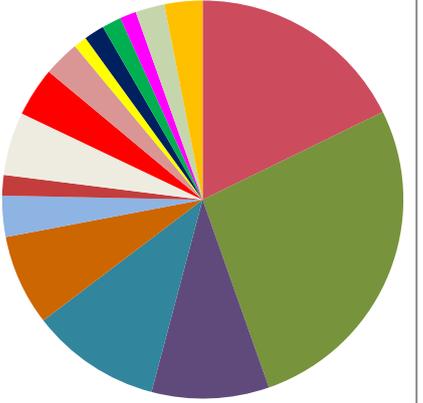
№	Глубина отбора (м)	Основные минералы (%)	Состав сообщества пробы (в % от общего числа нуклеотидных последовательностей переменного участка гена 16S рРНК), определенный метабаркодированием
1	2	3	4
4	1	Кварц 13, Плаггиоклаз 10, Пирит 25, Ярозит 2, Роценит 7, Мелантерит 37, Гипс 5	 <ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Ferroplasma</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Acinetobacter</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе
5	1,2	Кварц 20 Плаггиоклаз 14 Пирит 38 Доломит 3 Ярозит 2 Роценит 1 Мелантерит 14 Гипс 4 Хлорит 5	 <ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Acidibacillus</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ <i>Staphylococcus</i> ■ <i>Streptococcus</i> ■ <i>Escherichia-Shigella</i> ■ <i>Achromobacter</i> ■ <i>Kocuria</i> ■ <i>Sphingobacterium</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе
6	1,4	Кварц 17, Плаггиоклаз 16, Пирит 48, Ярозит 1, Мелантерит 3, Гипс 3, Хлорит 8, Слюда 4	 <ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Acinetobacter</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ <i>Kocuria</i> ■ n/o, <i>Staphylococcaceae</i> ■ <i>Ochrobactrum</i> ■ <i>Staphylococcus</i> ■ n/o, <i>Staphylococcaceae</i> ■ <i>Brevundimonas</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Serratia</i> ■ <i>Escherichia-Shigella</i> ■ <i>Cellulomonas</i> ■ <i>Cellulosimicrobium</i> ■ <i>Lactobacillus</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе

Таблица 2.9. Систематизация данных минералогического состава с результатом метабаркодирования в пробах, отобранных в северо-западной части хвостохранилища

№	Глубина отбора (м)	Основные минералы (%)	Состав сообщества пробы (в % от общего числа нуклеотидных последовательностей переменного участка гена 16S рРНК), определенный метабаркодированием
13	1	Кварц 55, Плагиоклаз 11, Пирит 6, Ярозит 3, Гипс 17, Слюда 8	<ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Acidibacillus</i> ■ <i>Sulfoacidibacillus</i> ■ <i>Pseudomonas</i> ■ <i>Stenotrophomonas</i> ■ Другие, каждого микроорганизма <1% в сообществе

Доля *Pseudomonas* spp. находился в пределах 2–10% на глубине 0,3–1,0 м и возрастает примерно в 10 раз в более глубоких слоях (таблица 2.8, пробы 5 и 6). В этих слоях происходила выраженная преобладание членов сообщества. На глубине 1,2 м *Ferroacidibacillus* spp. преобладали, а на глубине 1,4 м окислители железа и серы не выявлены.

При анализе северо-западной зоны (таблица 2.9), характеризующейся 3% ярозита в составе пробы, в окислительные процессы слоя на глубине 1 м, вероятно, внесли вклад два основных рода: *Sulfoacidibacillus* (Sf.) и сульфобациллы. Род *Sulfoacidibacillus* был представлен теми же видами, что и в южной зоне (нуклеотидные последовательности переменных участков гена 16S рРНК показали сходство со штаммом Y0017 на 100 и 99,8%) (таблица 2.6, проба 9). *Sulfoacidibacillus* spp. (100 и 99,5% сходство с *Sf. thermotolerans*) – бывший род *Acidibacillus*, принадлежащий к семейству *Alicyclobacillaceae* (тип *Firmicutes*). Эти бактерии сходны с *Ferroacidibacillus* spp., определяются в пробах из других зон хвостохранилища и окисляют не только двухвалентное железо, но и восстановленных неорганических соединений серы вместе с утилизацией органических соединений (предпочитают органические вещества неорганическим субстратам). Умеренно термофильные и чрезвычайно ацидофильные бактерии этого рода характеризуются температурным

оптимумом роста 43 °С и оптимумом рН 1,8 (Holanda et al., 2016; Johnson et al., 2023). Виды Ферроплазмы также были выявлены в сообществе (100% сходство с *Fm. acidiphilum*).

Таким образом, установлено, что в зоне гипергенеза, развитой в старогоднем Сибайском хвостохранилище на глубину в среднем 2 м, и отличающейся степенью окисления ввиду отличительного минерального состава и характеристик техногенного грунта в целом, преобладают серо- и железooksисляющие бактерии, инициирующие окислительно-восстановительные процессы, в результате чего происходит ускоренное преобразование техногенного сырья.

При длительном хранении хвостов обогащения в условиях техногенно измененной среды происходит выщелачивание с образованием высокообогащенных ценными компонентами растворов, что влечет вынос содержащихся ценных элементов за пределы хвостохранилища. Этот факт обуславливает необходимость срочного принятия мер по вовлечению в эксплуатацию техногенного образования.

Кроме того, выявленный факт наличия микроорганизмов и их влияния на процессы окисления доказывает возможность целенаправленного биоокисления техногенных грунтов, что облегчит извлечение металлов из тела хвостохранилища. Поскольку понимание закономерностей изменения видового разнообразия микроорганизмов в зависимости от стадий окисления обеспечит возможность интенсификации процессов выщелачивания путем обоснования рационального качественно-количественного состава сообществ микроорганизмов и режимов орошения с извлечением в продуктивный раствор комплекса ценных компонентов.

Также важно исследовать взаимосвязь свойств техногенного сырья и качественно-количественной оценки микробиологических сообществ. Поскольку, на первый взгляд, видовое отличие отобранных проб с различных участков старогоднего Сибайского хвостохранилища, а также установленные закономерности преобладания различных видов сообществ свидетельствуют о высокой вероятности влияния микробиологического фактор на физико-механические характеристики техногенного сырья в зоне гипергенеза [106].

Таким образом, на основе полученных результатов [24] проведено районирование Сибайского хвостохранилища по глубине для выбора технологических решений, представленное в таблице 2.10.

Таблица 2.10. Районирование Сибайского хвостохранилища по глубине для выбора технологических решений

№ п/п	Название слоя	Глубина слоя	Характеристика слоя	Принципы обоснования параметров геотехнологии
1	Окисленный слой (зона гипергенеза)	0–3,5 м	Кислая среда с рН=1-2 Растворимость минеральных форм изменяется в пределах 2–36% Наличие серо- и железобактерий	<ul style="list-style-type: none"> - исключение широко применяемой гидромониторной разработки массива, ввиду безвозвратных потерь металлов и риска загрязнения окружающей среды; - отдельная выемка техногенного сырья из растворимого слоя; - необходимость сочетания физико-технических и физико-химических технологий с предварительным обоснованием требуемых качественных характеристик неоднородного техногенного сырья; - риск повышенного износа элементов горной техники определяет выбор степени его защиты от агрессивной среды
2	Не окисленный слой	Ниже 3,5 м	Нейтральная среда с рН=5-6 Растворимость минеральных форм изменяется в пределах до 3% Отсутствие микробиологического фактора	<ul style="list-style-type: none"> - выбор выемочно-погрузочного оборудования и обоснование применения типовых схем механизированной и гидромеханизированной разработки на базе исследования физико-механических свойств

Высокий процент растворимости техногенного сырья (до 36% в некоторых пробах) в верхней части массива, до глубины в среднем 3,5 м, предопределяет необходимость отдельного снятия верхнего слоя при разработке техногенного минерального образования ввиду иной технологической схемы переработки окисленного техногенного сырья. Кроме того, сниженная устойчивость техногенного образования на поверхности засоленных грунтов, а также наличие переувлажненных грунтов повышает риски утраты техники и аварийности, что предопределяет предварительное осушение массива, использование

малогабаритного оборудования в теле массива или расположение техники на дамбах.

Как известно, основная опасность связана с выносом солей фильтрующими водами, разрушением текстуры грунта и развитием вследствие этого неравномерных просадок. Фильтрующая вода становится раствором вымываемых солей и приобретает агрессивность по отношению к металлу и бетону ввиду образования серной кислоты, ввиду чего повышается интенсивность коррозии металла рабочих органов горных машин [71].

Ввиду того, что при обосновании режима горных работ необходимо рассматривать не только различные варианты направления развития работ для какой-либо одной эскизно принятой технологии разработки месторождения и механизации выполнения горных работ, но и варианты, отличающиеся друг от друга технологиями и техническими средствами их реализации, необходима классификация технологических схем эксплуатации хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд, определяющих последовательность вскрытия и добычи, технологию и средства механизации, а также условия их применения. В основу предложенной классификации должно быть заложено предварительное районирование по факторам, определяющих выбор приоритетного способа разработки, что призвано обеспечить комплексность извлечения ценных компонентов из техногенного сырья с учетом выявленных закономерностей процессов сегрегации, цементации и вторичного минералообразования.

2.4. Классификация технологических схем эксплуатации хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд и условий их применения

Результаты предварительного районирования с учетом исследования особенностей развития зоны гипергенеза на старогоднем хранилище отходов обогащения медно-колчеданных руд позволили определить, что комплексное освоение техногенных объектов, для которых характерно развитие зоны окисления,

распространяющейся как по площади, так и по глубине техногенного образования, возможно лишь на базе выделения особенностей ее развития с последующим определением стадии окисления, наличия растворимых минеральных форм и физико-механических свойств техногенного сырья, на основании чего должно производиться обоснование последовательности ведения горных работ, включая технологию вскрытия и добычи с подбором видов технологии и средств механизации, а также мест их расположения для обеспечения безопасного ведения горных работ.

С учётом полученных выводов разработана классификация технологических схем эксплуатации хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд и условий их применения, представленная в таблице 2.11. Выбор приоритетной технологической схемы для освоения техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд определяется наличием и особенностями развития окисленного слоя – стадиями окисления и наличием растворимых минеральных форм, а также физико-механическими характеристиками различных слоев техногенного массива в целом. Под стадиями окисления, как было описано в 1 главе настоящей диссертации, понимаются:

- начальная стадия (1) – начало изменения сульфидных минералов, мало растворимых новообразований;
- средняя стадия (2) – когда большинство сульфидов окислено, сульфаты преобладают как в растворах, так и в твердой фазе;
- заключительная стадия (3) – сульфидных минералов практически нет, сокращается количество сульфатов, рост количества карбонатов, наличие ярозитовой корки.

Согласно предложенной классификации, технологическая схема для разработки хвостохранилищ, сформированных из отходов обогащения медно-колчеданных руд, может быть трех классов, тип которых определяется способом разработки техногенных образований: механизированным, гидромеханизированным или применением выщелачивания. Основные условия

применения технологических схем каждого из классов описаны в столбцах 6 и 7 таблицы 2.11, соответственно.

Рассмотрение технологических схем эксплуатации техногенных образований I класса приемлемо для вовлечения в передел техногенного сырья законсервированных хвостохранилищ, где развита зона гипергенеза с преобладанием 2 и 3 стадий окисления и последовательность горных работ определяет отдельное снятие окисленного слоя ввиду наличия в нем хорошо и высоко растворимых вторичных минеральных форм в количестве, обуславливающим экономическую привлекательность отдельной переработки окисленного техногенного сырья.

В качестве преимуществ разработки техногенных образований механизированным способом следует отметить отработанность и распространённость технологии выемки грунта и относительную легкость эксплуатации выемочно-погрузочной техники.

Применение механизированного способа разработки ограничивается требованием по осушению хвостохранилища, либо сезонного промерзания массива для обеспечения устойчивости в ходе работы механизированной техники. Однако осушение не всегда представляется эффективным ввиду того, что техногенные образования из отходов обогащения медно-колчеданных руд, как правило, сложены хвостами флотации с преобладанием тонкодисперсных частиц, что характеризует такие грунты как водонепроницаемые фракции, не отдающие воду.

Также не маловажным фактором, снижающим эффективность применения любого вида экскавации, является налипание дисперсных частиц на части технологического оборудования. Стоит учитывать, что осушение техногенных грунтов в окисленном слое, где преобладают хорошо и высоко растворимые минералы, может привести к осаждению металлов из растворов с последующей миграцией на глубину. Кроме того, окислительные процессы, протекающие под влиянием микробиологического фактора с выделением в ходе реакции теплоты, препятствуют сезонному промерзанию массива и, как следствие, повышению устойчивости поверхности техногенных образований в зимний период.

Таблица 2.11. Классификация технологических схем эксплуатации хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд и условий их применения

№ класса	Способ разработки техногенных образований	№ схемы	Технологическая схема	Тип механизации выемочно-погрузочных работ	Условия применения		
					Особенности развития и характеристика окисленного слоя	Особенности развития и характеристика не окислённой части	
1	2	3	4	5	6	7	
I	Механизи- рованный	1.1	Технологическая схема, предусматривающая добычу хвостов из ложа хвостохранилища	Одноковшовые экскаваторы / скреперы / погрузчики	Преобладание 2 и 3 стадий окисления	Массив законсервирован и осушен Устойчивость, достаточная для расположения техники на поверхности хвостохранилища по всей площади	
		1.2	Технологическая схема, предусматривающая добычу хвостов комбинацией тяжелой техники, расположенной на дамбах хвостохранилища, и использованием на поверхности техногенного образования малогабаритного добычного оборудования с минимальной нагрузкой на ослабленные грунты	Одноковшовый экскаватор и бульдозер/ канатный скрепер		Мощность окисленного слоя и наличие хорошо и высоко растворимых вторичных минеральных форм в количестве, обуславливающим экономическую привлекательность отдельной переработки окисленного техногенного сырья	Массив законсервирован и не осушен Устойчивость, достаточная для расположения техники повышенной проходимости на поверхности хвостохранилища не по всей площади
		1.3.	Технологическая схема, предусматривающая добычу хвостов посредством расположения канатных скреперов на устойчивых дамбах хвостохранилища	Канатный скрепер		Массив законсервирован и не осушен Расположение техники на поверхности хвостохранилища невозможно	

II	Гидромезани- зированный	2.1.	Технологическая схема, предусматривающая добычу хвостов из ложа хвостохранилища с применением техники на понтонных основаниях	Плавающий земснаряд / погружной насос / драга / микродрага	Нет зоны гипергенеза / 1 стадия окисления Мощность окисленного слоя и наличие хорошо и высоко растворимых вторичных минеральных форм в количестве, не обуславливающим экономическую привлекательность отдельной переработки окисленного техногенного сырья	Массив затоплен на глубину, достаточную для работы технологического оборудования
III	Выщелачивание	3.1	Технологическая схема, предусматривающая предварительное выщелачивание хвостов в теле хвостохранилища	Мелкогабаритная техника для формирования уклона для сбора растворов, аэрации окисленного слоя, последующего сбора окисленного сырья	Любая стадия окисления, мощность окисленного слоя и наличие хорошо и высоко растворимых вторичных минеральных форм	Массив законсервирован и осушен Устойчивость, достаточная для расположения мелкогабаритной техники для аэрации окисленного слоя на поверхности хвостохранилища по всей площади Есть непроницаемый слой в основании хвостохранилища

В соответствии с разработанной классификацией для I класса выбора технологических схем эксплуатации хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд выемочно-доставочные работы выполняются различного рода карьерными экскаваторами, погрузчиками, бульдозерами и канатными скреперами в соответствии с технологическими схемами 1.1–1.3.

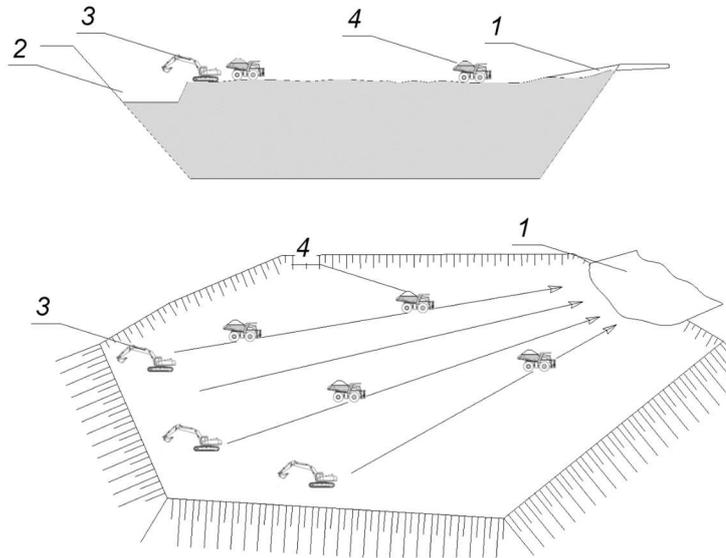


Рисунок 2. 18. Технологическая схема 1.1, предусматривающая добычу хвостов из ложа хвостохранилища с применением одноковшового экскаватора: 1 — транспортная насыпь на дамбе, 2 — выемочный участок, 3 — экскаватор, 4 — транспортирование техногенного сырья автосамосвалами

Технологическая схема 1.1 (рисунок 2.18) предусматривает расположение выемочно-погрузочного оборудования на поверхности техногенного образования. При этом последовательная выемка техногенного сырья из окисленного и не окисленного слоев осуществляется с применением одноковшовых карьерных экскаваторов 3 или фронтальных погрузчиков, что определяется мощностью слоев. Производственная мощность по сырью обеспечивается работой нескольких забоев 2, транспортировка сырья осуществляется автосамосвалами 4 для доставки извлеченного техногенного сырья на последующие переделы.

Применение технологической схемы 1.1 рекомендовано в случае, когда ввиду продолжительного хранения хвостов обогащения, техногенные грунты характеризуются влажностью, при которой несущая способность грунта достаточна для расположения и перемещения каждого вида техники, и преобладанием песчаных фракций, что обеспечивает хорошую фильтрационную

способность и приводит к уплотнению техногенных масс и, как следствие, повышению устойчивости поверхности техногенного образования.

Возможное применение специальных настилов либо упрочнение оснований твердеющими составами для повышения устойчивости работы экскаваторов в вязких грунтах ограничивается удорожанием себестоимости добычи техногенного сырья. В этой связи при небольшой площади техногенных образований либо слабом основании поверхности могут быть рассмотрены скреперы или погрузчики, характеризующиеся большей мобильностью и меньшими нагрузками на грунт, которые могут стать основным выемочно-погрузочным оборудованием при расстоянии транспортирования 0,3–0,5 км.

Так, выбор техники для ведения горных работ в теле хвостохранилища в соответствии с технологической схемой 1.1. должен осуществляться с учетом площадных параметров техногенного образования и основных рабочих параметров технологического оборудования, к которым относятся вместимость ковша, габариты, масса, преодолеваемый уклон, давление на основание.

Технологическая схема 1.2. (рисунок 2.19) подразумевает комбинацию технологического оборудования, включающую расположение тяжелой техники типа экскаваторов 3 на дамбах хвостохранилищ 1 с использованием на поверхности техногенного образования малогабаритного добычного оборудования с минимальной нагрузкой на ослабленные грунты типа бульдозеров на расширенном гусеничном ходу 2.

Применение технологической схемы 1.2 следует рассматривать при недостаточной несущей способности поверхности для использования более производительной и габаритной выемочной техники типа экскаватора ввиду преобладания сильно переувлажненных пород. Кроме того, для реализации такой технологической схемы необходимо поддержание естественного угла откоса на глубину черпания экскаватора, что требует дополнительных технологических операций по приведению к безопасному состоянию откосов, для обеспечения безопасности ведения горных работ при рабочем цикле гусеничного бульдозера, и учету призмы возможного обрушения.

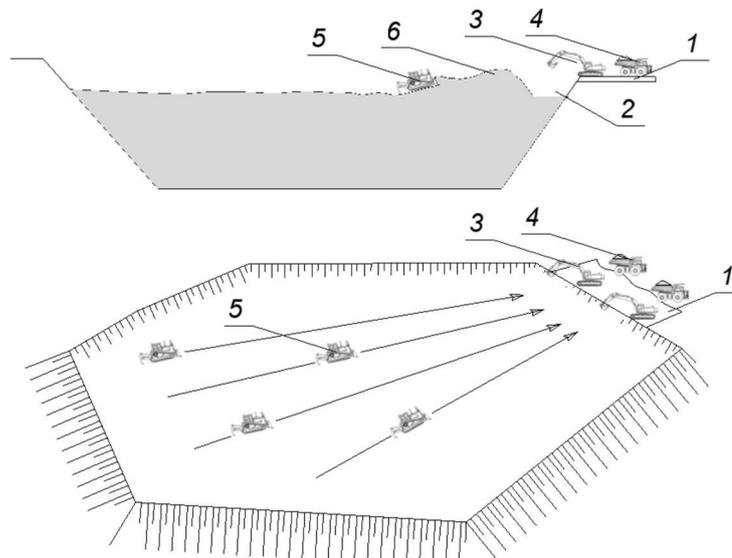


Рисунок 2. 19. Технологическая схема 1.2, предусматривающая добычу хвостов комбинацией тяжелой техники, расположенной на дамбах хвостохранилища, и использованием на поверхности техногенного образования малогабаритного добычного оборудования с минимальной нагрузкой на ослабленные грунты: 1 – площадка для установки и перемещения горной техники, 2 – зона работы экскаватора, 3 – экскаватор, 4 – автосамосвал, 5 – гусеничный бульдозер, 6 – навал окисленных грунтов

Технологическая схема 1.3. (рисунок 2.20) подразумевает разработку по описанной далее последовательности. Первым этапом осуществляется разрыхление наиболее твердого цементированного техногенного грунта в виде ярозитовой корки, характеризующегося 3 стадией окисления, при помощи навесного оборудования бульдозера 5. После чего осуществляется скреперование разрушенной корки при помощи канатной скреперной установки 2 к дамбе 1 для загрузки в автосамосвалы 4. Наиболее податливые для скреперования слой, характеризующийся 2 стадией окисления, и развитый ниже зоны гипергенеза не окисленный слой, которые могут сниматься поэтапно без использования бульдозерной техники.

Наличие окисленного слоя, в составе которого отмечается преобладание 2 и 3 стадий окисления, характеризующихся наличием хорошо- и высоко растворимых минеральных форм, резко усложнит управление качественными характеристиками при гидродобыче. В этой связи II класс технологических схем эксплуатации техногенных образований, подразумевающий разработку гидромеханизированным способом, приемлем для освоения хвостохранилищ, где протекает окисление 1

стадии с минимальным количеством растворимых минеральных форм, либо для выемки техногенного сырья из действующих обводненных отсеков хвостохранилища. Как правило, такая ситуация возможна при непродолжительном хранении хвостов обогатительных фабрик, когда массив находится под затоплением. В этом случае необходимость отдельного снятия окисленного слоя от основной массы техногенного сырья при наличии 1 стадии окисления экономически не эффективна ввиду малой мощности развития.

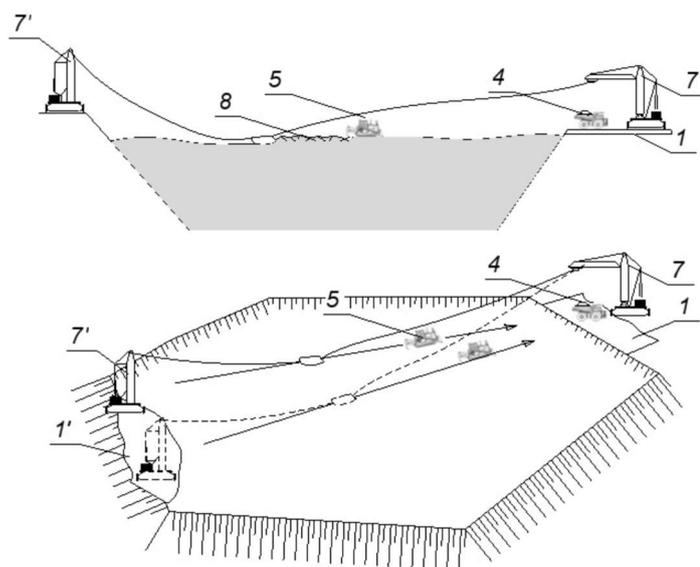


Рисунок 2. 20. Технологическая схема 1.3, предусматривающая добычу хвостов посредством расположения канатных скреперов на устойчивых дамбах хвостохранилища: 1 – площадка для установки и перемещения горной техники, 4 – автосамосвал, 5 – гусеничный бульдозер, 7 – самоходная башня, 8 – навал ярозитовой корки

Гидромеханизированный способ добычи применительно к условиям разработки обводненных участков хвостохранилища предполагает использование следующих видов оборудования: плавающих земснарядов, драг или погружных насосов в соответствии с технологической схемой 2.1. (рисунок 2.21). Основными параметрами гидромеханизированной разработки при использовании земснарядов являются: высота надводной и подводной частей уступа, ширина котлована и прорези, угол откоса подводной части уступа, размеры блока и недобора. При глубине разработки более 15 м участки разрабатываются уступами. Последующие уступы разрабатывают при пониженном уровне воды.

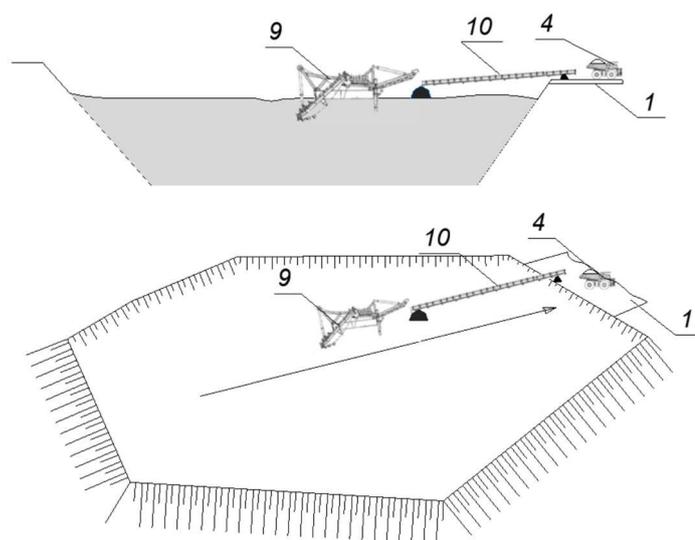


Рисунок 2. 21. Технологическая схема 2.1, предусматривающая добычу хвостов из ложа хвостохранилища с применением техники на понтонных основаниях: 1 – площадка для установки и перемещения горной техники, 4 – автосамосвал, 9 – драга или земснаряд, 10 – конвейер для транспортировки грунтов

Преимуществами использования технологических схем на базе плавающих земснарядов и драг являются достаточная отработанность технологии и решение проблемы как с разработкой лежалых хвостов, так и с транспортировкой до передвижной насосной станции. К недостаткам таких схем следует отнести: необходимость разбавления лежалых хвостов водой; значительное количество новой техники; высокую сложность организации забора, установки и перемещения самих земснарядов.

Высокая степень механизации и поточность технологических процессов (добыча – обогащение – отвалообразование) обеспечивает дражной разработке достижение наилучших технико-экономических показателей по сравнению с другими возможными способами.

Преимущество погружных насосов обусловлено тем, что их применение требуют значительно меньшего количества воды на разбавление сырья, извлекаемого из техногенных массивов, обеспечивают решение проблемы как с разработкой лежалых хвостов 1 стадии окисления, так и с их транспортировкой до передвижной насосной станции; более простая технология устройства забора хвостов. Также обуславливается необходимостью разбавления лежалых хвостов водой в меньших объемах по сравнению с земснарядом и драгой.

III класс технологических схем эксплуатации техногенных образований, подразумевающий выщелачивание техногенных грунтов любой стадии окисления в условиях, когда массив законсервирован или осушен. Эта технология разработки является разновидностью схемы разработки с размещением механизмов на площадке хвостохранилища и обеспечивает при разработке хвостов возможность использования биоокислительных процессов в теле пиритсодержащих хвостохранилищ для извлечения ценных товарных компонентов при их переработке (рисунок 2.22).

Преимуществом данной технологии разработки хвостов является то, что наиболее затратная стадия переработки хвостов происходит в теле хвостохранилища, это позволяет значительно снизить капитальные затраты на строительство сооружений по переработке хвостов. Однако необходимое для обеспечения доступа кислорода и воды в окисляемый слой периодическое рыхление хвостов рыхлительным агрегатом на базе трактора с уширенным гусеничным ходом может быть осложнено ввиду недостаточной устойчивости поверхности хвостохранилища, что повлечет провалы. Кроме того, отсутствие непроницаемого слоя или возможные ошибки при сборе растворов могут способствовать миграции растворов в окружающую среду.

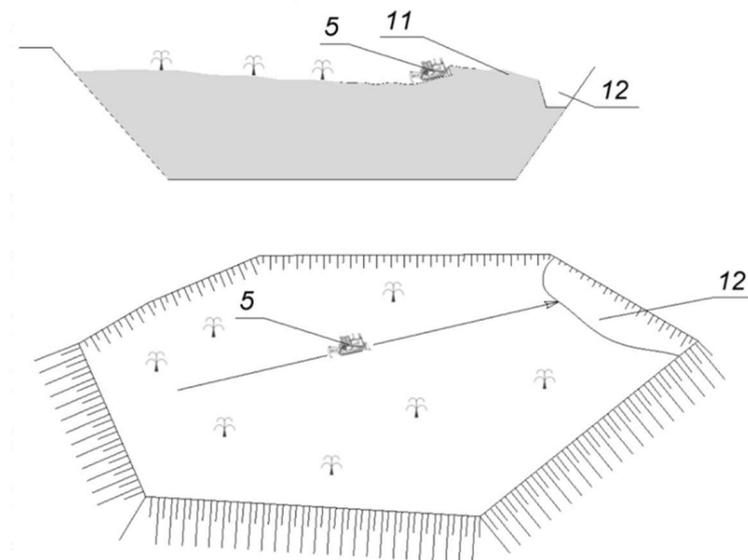


Рисунок 2. 22. Технологическая схема 3.1, предусматривающая предварительное биоокисление хвостов в теле хвостохранилища: 5 – гусеничный бульдозер, 11 – навал грунтов, окисленных бактериями, 12 – траншея для сбора рассолов

Также следует отметить, что для эффективной разработки хвостохранилищ с учетом характера преобразования минеральной составляющей на каждой из стадий окисления необходима локализации обогащенных зон в теле техногенного образования. Однако это не всегда возможно ввиду сложности горно-геологических условий, особенно обводненности намывного хвостохранилища. Исследование закономерностей распределения ценных компонентов наиболее эффективно при достаточном для проходки оценочных выработок уплотнении массива. Однако этот вопрос может быть решен за счет определения характера формирования техногенного образования и последующего выявления корреляционных зависимостей между ценными компонентами, что в результате статистической обработки позволит спрогнозировать качественно-количественные характеристики распределения металлов.

Выводы по главе 2

1. В ходе геолого-оценочных исследований установлено, что для комплексной разработки хвостохранилищ медно-колчеданных руд недостаточно применения типовых схем вскрытия на полную мощность техногенного минерального образования, что обусловлено горно-геологическими особенностями и наличием зоны окисления, для которой характерно наличие высоко растворимых минералов, что обуславливает необходимость районирования техногенного образования на участки по глубине с выделением зон для отдельной добычи предпочтительными технологическими схемами.

2. Предложен научно-методический подход к районированию хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд, согласно которому разделение таких объектов на участки для самостоятельной эксплуатации должно осуществляться с учетом наличия зоны гипергенеза, особенностей ее распространения на глубину техногенного объекта с оценкой наличия сульфатредуцирующих бактерий и растворимых минеральных форм, стадий окисления, наличия магнитных сульфидных минералов, а также остатков железных конструкций, оставленных в ходе эксплуатации хвостохранилища и после его консервации, распределения

ценных компонентов в техногенном минеральном образовании, наличия вредных примесей, локализации обводненных зон в теле исследуемого объекта.

3. 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 (вещественного состава, физико-химических условий и микробиологического фактора).

4. В результате комплексных исследований техногенного сырья из старогоденного хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики установлено:

– содержание Au изменяется в теле хвостохранилища от 0,3 до 2,2 г/т, Ag – от 3,6 до 23,7 г/т, Cu – от 0,04 до 0,39 %, Zn – от 0,13 до 1,41 %, Fe – от 3,6 до 23,7 %, S – от 8,17 до 43,4 %.

– изменение содержания благородных металлов с глубиной свидетельствует о том, что изменение содержания золота и серебра в целом равномерно в массиве и коррелирует между собой;

– зона окисления развита до глубины 2 м, а растворимость новообразованных в ней минеральных форм достигает 35 %, что обуславливает необходимость отдельного снятия окисленного слоя с последующей переработкой техногенного сырья отдельно от техногенного материала, отобранного из не окисленного слоя, где растворимость минеральных форм не превышает 8%;

– анализ качественно-количественного минерального состава зоны гипергенеза по площади техногенного образования позволил определить, что в пределах исследуемого объекта протекает окисление 2 и 3 стадии.

5. Установлено, что в зоне развития гипергенеза, развитой в хвостохранилище на глубину 2 м, и отличающейся степенями окисления ввиду отличительного минерального состава и характеристик техногенного грунта в целом, преобладают серо- и железоокисляющие бактерии, инициирующие окислительно-восстановительные процессы, в результате чего происходит ускоренное преобразование вещественного состава и свойств техногенного сырья,

что подтверждает необходимость своевременного вовлечения в промышленный передел.

6. Выявленный факт наличия микроорганизмов и их влияния на процессы окисления доказывает возможность целенаправленного биоокисления техногенных грунтов, что облегчит извлечение металлов из тела хвостохранилища. Поскольку понимание закономерностей изменения видового разнообразия микроорганизмов в зависимости от стадий окисления обеспечит возможность интенсификации процессов выщелачивания путем обоснования рационального качественно-количественного состава сообществ микроорганизмов и режимов орошения с извлечением в продуктивный раствор комплекса ценных компонентов.

7. Разработана классификация технологических схем разработки хранилищ отходов переработки медно-колчеданных руд по признаку наличия окисленного слоя и особенностей его развития с целью обоснования режима горных работ, предусматривающего необходимость отдельного снятия окисленного слоя и последующей отдельной переработки различных типов минерального сырья для повышения полноты и комплексности освоения техногенных образований.

8. В основу выбора технологических схем в качестве определяющих факторов заложены стадии окисления, а также мощность окисленного слоя и наличие растворимых вторичных минеральных форм в количестве, обуславливающим экономическую привлекательность отдельной переработки окисленного техногенного сырья. Выбор технологического оборудования определяется наличием и изменением устойчивости техногенного массива в пределах всей его площади

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИБАЙСКОГО СТАРОГОДНЕГО ХРАНИЛИЩА И ПРЕДСТАВЛЕННОГО В НЕМ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА ЭКСПЛУАТАЦИИ

3. 1. Методика и результаты исследования физико-механических свойств лежалых отходов обогащения медно-колчеданных руд, и определение характера их изменения в старогоднем хвостохранилище

Для обоснования режима горных работ, в основу которого будет заложено районирование техногенного образования по ряду факторов, помимо комплексного изучения хвостов обогащения медно-колчеданных руд, в динамике вторичного минералообразования, была проведена оценка физико-механических свойств техногенного сырья по глубине и площади техногенного образования.

Геомеханическое обоснование выбора параметров разработки с целью обеспечения безопасности и экономичности горных работ при освоении хвостохранилищ включает [43]:

- оценку изменения прочностных и деформационных свойств техногенного сырья с глубиной;
- изучение влияния геолого-структурных особенностей на перераспределение напряжений и локализацию деформаций в бортах;
- определение углов откосов и места расположения эксплуатационных уступов и их продвижения во времени и пространстве с учётом оптимизации динамики развития фронта горных работ с учетом качества техногенного сырья.

В ходе оценочных работ установлено, что, ввиду различия по характеристике состава, структуры и свойств сырья с учетом стадий окисления лежалых в массиве хвостов, формируются участки техногенного образования с различной устойчивостью поверхности, необходимой для работы добычного и транспортного оборудования. Это объясняется тем, что в ходе природного выщелачивания хорошо растворимых минералов в процессе хранения техногенного сырья в зоне окисления

изменяется плотность грунтов, их структура, физико-механические характеристики и водопроницаемость.

Также, при растворении солей изменяются состав и свойства фильтрующейся воды, которая может стать агрессивной по отношению к бетонным и металлическим частям конструкций сооружений. Все это вызывает необходимость определения содержания и состава водорастворимых солей в грунтах, а также оценивать характер изменения физико-механических свойств грунтов под влиянием окислительных процессов. Причем, если содержание таких солей составляет более 0,3 % от массы сухого грунта, то такую породу называют засоленной, в связи с чем методы определения физико-механических характеристик должны быть специально использованы с учетом специфики свойств исследуемого объекта.

В этой связи в основе геомеханического обоснования параметров эксплуатации техногенного объекта должны быть заложены выявленные взаимосвязи между физико-механическими свойствами и особенностями развития зоны гипергенеза, характеристики которой оказывают влияние на показатели устойчивости горнотехнических конструкций.

Лабораторные исследования, направленные на определение физико-механических свойств хвостов, были выполнены в лаборатории «Механики горных пород» Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова (МГТУ им. Г.И. Носова). Испытания отобранных из хвостохранилища образцов техногенных грунтов проводились в состоянии их естественной влажности, которая была обеспечена при отборе проб путем их герметичной упаковки. Объемная масса хвостов была определена с использованием металлического цилиндра без дна и крышки с заостренным режущим краем.

В ходе исследования производилась оценка физико-механических свойств техногенного материала, включая влажность, плотность, пористость, пределы пластичности, сцепление и угол внутреннего трения, коэффициент компрессии и фильтрации, определяющие параметры способа разработки техногенного объекта. Ввиду видимого наличия в отобранных образцах техногенных сульфатов при

оценке физико-механических свойств использовались методики, реализуемые для исследования характеристик засоленных грунтов.

Для испытаний проб было использовано сертифицированное для проведения инженерно-геологических изысканий оборудование в лаборатории МГТУ им. Носова (рисунок 3.1).

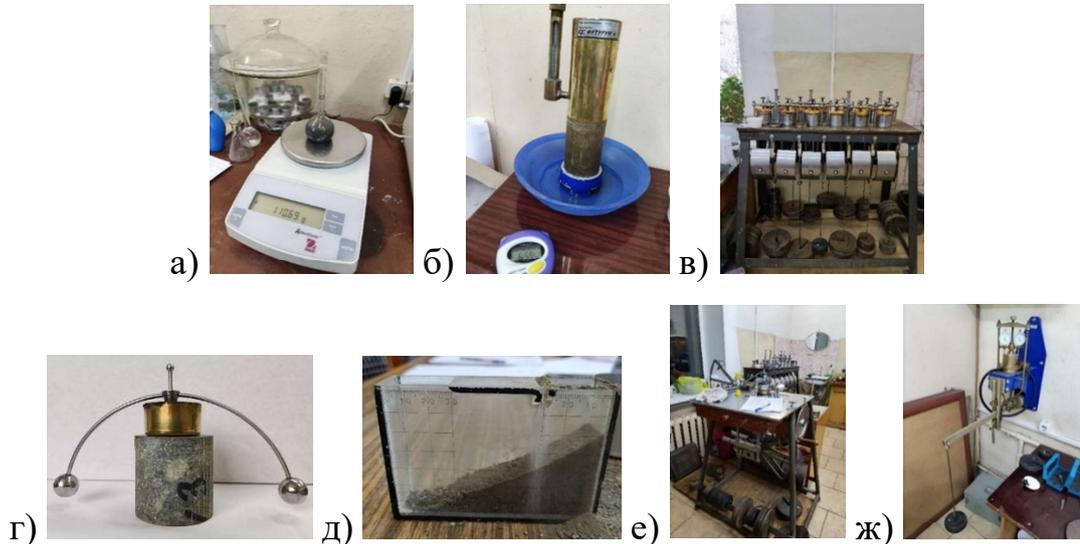


Рисунок 3. 1. Испытательное оборудование для определения физико-механических свойств: а – аналитические весы с пикнометром, б – ПКФ-01 для определения коэффициента фильтрации песчаных грунтов, в – прибор для оценки степени уплотнения грунтов, г – конус Васильева, д – УВТ-3М для определения угла естественного откоса, е – прибор испытания грунтов на срез, ж – ПКГ-Ф устройство для испытания компрессии грунта

Одной из основных характеристик, определяющих состояние массива, является влажность слагающего его техногенного материала, поскольку в зависимости от степени влажности грунты могут находиться в различном физическом состоянии – обводненном, мерзлом, мерзлотном, в соответствии с которым изменяются их прочность, деформируемость и устойчивость.

Влажность техногенных грунтов определялась испытанием трёх образцов для каждой пробы, согласно ГОСТу 5180–84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик» [51]. Навеска грунта для определения влажности, массой 15 г, помещалась в заранее взвешенный бюкс и взвешивалась на лабораторных электронных весах ARC120 (рисунок 3.1а) с точностью до 0,01 г. Затем бюкс с приоткрытой крышкой ставился в сушильный шкаф ШС-0,25-20 для высушивания при температуре, равной 80°C. Выбор такой температуры

обусловлена наличием гипса в пробах. Высушивание грунта производилось до постоянной массы, которая устанавливалась путем периодического взвешивания. Первое взвешивание производилось через 5 часов после начала высушивания, второе и последующие – через каждые 2 часа. Перед каждым взвешиванием бюкс с грунтом помещался в эксикатор с хлористым кальцием для охлаждения. Высушивание производилось до получения разности масс при двух последовательных взвешиваниях не более 0,02 г.

Кроме того, с целью учета вариантов перехода техногенного грунта из одной формы консистенции в другую при изменении влажности ввиду естественных осадков, что может препятствовать безопасной выемке и транспортировке техногенного сырья, определялась влажность на границе текучести (верхний предел) и раскатывания (нижний предел). Для определения предела текучести использовался конус Васильева (рисунок 3.1г). Определение предела пластичности определялось стандартным методом раскатывания породы в шнур. По результатам границ текучести и раскатывания определялось число пластичности (I_p), на основе которого оценивалась степень глинистости грунта. Далее для классификации грунтов, согласно ГОСТ 25100–2011 [50], определялся показатель текучести (I_L).

Определение коэффициента фильтрации осуществлялось с помощью прибора Каменского (рисунок 3.1б), после чего результаты опыта приводились к пересчету к комнатной температуре.

При определении плотности минеральной части засоленных пород вместо дистиллированной воды применялся керосин, а вместо кипячения — вакуумирование. Керосин был обезвожен и профильтрован. Обезвоживание керосина производилось путем взбалтывания с силикагелем, который предварительно прокаливался в муфеле при 500 °С в течение 4 ч. Вычисление плотности минеральной части породы производилось по формуле (с точностью до 0,001 кг/см³):

$$\rho_m = g\rho_k (g_1 + g - g_2), \quad (3.1.)$$

где ρ_k – плотность керосина, кг/см³; g – масса сухой породы, кг; g_1 – масса пикнометра с керосином, кг; g_2 – масса пикнометра с керосином и породой, кг.

Для оценки влияния влажности техногенного сырья на исследуемые характеристики – угол внутреннего трения (град.), удельное сцепление C (МПа), проводились испытания грунта методом одноплоскостного среза ГОСТ 12248–2010 [48] по схеме консолидировано-дренированный (медленный) срез. Для исследования брались образцы, отобранные на поверхности хвостохранилища из различных участков, отличающихся характером окисления и свойствами техногенного сырья. Образцы предварительно уплотнялись при вертикальных нагрузках 0,1; 0,2; 0,3 МПа на протяжении 2 суток на приборе для уплотнения грунтов (рисунок 3.1в). Испытания проводились при естественной влажности грунтов и в водонасыщенном состоянии под нагрузкой.

В связи с тем, что разрушение минералов в результате окисления высвобождает часть цветных металлов, а также с учетом протекания процессов сегрегации и цементации техногенного сырья, что способствует изменению структуры хвостов обогащения в процессе их хранения, был проведен анализ гранулометрического состава отобранных проб.

Исследования проводились в лабораторных условиях сухим и мокрым способами согласно ГОСТу 12536–2014 [49]. Для исследования гранулометрического состава техногенного материала проба рассеивалась с дистиллированной водой для лучшего разделения частиц и устранения растворимых фаз на ситах $-0.071+0,04$ мм; $-0,04+0$ мм. Затем помещалась в сушильный шкаф до стабилизации массы, после чего рассеивалась с помощью стандартного набора сит: $-5+0,25$ мм; $-0,25+0,071$ мм; $-0.071+0,04$ мм; $-0,04+0$ мм. Продукты отсева на ситах взвешивались с помощью весов. Для отображения характеристики крупности техногенного материала данные анализа гранулометрического состава изображены графически (рисунок 3.2).

Как видно из графика, характеристика гранулометрического состава техногенного материала свидетельствует о том, что в среднем по хвостохранилищу преобладает класс крупности $-0,04+0$ мм, на него приходится 78,37% от общего количества отобранного техногенного материала, что обусловлено особенностями процесса обогащения на Сибайской обогатительной фабрике, к тонине помола

руды. Однако 21,63% приходится на более высокие классы крупности, поэтому для вовлечения в переработку тонкодисперсного материала методами физико-химическими геотехнологиями может потребоваться дополнительная операция по измельчению и последующему обжигу и окомкованию техногенного сырья.

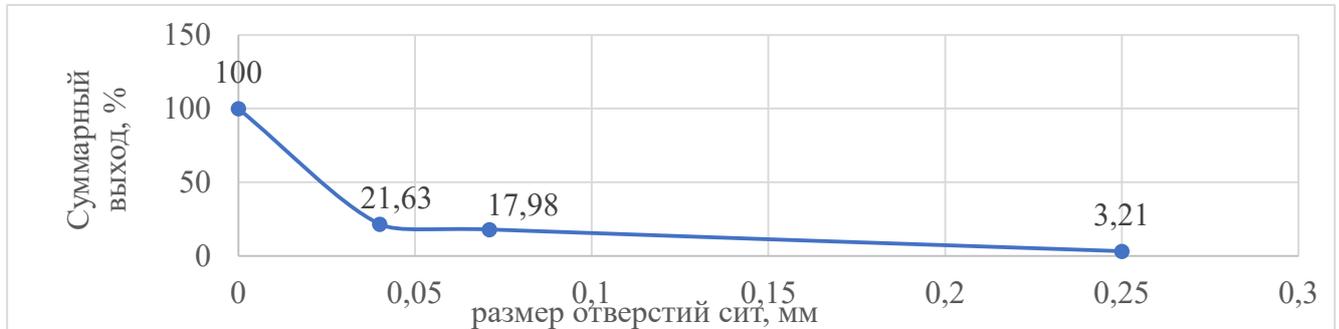


Рисунок 3. 2. Характеристика крупности техногенного материала

Ввиду того, что определяющее влияние на устойчивость горнотехнических конструкций, откосов и основания хвостохранилища при выборе средств механизации для разработки техногенного объекта оказывают физико-механические характеристики техногенного сырья, была проведена оценка изменения физико-механических характеристик в северо-западной и основной части техногенного образования с глубиной по вышеописанной методике. Усредненные результаты систематизированы в таблице 3.1.

Исследование степени обводненности грунтов в основной части техногенного образования, позволило установить, что техногенные грунты характеризуются влажностью от 15,1 до 17,8 %, что свидетельствует о преобладании в массиве переувлажненных пород. Плотность техногенного сырья при естественной влажности в обеих частях в усредненной массе изменяется от 1890 до 2550 кг/м³. Показатели плотности сухих техногенных грунтов изменяются от 1320 кг/м³ до 1790 кг/м³, что свидетельствует о преобладании грунтов средней плотности по всей площади техногенного образования.

Для определения основных характеристик техногенных грунтов из зоны окисления, развитой на 2 м, определялся характер изменения физико-механических характеристик сырья по площади техногенного образования. Результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.1. Результаты исследования физико-механических характеристик техногенного сырья по глубине хвостохранилища

Зона отбора проб	Глубина отбора, м	Естественная влажность, W %	Влажность на границе текучести, %	Влажность на границе раскатывания, %	Число пластичности	Показатель текучести	Плотность частиц грунта, г/см ³	Плотность грунта, г/см ³	Угол внутреннего трения, град	Удельное сцепление сдвига, МПа
Северо-западный отсек	0-3	7,6	15,75	14,52	1,21	-5,72	2,99	2,00	40,98	0,0244
	3-6	14,8	32,6	31,2	1,4	-7,93	3,76	2,15	34,5	0,0117
Основной отсек	0-3	15,2	16,2	13,6	2,59	-2,28	3,47	1,89	39,52	0,0133
	3-5	15,7	17	15,6	1,4	-6,7	3,39	1,99	35,47	0,0239
	6-8	16,1	17,71	15,2	2,5	-4,03	3,69	2,01	39,52	0,0133
	10-12	15,1	16,22	13,89	2,33	1,12	3,92	2,55	31,75	0,0319
	14-16	15,8	23,5	19,94	3,57	-0,88	3,93	2,01	32,52	0,0467
	18-20	12,9	13,01	12,56	0,44	12,03	4,26	2,41	32,01	0,0217

Исследование характеристик обводненности окисленного слоя техногенного образования позволило установить:

– ввиду особенностей рельефа хвостохранилища, а именно перепада высот, явная изменчивость обводнённости хвостов прослеживается по площади в направлении с юго-запада на северо-восток и тяготеет к прудковой части техногенного объекта: в юго-западной зоне влажность изменяется от 16 до 25%, в северо-восточной – от 19,9 до 28%, что позволяет отнести эти грунты к переувлажненным и сильно переувлажненным породам, соответственно;

– показатель естественной влажности грунтов в зоне развития окисленной ярозитовой корки вблизи южной дамбы техногенного образования изменяется от 8 до 15%.

Результаты исследования гранулометрического состава техногенных грунтов, отобранных из старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.2. Результаты исследования изменения физико-механических характеристик техногенного сырья Сибайского хвостохранилища

Зона отбора проб		Глубина отбора, м	Естественная влажность, %	Влажность на границе текучести, %	Влажность на границе раскатывания, %	Число пластичности	Показатель текучести	Плотность частиц грунта, г/см ³	Плотность грунта, г/см ³	Угол внутреннего трения, град	Удельное сцепление среза, МПа
Северо-западный отсек	Подзона №4 (СЗ)	0-3	7,6	15,75	14,52	1,21	-5,72	2,99	2,00	40,98	0,0244
		3-6	14,8	32,6	31,2	1,4	-7,93	3,76	2,15	34,5	0,0117
Основной отсек	Подзона №3 (СВ)	0-0,5	26,9	27,3	21,5	5,8	0,91	3,24	2,18	19,2	0,0117
		0,5-1	28,05	27,4	22,8	4,6	0,65	3,48	2,29	-	-
		1-2	19,93	26,7	19,3	7,4	-6,77	3,64	2,17	-	-
	Подзона №2 (ЮЗ)	0-0,5	24,95	27,4	22,7	4,7	0,53	4,05	2,01	33	0,01
		0,5-1	16,37	22,0	21,0	1,0	-3,8	3,35	2,39	32	0,043
		1-2	16,91	16,4	15,7	0,7	0,00	3,35	2,3	32,5	0,033
	Подзона №1 (Ю)	0-0,5	14,6	24,5	24,0	0,5	-18,8	2,85	1,66	33,5	0,0217
		0,5-1	15,17	23,7	23,1	0,6	-13,2	3,37	2,11	29,9	0,0325
		1-2	8,5	22,2	21,5	0,7	-19,1	3,11	1,81	35	0,005

Анализ характеристик преобразованного в окисленном слое техногенного сырья из разных зон хвостохранилища позволил установить:

– в северо-западной части техногенного образования техногенное сырье представлено пылеватой твердой супесью с содержанием частиц класса -0,05 мм более 50%, что определяет более высокое сцепление техногенных грунтов;

– характеристики техногенных грунтов в приповерхностном слое (глубиной до 2м) основной части техногенного образования, где развита зона окисления, отличаются по площади в зависимости от условий намыва и стадии окисления;

– северо-восточная зона в соответствии с характером намыва хвостов в основном вмещающем объеме хвостохранилища является прудковой частью и сложена водонасыщенными тонкодисперсными хвостами, преимущественно фракциями класса $-0,05+0,002$ мм, что определяет неустойчивость грунтов к воздействию влаги, ввиду чего откосы таких грунтов будут легко размываться, что обуславливает усложнение условий ведения горных работ в этой зоне;

– юго-западная зона до глубины 1 м от поверхности сложена супесчаными пылеватыми грунтами, что обуславливает их набухание при увлажнении, ниже глубины 1 м зона сложена мелкими песками, не связанными между собой, ввиду чего они хорошо фильтрует воду, а крупность песков $>0,10$ мм в количестве более 75% свидетельствует о том, что при увлажнении они не приобретают свойства плывунов;

– техногенное сырье в южной зоне, цементированное вторично образованным ярозитом, характеризуется пляжем из «песков», намывым вдоль внутреннего периметра дамбы, зона сложена мелкими песками, характеристика которых аналогична пескам из юго-западной зоны.

Анализ проб, отобранных ниже развития зоны гипергенеза, свидетельствует о преобладании в нем супесей пылеватых твердых и песков мелких и более плотных с глубиной, что обусловлено особенностями сегрегации и цементации при продолжительном хранении отходов обогащения руд. Содержание тонких классов, крупностью $-0,05+0,002$ мм не менее 70%, определяет увеличение сцепления хвостов переработки руд и повышает устойчивость откосов при эксплуатации техногенного образования.

Таким образом, в северо-восточной части хвостохранилища с преобладанием переувлажненных грунтов вероятны проблемы не только при выемке техногенного сырья, но и при транспортировке в связи с налипанием и растеканием техногенного мелкодисперсного материала на рабочие части техники – в ковше, в кузове автосамосвала.

Таблица 3.3. Результаты исследования гранулометрического состава техногенных грунтов, отобранных из старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики

Место отбора *	Глубина отбора, м	Содержание частиц по классам крупности, %								Наименование грунтов по ГОСТу 25100-2020
		2-1 мм	1-0,5 мм	0,5-0,25 мм	0,25-0,10 мм	0,10-0,05 мм	0,05-0,01 мм	0,01-0,002 мм	<0,002 мм	
СВ зона	0-0,5	0	3,56	6,7	8,7	9,4	44,2	20,4	7,04	Супесь пылеватая пластичная
	0,5-1	0,36	5,43	5,84	9,94	7,56	39,54	27,4	3,93	
	1-2	0	0,94	2,24	3,85	8,01	47,66	25,8	11,5	Суглинок легкий пылеватый, твердый
ЮЗ зона	0-0,5	0	4,34	9,3	6,65	8,54	42,2	21,1	7,87	Супесь пылеватая пластичная
	0,5-1	0	2,34	7,34	4,24	15,3	45,3	21,3	4,18	Супесь пылеватая твердая
	1-2	0,29	9,5	38,6	34,5	9,56	3,4	2,67	1,48	Пески мелкие, рыхлые
Ю зона	0-0,5	0,19	8,45	36,4	30,4	7,5	7,5	5,2	4,36	Пески мелкие, рыхлые
	0,5-1	0,32	9,5	40,71	29,5	8,54	3,56	5,11	2,76	
	1-2	0,15	9,94	37,57	34,5	7,23	5,4	4,67	0,54	
Усредненные данные по пробам на глубину										
Ниже зоны окисления	6-8	0,1	2,59	6,98	7,56	8,6	39,4	23,42	9,35	Супесь пылеватая твердая
	10-12	0,15	4,23	8,3	6,34	12,8	36,2	24,54	9,44	Супесь пылеватая твердая
	18-20	2,37	28,7	34,04	10,08	10,8	6,43	4,56	2,96	Пески мелкие, рыхлые

*СВ – северо-восточная, ЮЗ – юго-западная, Ю – южная часть хвостохранилища

Кроме того, ввиду того, что в обводненной северо-восточной части хвостохранилища преобладают грунты, относящиеся к слабопроницаемым, предварительное осушение техногенного образования посредством, в частности, создания водопонижающих скважин становится затруднительным и высокозатратным.

Угол внутреннего трения и сопротивление техногенного сырья из зоны окисления сдвигу определялись, как указывалось ранее, на приборе методов

чистого среза (рисунок 3.1e). Условия проведения испытаний с характеристикой изменения нагрузки при срезе образцов, отобранных из отличающихся по степени обводненности и стадии окисления зон основной части техногенного образования, отражены на рисунке 3.3.

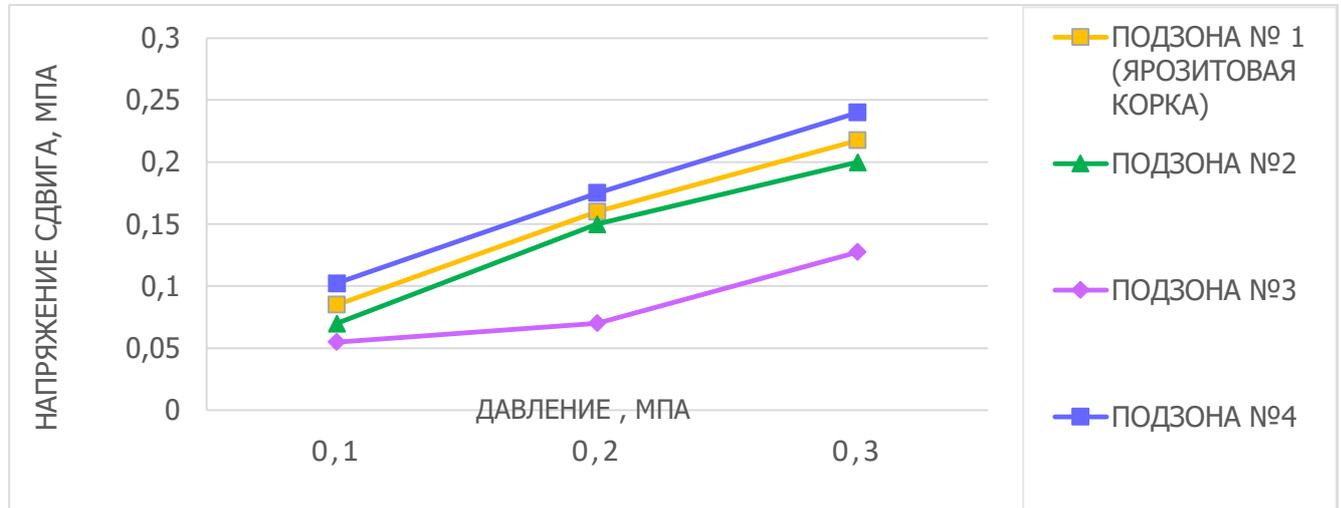


Рисунок 3. 3. Результаты испытания техногенного грунта по схеме консолидировано-дренированный (медленный) срез

На базе полученных результатов в зоне гипергенеза выделены 4 подзоны. Анализ данных с рисунка 3.3., а именно напряжения сдвига техногенного сырья в каждой из выделенных подзон позволил установить, что прочностные свойства отходов переработки из подзоны №3 техногенного образования ниже, чем в подзонах № 1, № 2 и № 4, что требует разработки решений для обеспечения безопасности ведения горных работ с целью исключения образования провалов выемочно-погрузочного оборудования.

В этом случае, несмотря на слабую устойчивость поверхности техногенного образования ввиду наличия в нем зон переувлажнённого сырья, не является целесообразной и исключает его разработку в зимний период, поскольку протекающие в окисленном слое экзотермические реакции не будут в полной мере способствовать росту устойчивости техногенного образования из-за плюсовых температур в этом слое, благодаря наличию микробиологического фактора.

Полученные результаты исследования физико-механических свойств техногенного сырья также являются основой выбора последовательности горных работ при комплексном освоении запасов техногенного сырья из хвостохранилища

для использования его в качестве дополнительного источника с целью пополнения минерально-сырьевой базы.

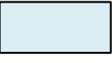
3. 2. Систематизация особенностей преобразования состава и свойств техногенного минерального сырья, определяющих порядок и условия освоения техногенного минерального образования

На основании результатов исследования проб в таблице 3.4 систематизированы основные характеристики техногенного сырья, изменяющиеся ввиду активного развития окислительных процессов в хранилищах отходов обогащения медно-колчеданных руд. Так, техногенное сырье, 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.

Так, если не окисленное техногенное сырье является труднообогатимым ввиду преобладания в своем составе упорных сульфидных минералов, в которых заключены золото и серебро, то техногенное сырье второй стадии окисления, в котором преобладает количество вторичных техногенных сульфатов уже может быть рассмотрено для получения ценных компонентов в ходе физико-химических геотехнологий с применением микроорганизмов.

Определено, что преобразование техногенного минерального сырья из отходов обогащения медно-колчеданных руд протекает последовательно с изменением стадий окисления от 1 до 3 и что наиболее окисленная часть приурочена к поверхности техногенного образования, а менее окисленное техногенное сырье расположено ниже по разрезу.

Таблица 3.4. Систематизация характеристик техногенного сырья по данным исследования

Обозначение характера окисления	Описание характера окисления	Минеральный состав					Раствори- мость минераль- ных форм	Влажность, %	Сцепление С, кН/м2	Угол внутр. трен
		Первичные сульфиды из отходов обогащения	Вторично образованные минеральные формы			Карбо- наты				
			Хорошо растворимые сульфаты (мелантерит, роценит и др.)	Мало раствори- мые сульфаты (гипс)	Нераство- римые сульфаты (ярозит)					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Не окислено	++++	-	-	-	-	-	>28	-	-
	1 стадия окисления	+++	+	-	-	-	До 3%	>28	-	-
	2 стадия окисления	++	+++	++	+	+	До 35%	20-28	11,7	19,2
								16-22	10	33
	3 стадия окисления	+	+	+++	++	++	До 15%	8,5-15	21,67	33,5

В данном случае систематизация особенностей преобразования техногенного сырья, расположенного в хвостохранилищах, сформированных из отходов обогащения медно-колчеданных руд, позволяет сделать вывод о том, 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.

Также стоит отметить, что природа окисления хвостов обогащения из отходов медно-колчеданных руд напрямую связана с климатическими условиями и наличием микробиологического фактора, что, в свою очередь, является предпосылкой целенаправленного управления качественными характеристиками техногенного минерального сырья при его хранении.

Кроме того, развитие представлений о формировании технологических свойств хвостов для их последующей добычи и переработки на базе сопоставимой оценки вещественного состава и физико-механических характеристик хвостов с характеристиками микробных сообществ в массивах хвостохранилищ на различных участках может обусловить выявление закономерностей, определяющих параметры целенаправленного послойного биоокисления техногенного сырья со снятием окисленного, пригодного для переработки, слоя с последующей подготовкой нового объема сырья в соответствии с технологией, предложенной Л. З. Биишевым [40].

Также стоит учитывать, что в зависимости от стадии эксплуатации техногенного образования будет отличаться порядок подготовки техногенного минерального сырья для его вовлечения. Поэтому предложена классификация техногенных образований по признаку стадии эксплуатации, определяющая порядок подготовки техногенного сырья к моменту вовлечения с учетом характера окисления, представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.5. Классификация техногенных образований, определяющая порядок подготовки техногенного сырья к моменту вовлечения с учетом характера окисления

Вид техногенного образования	Характер окисления			Характеристика преобладающего вида техногенного сырья	Порядок подготовки техногенного сырья к моменту его вовлечения с учетом характера окисления
	1 стадия	2 стадия	3 стадия		
Эксплуатируемое	+			Обводненные хвосты, начало изменения сульфидных минералов, мало растворимых вторично образованных минеральных форм	Осушение техногенного образования, добавление бактерий в массив для окисления
Законсервированное	+	+		Сильно увлажненные и переувлажненные хвосты, большинство сульфидов окислено, сульфатные формы преобладают как в растворах, так и в твердой фазе	Предварительное снятие окисленного слоя полностью с последующей транспортировкой на переработку Осушение нижележащего не окисленного слоя, добавление бактерий для его окисления
	+	+	+	Переувлажненные хвосты, большинство сульфидов окислено, сульфатные формы преобладают как в растворах, так и в твердой фазе, начало развития карбонатов	Предварительное снятие окисленного слоя полностью с последующей транспортировкой на переработку При необходимости осушение нижележащего не окисленного слоя, добавление бактерий для его окисления
Старогоднее		+	+	Влажные хвосты, сульфидных минералов практически нет, сокращается количество сульфатов, рост количества карбонатов, ярозитовая корка	Предварительное разрушение и снятие техногенного сырья, представленного ярозитовой коркой (3 стадия). При наличии в нем ценных компонентов транспортировка на переработку, иначе – в отвалы Последующее снятие слоя с преобладанием растворимых сульфатных форм (2 стадия). При необходимости осушение нижележащего не окисленного слоя, добавление бактерий для его окисления

+ – Преобладание техногенного сырья этой стадии окисления, + – Подчиненное количество

Отсутствие окисленного слоя либо его минимальная мощность, не обеспечивающая эффективность его отдельного снятия возможны в случае, если хранение отходов обогащения медно-колчеданных руд осуществляется непродолжительное время, что подразумевает затопление объекта в период его эксплуатации. В таком случае в основу обоснования последовательности горных работ должны быть заложены условия формирования техногенного образования, а именно места и характер заполнения хвостов в хранилище.

В этой связи порядок подготовки техногенного сырья подразумевает осушение разрабатываемого объекта, валовую выемку сырья с учетом характера намыва и наличия обогащенных зон, последующее транспортирование на предварительную подготовку.

В законсервированном техногенном образовании при наличии окисленного слоя, характеризующегося наличием 1 и 2 стадий окисления и имеющего мощность, обуславливающую экономическую привлекательность отдельной переработки окисленного техногенного сырья, последовательность горных работ должна включать предварительное снятие окисленного слоя, после чего осуществляется выемка не окисленного техногенного сырья. При этом стоит учитывать наличие обогащенных и обводненных зон, определяющих направление ведения фронта работ как в зоне гипергенеза, так и в не окисленной части техногенного образования. При разработке старогодних хвостохранилищ, для которых, помимо 1 и 2 стадий окисления, характерно наличие 3 стадии, о которой свидетельствует хорошо сцементированная ярозитовая корка, режим горных работ должен включать ее предварительное разрушение с целью облегчения выемки и последующего транспортирования, последующее снятие окисленного и не окисленного техногенного сырья.

Так, понимание характеристик техногенного минерального сырья на различных стадиях окисления должно учитываться при обосновании сроков его вовлечения в промышленный передел на различных стадиях освоения месторождения, что, в свою очередь, должно быть учтено в режиме горных работ.

3. 3. Обоснование режима горных работ, предусматривающего реализацию подхода использования техногенных георесурсов, сопряженных с природными месторождениями, для повышения полноты и комплексности освоения недр

Выбор рационального режима горных работ имеет большое значение для повышения рентабельности и ускорения оборачиваемости средств, позволяет уменьшить преждевременные и малоэффективные затраты в период разработки месторождения, когда возможно изменение себестоимости основного полезного ископаемого или снижение качества полезного ископаемого ввиду изменения горно-геологических условий, а также при небольших объемах разрабатываемого объекта либо высоких затратах на технологические процессы.

Считается, что режим горных работ установлен, если определено главное направление развития работ, календарное распределение объемов вскрышных и добычных работ по годам (этапам) разработки, обеспечивающее экономически эффективную разработку, достижение установленных технических показателей и требований потребителей продукции. Таким образом, в процессе обоснования режима горных работ должны быть определены направление и интенсивность развития горных работ в плане и в профиле.

Доказанная академиком В.В. Ржевским [84] необходимость выравнивания коэффициента вскрыши по этапам работы карьера, а также экономическое обоснование целесообразности усреднения объемов вскрышных и добычных работ определяет важность регулирования режима за счет усреднения годовых объемов вскрыши и добычи. Кроме того, регулирование режима может осуществляться не только за счет изменения направления или порядка развития горных работ, но и уменьшением производительности карьера по руде в периоды пиковых нагрузок по вскрыше.

Ввиду того, что технические решения при открытой разработке и ее экономические результаты определяются прежде всего соотношением объемов вскрышных и добычных работ в целом и по периодам горных работ, а количественная оценка этих соотношений производится с применением

коэффициента вскрыши, общий график режима горных работ без учета возможности использования техногенного минерального сырья в качестве дополнительных объемов добычи будет иметь вид, представленный на рисунке 3.4 [85].

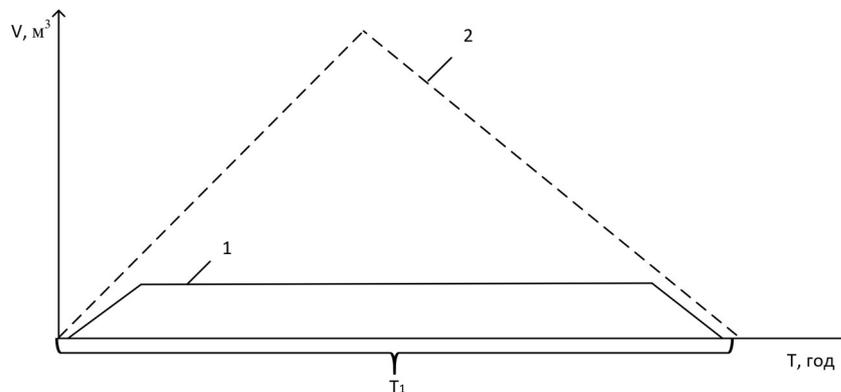


Рисунок 3. 4. Типовой график режима горных работ: изменение объемов добычи руды (1) и вскрыши (2) по годам T без вовлечения в эксплуатацию техногенного минерального сырья

В этом случае годовая производительность карьера по горной массе определяется по формуле:

$$A = (n + 1) * A_p, \quad (3.2)$$

Годовая производительность карьера по породам при этом определяется по формуле:

$$A_n = n * A_p, \quad (3.3)$$

где A_p – годовая производительность карьера по полезному ископаемому, m^3 ; n – эксплуатационный коэффициент вскрыши, m^3 / m^3 .

Зачастую, в данном случае ведется добыча основного полезного ископаемого и бессистемное складирование отходов обогащения, что является негативным фактором и не соответствует идее комплексного освоения недр. Кроме того, такой режим горных работ в результате приводит к двум основным отрицательным последствиям: некачественному освоению недр и накоплению значительных объемов техногенного сырья. Однако при освоении природных месторождений медно-колчеданных руд эта проблема может быть решена как раз за счет вовлечения техногенного сырья, полученного из отходов их обогащения, в промышленную переработку.

Это обусловлено тем, что с учетом установления характера окисления техногенного сырья из отходов обогащения медно-колчеданных руд, особенности которого представлены в п. 3.2 настоящей диссертации, несколько трансформируются цели и задачи освоения участка недр, которыми являются не только максимальный объем добываемого полезного ископаемого с минимальными затратами при обеспечении требований промышленной и экологической безопасности, но и реализация возможности постепенного и в то же время своевременного вовлечения в промышленную переработку техногенного сырья по мере его подготовки посредством целенаправленного формирования его качественных характеристик с заданными потребительскими свойствами в установленные сроки. Поэтому сырье техногенных минеральных образований, формируемых при переработке медно-колчеданных руд, следует рассматривать в качестве минерального источника, способного обеспечить увеличение объемов добычи при разработке природных запасов за счет совокупного использования [58].

В этой связи представлен вариант режима горных работ, в котором техногенное минеральное сырье рассматривается в качестве дополнительного источника минерального сырья, способного обеспечить увеличение объемов добычи основных запасов при разработке месторождений твердых полезных ископаемых за счет совокупного использования природных и техногенных минеральных ресурсов (рисунок 3.5).

Идея предложенного режима горных работ заключается в том, что с учетом выявленных особенностей окисления складированного в хвостохранилище техногенного сырья необходимо выделить определенный период T_2 , в ходе которого осуществляется подготовка техногенного сырья с учетом необходимых для последующей переработки качественных характеристик. После периода T_2 хвосты вовлекаются в переработку, поскольку изменяется соотношение первичных упорных сульфидов и вторичных хорошо- и среднерастворимых сульфатов. Продолжительность этого периода должна определяться необходимыми объемами техногенного сырья, которые в дальнейшем позволят сохранить объемы добычи

при уменьшении объемов добычи основного полезного ископаемого с целью увеличения сроков отработки месторождения на период $T_4 + T_5$. В данном случае T_4 – период, наличие которого обеспечивается объемами добычи основного полезного ископаемого V_5 , которые были временно оставлены в недрах за счет добычи объемов подготовленного техногенного сырья V_4 . Под периодом T_5 понимается промежуток времени, когда происходит добыча оставшихся объёмов подготовленного техногенного сырья, полученных при переработке последних запасов осваиваемого месторождения.

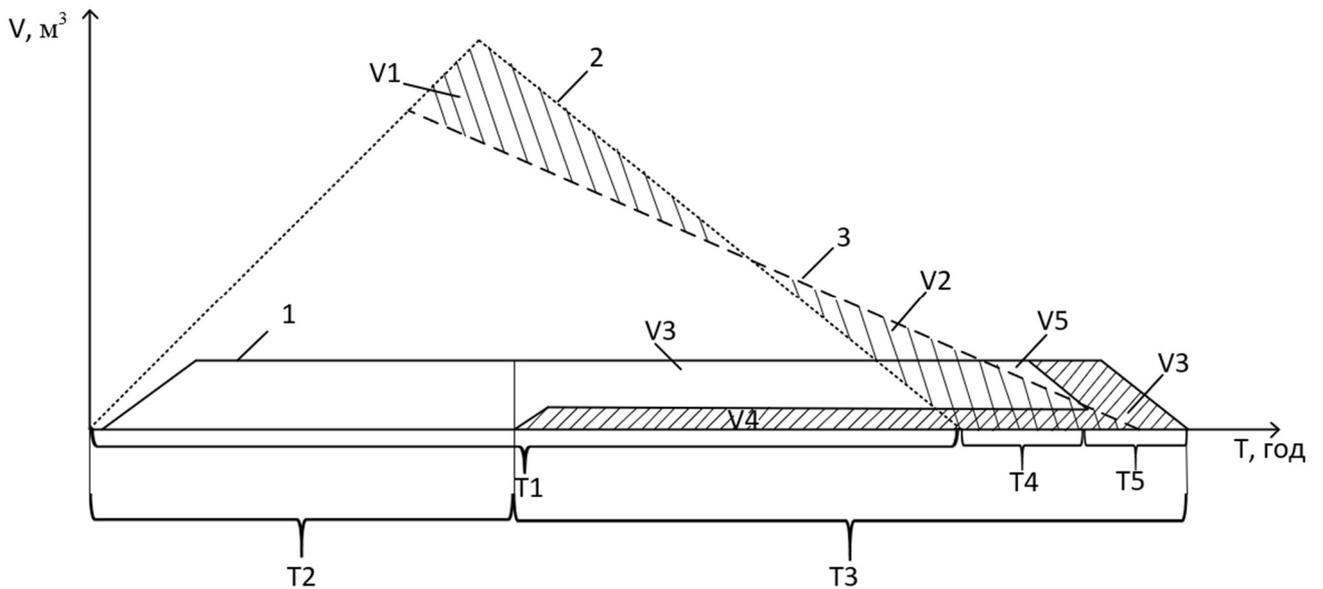


Рисунок 3. 5. Режим горных работ, предусматривающий совокупное использование при-родных и техногенных георесурсов: 1 – объемы добычи руды, 2 – граница вскрышных работ до вовлечения техногенного сырья, 3 – после вовлечения, $V_1=V_2$ – объем смещенных во времени вскрышных работ, $V_3 + V_5$ – исходный объем, $V_4 + V_3$ – замещенный объем техногенным сырьем.

Также важно, что при предложенном подходе объемы добычи техногенного сырья не будут замещать объемы добычи природного сырья, но в случае необходимости будут использованы для увеличения финансового потока за счет того, что продлевается общий срок эксплуатации месторождения и за счет комплексного использования ценных компонентов. Предложенный подход позволяет не только увеличить срок эксплуатации горного предприятия, но и снизить коэффициент вскрыши путем смещения вскрышных работ во времени 2 и 3.

Также важно, что при комплексном освоении участка недр необходима инициализация всех возможных потребителей техногенного минерального сырья с целью использования извлекаемых из него компонентов, поскольку в лежалых хвостах флотации содержится значительное содержание благородных металлов, которые за счет своей ценности могут быть реализованы как дополнительная товарная продукция для поддержания экономических показателей горнопромышленного предприятия. Поэтому стоит отметить, что при предложенном подходе объемы добычи техногенного сырья не будут замещать объемы добычи природного сырья, но в случае необходимости будут использованы для увеличения финансового потока за счет того, что из подготовленного техногенного сырья можно извлечь благородные металлы.

Кроме того, факт того, что техногенное минеральное сырье из отходов обогащения медно-колчеданных руд имеет характерные особенности преобразования при хранении (см. п. 3.2.), подготовка техногенного сырья посредством его окисления до 2 стадии и последующее снятие окисленного слоя в качестве объемов добычи будут отражать реализацию стратегии целенаправленной подготовки и своевременного использования техногенного минерального сырья в части увеличения объемов добычи.

В этой связи эффективность добычи техногенного минерального сырья и его последующего вовлечения должна обеспечиваться не только с учетом необходимости увеличения объемов добычи в общем графике режима горных работ за счет наличия спроса на дополнительную товарную продукцию, но и с обоснованием периода, когда техногенное минеральное сырье становится наиболее благоприятным для обогатительного передела.

Однако важно отметить старогодние техногенные образования, вблизи которых не осталось сформировавших их предприятий, а их объемы зачастую не вовлекаются ввиду отсутствия заинтересованных лиц и экономической стороны вопроса. В таком случае техногенное образование может быть рассмотрено в идее совокупного использования совместно с природными георесурсами в едином графике режима горных работ с учетом наличия близлежащих

горнопромышленных предприятий, готовых взять на себя ответственность за разработку старогодних техногенных образований. Однако такой подход осложнен несовершенством нормативно-правовой базы в части управления отходами горнопромышленных предприятий [90], что влечет за собой увеличение сроков оформления прав на разработку техногенного образования. Тогда решением этой проблемы может стать самостоятельная разработка техногенного образования с учетом возможности реализации техногенного сырья с его переработкой на обогатительных фабриках близлежащих горнопромышленных предприятий.

В таком случае проект разработки старогоднего техногенного образования должен включать выявление в его пределах участков с требуемыми характеристиками техногенного сырья, что осуществляется на основании предложенного подхода к районированию техногенных образований с учетом результатов комплексных исследований, а также с учетом возможных затрат на выполнение добычных, вскрышных и вспомогательных работ с целью разработки техногенных объектов, обеспечивающей экономически эффективное освоение участка недр.

Тогда обоснование режима горных работ на техногенных образованиях из отходов обогащения медно-колчеданных руд, в которых активно протекает процесс вторичного минералообразования, должно базироваться на районировании техногенного образования по фактору развития зоны гипергенеза – стадийности окисления сырья, глубины распространения, зоны и степени растворимости минеральных форм, а также изменения физико-механических характеристик грунтов. Все это должно быть заложено в основу выбора режима горных работ для разработки старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики, эффективность которого определяется обеспечением максимальной прибыли от разработки техногенного образования с получением полезного ископаемого заданного качества.

3. 4. Алгоритм выбора приоритетной последовательности производства горных работ при эксплуатации техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд на базе исследования протекающих в них окислительных процессов

На базе проведенных исследований доказана реальная возможность вовлечения в широкую промышленную эксплуатацию отходов переработки медно-колчеданных руд с извлечением из них не только характерных для данного типа сырья основных компонентов – меди и цинка, но и других ценных промышленно-значимых элементов, включая благородные металлы.

Как было сказано ранее, повышение полноты и комплексности освоения недр в данном случае может быть обеспечено за счет обоснования режима горных работ, предусматривающего совокупное использование природных и техногенных ресурсов. При этом обоснование режима горных работ или его регулирование должно осуществляться с учетом периодов освоения природного месторождения, а также факта наличия сопряженных с ним техногенных образований из отходов обогащения руд и периода их эксплуатации. Предложенный принцип предусматривает обоснование режима горных работ с учетом возможности совокупного использования природных и техногенных георесурсов и включает следующие периоды освоения природного месторождения:

- этап подготовки проектных решений разработки;
- этап освоения месторождения, характеризующийся непрерывным ростом объемов добычи, когда осуществляется формирование техногенных образований из отходов обогащения руд;
- этап стабилизации темпов роста и выхода на максимальный уровень добычи, при котором должна осуществляться подготовка техногенного сырья;
- этап затухания объемов добычи, на котором обеспечивается максимальное вовлечение техногенного сырья, полученного на завершающей стадии освоения основных запасов.

Результаты исследования структуры старогоднего техногенного образования, а также вещественного состава и свойств слагающего его сырья

доказывают, что последовательность ведения горных работ должна быть определена прежде всего с учетом наличия различных по характеристикам слоев: в данном случае – окисленного и не окисленного. При этом выбор приоритетной последовательности производства горных работ и технологической схемы эксплуатации хвостохранилища, сформированного из отходов переработки медно-колчеданных руд, в которых при длительном хранении началось активное развитие окислительно-восстановительных процессов, должен базироваться на районировании техногенного образования с учетом параметров окисленного и не окисленного слоев. Так, для окисленного слоя в числе параметров – степень окисления, глубина распространения, процент растворимости минеральных форм, для не окисленного – глубина. Также для всех слоев в основу выбора приоритетной последовательности производства горных работ должны быть заложены физико-механические характеристики всех имеющихся в пределах техногенного образования грунтов. Однако также стоит учитывать необходимость вовлечения техногенных минеральных ресурсов в промышленный передел и примерные сроки реализации получаемых ценных компонентов с учетом состояния и объемов техногенного сырья в хвостохранилищах. Поскольку именно этот факт определяет возможность целенаправленной подготовки техногенного сырья для получения необходимого качества либо выемку с транспортировкой на переработку.

Для случая, когда хвостохранилище является старогодним, сформировано без специализированных настилов и должно быть разработано в кратчайшие сроки, необходимо обоснование предпочтительного режима горных работ, предусматривающего разработку старогодних хвостохранилищ из отходов медно-колчеданных руд. Поэтому разработан алгоритм выбора приоритетной геотехнологической схемы эксплуатации техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд на базе результатов комплексного исследования преобразованного при хранении техногенного материала, представленный на рисунке 3.6.

Согласно предложенному алгоритму на первоначальном этапе следует проводить анализ первичной информации – данных о геолого-промышленных

типах первичных руд, информации о способе и условиях разработки месторождения, системе управления качеством и об особенностях переработки и последующей транспортировки отходов обогащения, а также оценке условий и особенностей формирования техногенных образований.

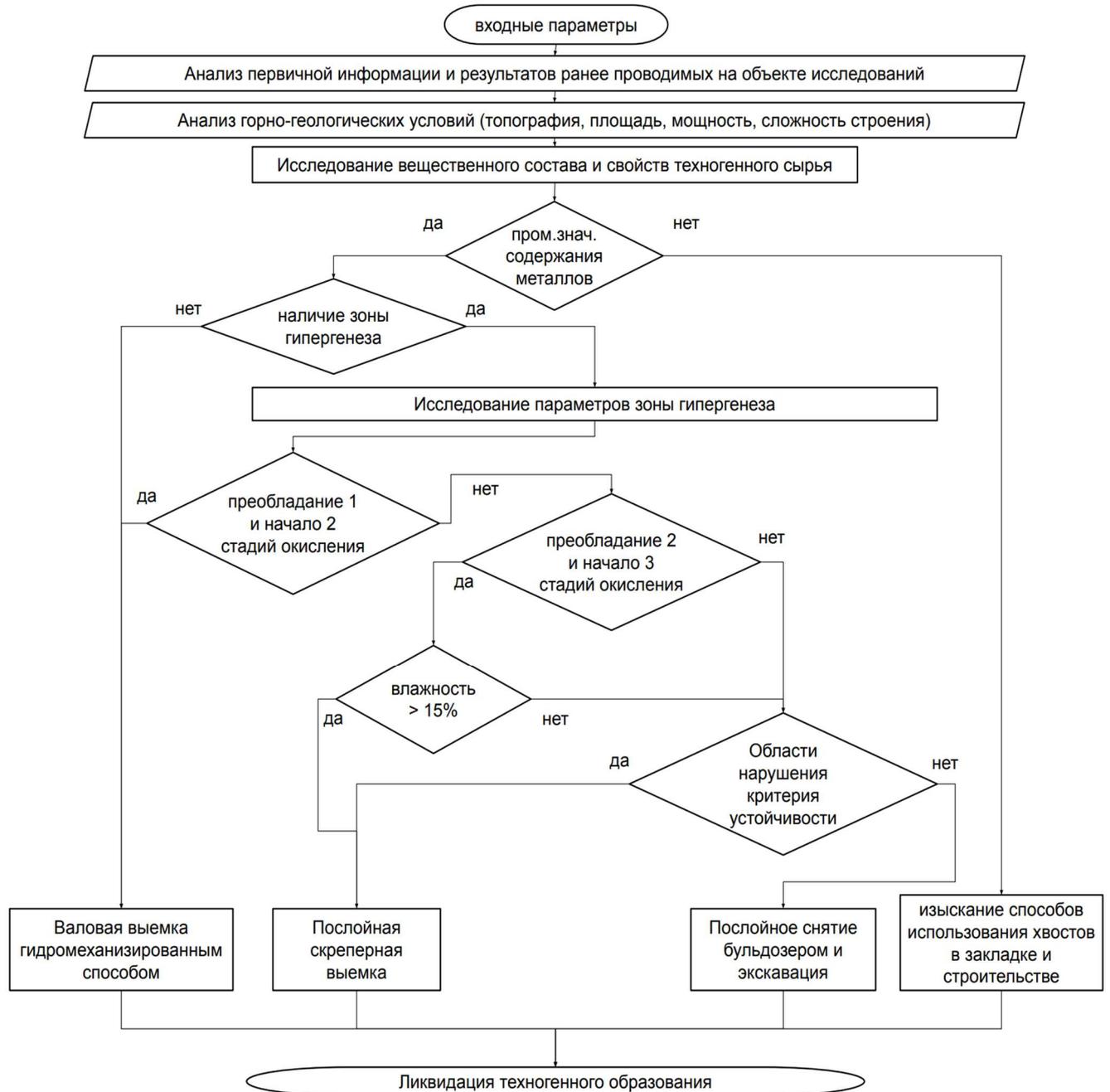


Рисунок 3. 6. Алгоритм выбора приоритетной геотехнологической схемы эксплуатации техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд

Следующий этап подразумевает анализ горно-геологических условий формирования и эксплуатации техногенного образования, включая исследование

вещественного состава, структуры, гранулометрического состава, а также физико-химических и физико-механических свойств техногенного сырья с обоснованием перспектив его промышленного использования. На этом этапе также производится определение наличия зоны гипергенеза и исследование ее параметров – степеней окисления, глубины распространения, процента растворимости минеральных форм.

Далее на основе полученных результатов оценки состава, структуры и свойств техногенного сырья с учетом определенных параметров зоны гипергенеза, а также обогащенных и обедненных ценными компонентами зон производится районирование техногенного объекта, которое позволит определить последовательность ведения горных работ, направление развития фронта работ и параметры горнотехнических конструкций, выбрать виды горно-транспортного оборудования для каждого участка, а также условия его размещения в пределах техногенного образования в соответствии с предложенными и систематизированными во второй главе технологическими схемами.

Выводы по главе 3

1. Характеристика гранулометрического состава техногенного материала свидетельствует о том, что в среднем по хвостохранилищу преобладает класс крупности $-0,04+0$ мм, на него приходится 78,37% от общего количества отобранного техногенного материала, что обусловлено особенностями процесса обогащения на Сибайской обогатительной фабрике, к тонине помола руды. Однако 21,63% приходится на более высокие классы крупности, поэтому для вовлечения в переработку тонкодисперсного материала методами физико-химическими геотехнологиями может потребоваться дополнительная операция по измельчению и последующему обжигу и окомкованию техногенного сырья.

2. На базе полученных результатов в зоне гипергенеза выделены 4 подзоны. Анализ данных исследования напряжения сдвига техногенного сырья в каждой из выделенных подзон позволил установить, что прочностные свойства отходов переработки из подзоны №3 техногенного образования ниже, чем в

подзонах № 1, № 2 и № 4, что требует разработки решений для обеспечения безопасности ведения горных работ с целью исключения образования провалов выемочно-погрузочного оборудования.

3. Предложено обоснование режима горных работ, предусматривающего совокупное использование природных и техногенных георесурсов, идея которого заключается в том, что в момент, когда подготовлены объемы техногенного сырья необходимого качества, производится снижение объемов добычи руды за счет вовлечения техногенных георесурсов с целью обеспечения более продолжительного срока отработки месторождения полезных ископаемых и, как следствие, увеличения срока работы горного предприятия.

4. Предложенный подход позволяет не только увеличить срок эксплуатации рудника, но и снизить коэффициент вскрыши путем смещения вскрышных работ во времени 2 и $2'$. С учетом ставки дисконтирования, развития техники и технологий, такое смещение оказывает положительный финансовый эффект на работу горнопромышленного предприятия. Причем, объемы вскрышных работ остаются прежними, но лишь смещаются во времени.

5. Алгоритм выбора приоритетной геотехнологической схемы эксплуатации техногенных образований из отходов обогащения медно-колчеданных руд на базе исследования протекающих в них окислительных процессов, который с учётом полученных результатов исследований вещественного состава сырья, структуры и свойств отвала позволяет выбрать наиболее рациональную технологическую схему разработки неоднородного участка в соответствии с классификацией технологических схем, предложенной в разделе 2.4.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

4.1. Обоснование приоритетного порядка разработки старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики

Для обоснования приоритетного порядка разработки старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики с развитием зоны гипергенеза, что определяет отдельное снятие окисленного и не окисленного слоя с выделением обогащенных зон, подлежащих первоочередной выемке, построена блочная модель исследуемого объекта (рисунок 4.1).

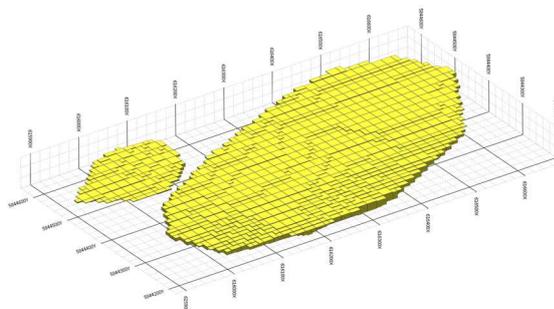


Рисунок 4. 1. Каркасная модель старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики, включающая основную и северо-западную части, разделенные дамбой

В основу моделирования была заложена база данных, созданная на основе полученной в ходе геологоразведочных работ на исследуемом хвостохранилище информации:

- 3D координаты положения устьев и общую глубину скважин;
- данные скважин, в которых индивидуальные характеристики расположены на отдельных глубинах (распределение содержания ценных компонентов, влажность и растворимость техногенных грунтов);
- данные с индивидуальными характеристиками интервалов ОТ и ДО (интервалы опробования и окисления);
- 3D грани поверхности техногенного образования в пределах его контуров в формате (*.dxf), импортируемые в Micromine из Autocad.

Основание модели техногенного образования ограничивалось контуром, отстроенным по нижним отметкам пробурённых скважин, исключая интервалы резкого падения содержания ценного металла, указывающего на перебур в подстилающие породы. Отстроенные каркасы разведанных участков хвостохранилища обрезались топоповерхностью при помощи функции пересечения каркасов. Результаты опробования техногенного образования интерполировалось в модель методом пространственной интерполяции обратных расстояний IDW второй степени. Композитные интервалы вдоль скважин составили 2 м.

Далее с учетом установленных в ходе исследования химического состава техногенного сырья корреляционных зависимостей между Au и Ag, которые позволили спрогнозировать изменение качества техногенного сырья в зонах, где не удалось произвести отбор проб ввиду сложных горно-геологических условий, а именно преобладания переувлажненных техногенных грунтов производилась оценка запасов техногенного сырья по ценным компонентам – Au, Ag (рисунок 4.2). Объёмный вес золотосодержащих отходов переработки руд составил $1,9 \text{ т/м}^3$.

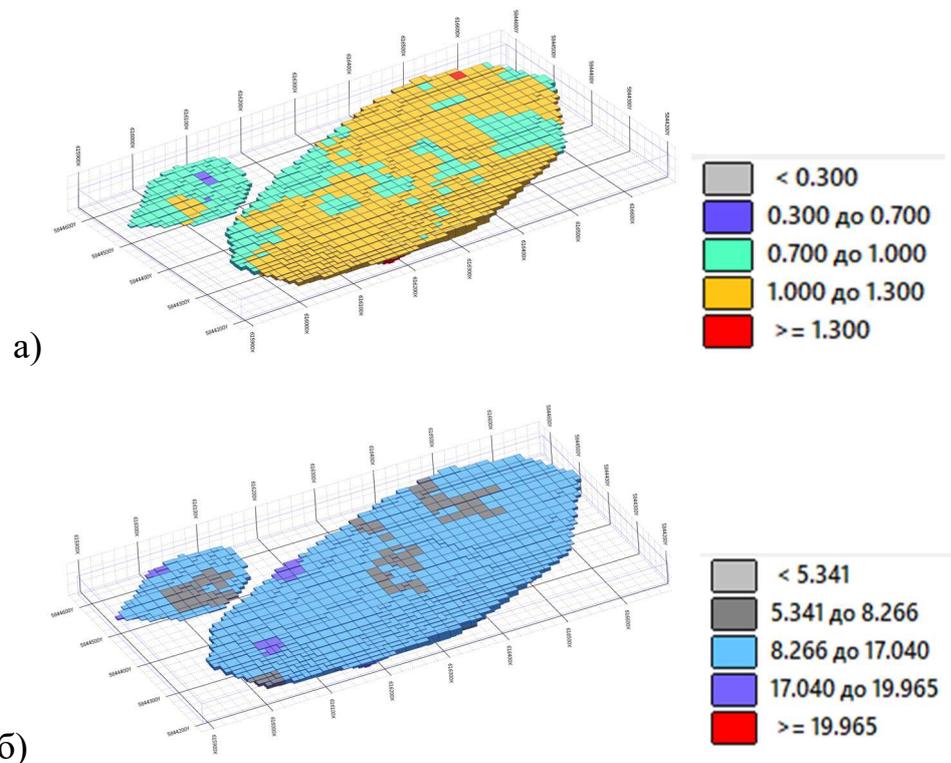


Рисунок 4. 2. Блочные модели старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики: а – по Au, б – по Ag

Установленные в ходе моделирования блочной модели северо-западной и основной части старогоднего хвостохранилища закономерности распределения ценных компонентов свидетельствуют о том, что в северо-западном отсеке хвостохранилища более бедное техногенное сырье, чем в основной. Этот факт обуславливает первоочередную разработку основного отсека с целью более быстрой окупаемости затрат.

Сводные результаты подсчёта запасов ценных компонентов в хвостах обогащения из окисленного и не окисленного слоев подсчитывались на основании набора бортовых содержаний в пределах отстроенных каркасов и представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Запасы ценных компонентов в хвостах обогащения окисленного и не окисленного слоев

Участок хвостохранилища	Наименование полезных компонентов	Ед. изм.	Запасы	Содержание полезных компонентов, % (г/т)
	Отвальные хвосты	тыс. т		
Окисленный слой (зона гипергенеза)				
Основная часть	золото	т	0,64	0,9
	серебро	т	1,06	10
Северо-западная часть	золото	т	0,05	0,7
	серебро	т	0,2	10,3
Не окисленный слой				
Основная часть	золото	т	5,97	1
	серебро	т	10,34	12,3
Северо-западная часть	золото	т	0,3	0,65
	серебро	т	1,02	10,75

Анализ таблицы 4.1 подтверждает экономическую привлекательность техногенного минерального образования и необходимость комплексного освоения старогоднего хвостохранилища с вовлечением в переработку как окисленного, так и не окисленного слоя. В целом содержания ценных компонентов в окисленном слое ниже, чем в не окисленном, поэтому первоочередное снятие техногенного сырья из зоны гипергенеза необходимо не только ввиду преобладания растворимых

минеральных форм, но и в связи с необходимостью подбора иной технологической схемы либо снятием окисленного слоя в качестве вскрыши.

Кроме того, эти данные должны быть учтены при технологической оценке качества перерабатываемого минерального сырья для получения концентратов с требуемым содержанием ценных металлов для обоснования экономической эффективности вовлечения разнородного техногенного сырья в эксплуатацию.

4. 2. Обоснование выбора горнотехнического оборудования для разработки старогоднего Сибайского хвостохранилища, сформированного из отходов обогащения медно-колчеданных руд

Интенсификация протекающих окислительно-восстановительных процессов с течением времени обуславливает изменение напряженно-деформированного состояния техногенных масс в связи с изменением их влажности, как правило, связанное с уплотнением грунтов. В этой связи с целью обоснования выбора горнотехнического оборудования для разработки старогоднего Сибайского хвостохранилища и возможных мест его расположения на базе определения допустимых нагрузок на грунт выполнено моделирование плоского напряженно-деформированного состояния массива методом конечных элементов, в основу которого заложены физические условия деформирования всех видов техногенных грунтов, выявленных в ходе комплексных исследований. Поэтому на основе имеющегося набора данных о физико-механических свойствах техногенных грунтов из различных по характеру окисления зон, полученных в ходе исследований проб, в пределах хвостохранилища Сибайской ОФ были выделены слои с учетом сопоставления содержаний вторично образованных минералов и первичных сульфидов, перерабатываемых на Сибайской обогатительной фабрике, определяющих характер и стадию протекания окислительных процессов, и естественной влажности грунтов, на основании чего было выделено 5 слоев (рисунок 4.3): 1–3 слои определяют отличие грунтов в зоне окисления, 4 и 5 слои

характеризуют грунты, залегающие ниже зоны окисления. В целом выделенные слои характеризуются следующим:

– 1 слой характеризуется наличием ярозитовой корки, свидетельствующей о 3 стадии окисления, естественная влажность таких прослоев изменяется в среднем от 8 до 14 %;

– 2 слой характеризуется преобладанием хорошо- и среднерастворимых вторичных минералов, свидетельствующих о 2 стадии окисления, естественная влажность в среднем от 17 до 28 %;

– 3 слой характеризуется преобладанием хорошо- и среднерастворимых вторичных минералов, свидетельствующих о 2 стадии окисления, естественная влажность не превышает 15 %;

– 4 слой характеризуется отсутствием вторичных минералов и расположен ниже зоны окисления, естественная влажность грунтов не превышает 15 %;

– 5 слой также как и 4 слой характеризуется отсутствием вторичных минералов и расположен ниже зоны окисления, однако естественная влажность грунтов в слое н изменяется в среднем от 15 до 28 %.

Систематизация данных опробования в различных зонах хвостохранилища и полученных характеристик выделенных слоев позволила определить структурное строение техногенного массива, на основании чего был построен разрез по общему профилю, проходящего через северо-восточную зону с преобладанием переувлажненных и сильно переувлажненных пород (прудковую), южную зону (пляжную), где развита ярозитовая корка с изменением мощности в среднем от 0,5 до 1 м, и промежуточную по характеристикам техногенных грунтов – юго-западную зону. Профиль разреза и сам разрез представлены на рисунке 4.3.

Оценка допустимых нагрузок производилась для самой осушенной и устойчивой зоны – пляжной, где развита ярозитовая корка, и самой обводненной – прудковой, где отмечено преобладанием переувлажненных и сильно переувлажненных грунтов. Разрезы этих зон представлены на рисунке 4.4. Также для моделирования были заданы упругие свойства – модуль упругости и коэффициент Пуассона, а также плотность, сцепление и угол внутреннего трения,

которые были определены при исследовании физико-механических характеристик грунтов. Значения основных заданных свойств систематизированы в таблице 4.2.

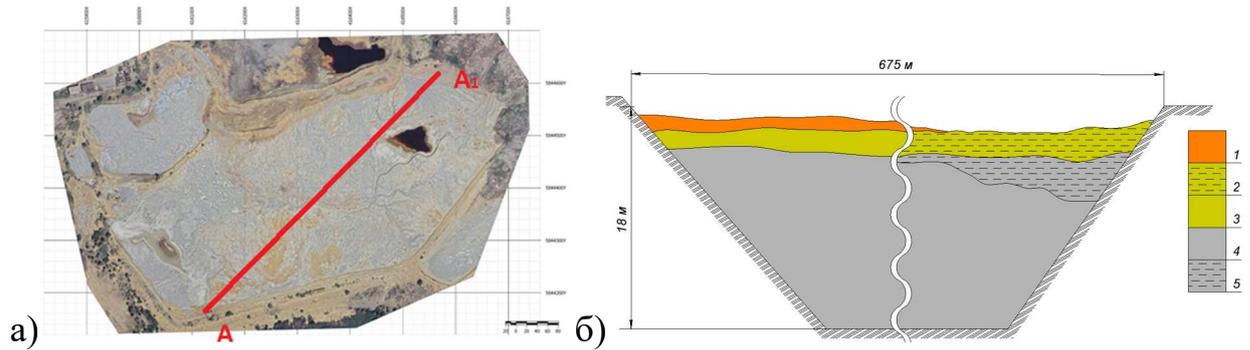


Рисунок 4. 3. Распределение слоев с различными характеристиками: а – план хвостохранилища с линией разреза, б – разрез по профилю А-А1. 1–5 – описанные выше слои

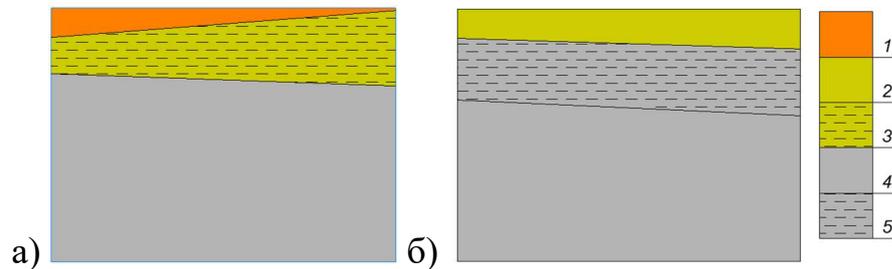


Рисунок 4. 4. Разрезы пляжной (а) и прудковой (б) зон техногенного образования: 1–5 – номера слоев в соответствии с таблицей 4.2

Так, на основе данных таблицы 4.2 для выбора горнотранспортного оборудования с целью разработки лежалых хвостов Сибайской ОФ, и определения приоритетных мест его расположения в пределах поверхности техногенного образования либо на устойчивых дамбах, в работе исследованы и оценены допустимые нагрузки для самой ослабленной и самой устойчивой согласно характеристикам зон: прудковой и пляжной.

Низкие пределы прочности техногенных грунтов могут исключить использование техники на колесном ходу при разработке техногенного образования и обусловить необходимость применения техники, располагаемой на специальных понтонах, или установок скреперного типа, располагаемых на дамбах.

В связи с тем, что при оценке устойчивости массива рассматривались поверхностные и объемные силы, при создании геомеханических моделей

учитывалась масса применяемого оборудования, контактная площадь с грунтом и давление на грунт.

Таблица 4.2. Расчетные значения физико-механических характеристик техногенных грунтов, принятые для оценки напряжённо-деформированного состояния хвостохранилища Сибайской ОФ

№ слоя	Характеристика слоя	Модуль упругости E, кН/м ²	Коэффициент Пуассона ν	Плотность γ , кН/м ³	Сцепление C, кН/м ²	Угол внутреннего трения
1	3 стадия окисления, развита ярозитовая корка, пески	4434,6	0,35	16,6	21,67	33,5
2	2 стадия окисления, преобладание сильно переувлажненных пород, суглинков	5276	0,36	21,8	11,7	19,2
3	2 стадия окисления, преобладание пород нормальной влажности, супесь	3807,5	0,31	22,8	10	33
4	Не окисленный слой, преобладание пород нормальной влажности, пески и супеси	3395	0,3	25,5	33,4	32,1
5	Не окисленный, преобладание сильно переувлажненных пород, супеси	5172	0,365	21,95	14,2	19,9

В период проведения геолого-оценочных работ при перемещении буровой установки типа УРБ 2ДЗ на базе автомобиля УРАЛ (рисунок 4.5) техника выдавливала грунт с образованием колеи глубиной до 0,5 м и при приближении к увлажненной зоне, где происходит уменьшение мощности развитой ярозитовой корки до 0,7 м, начинала крениться ввиду недостаточной мощности корки для обеспечения устойчивости поверхности. В этой связи для верификации геомеханической модели сначала был произведен расчет с использованием массы, контактной площади и давления на грунт буровой установки типа УРБ 2ДЗ на базе автомобиля УРАЛ. В результате создания геомеханической модели с заданием таких параметров была подтверждена вероятность переворачивания техники при приближении к увлажненной зоне, где происходит уменьшение мощности

развитой ярозитовой корки. Этот факт обусловил верификацию геомеханической модели.



Рисунок 4. 5. Фото с места отбора проб в ходе геолого-оценочных работ с использованием буровой установки типа УРБ 2Д3 на базе автомобиля УРАЛ

Таким образом, результаты моделирования свидетельствуют о том, что при определенных исследованиями физико-механических и литологических характеристиках слоев техногенного грунта хвостохранилища Сибайской ОФ, использование крупногабаритной техники на колесном ходу небезопасно. Применение мелкогабаритных колесных погрузчиков для разработки основной части техногенного образования не рассматривалось, поскольку оно характеризуется низкой производительностью и проходимостью. Поэтому далее рассматривались варианты техники на гусеничном ходу.

Так, в качестве предполагаемого технологического транспорта для построения геомеханических моделей был рассмотрен экскаватор типа Caterpillar 395. Что касается удельного давления на грунт гусеничных малогабаритных экскаваторов такого типа, то оно составляет 190 кПа, что в 2 раза превышает давление, создаваемое буровой установкой на базе а/м УРАЛ. В этой связи экскаватор может применяться только при расположении на устойчивых дамбах или на понтонных основаниях. Однако использование понтонов было исключено в связи со сложностью обеспечения их устойчивости при закреплении на текучепластичных грунтах и риском переворота понтона, поскольку экскавация в таком режиме возможна только обратной лопатой т.е. с борта понтона с подрыванием его основания.

Рабочие уступы в техногенном образовании из лежалых хвостов могут разрабатываться экскаваторами с обратной лопатой типа Caterpillar 395, но при их расположении на устойчивой дамбе хвостохранилища (рисунок 4.6).

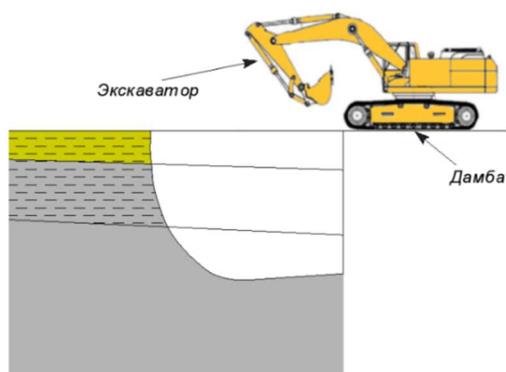


Рисунок 4. 6. Разрез прудковой зоны техногенного образования, разрабатываемой экскаватором с дамбы: 2,4 и 5 – номера слоев

Поэтому было произведено моделирование расчета критерия прочности (рисунок 4.7 а) и возможной призмы обрушения по верхней бровке (рисунок 4.7 б) для прудковой зоны, которая занимает более 50 % от основной части техногенного образования.

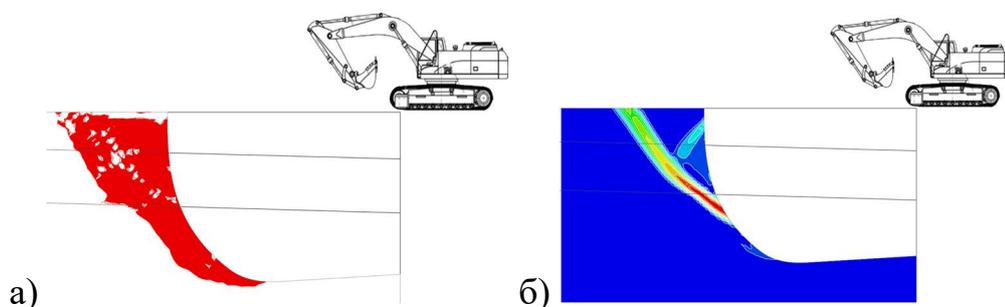


Рисунок 4. 7. Результат моделирования: а – зона нарушения критерия устойчивости незакрепленной выемки, созданной выбранным экскаватором, работающим на дамбе, б – возможная призма обрушения, полученная методом снижения прочности, соответствует КЗУ 1,25

Анализ результатов моделирования, представленных на рисунке 4.7, позволил установить область обрушения критерия устойчивости (рисунок 4.7 а), образованную при формировании выемки, созданной экскаватором. Коэффициент запаса устойчивости откоса в данном случае равен 1.25, что указывает на то, что сформированный откос в целом устойчив при непродолжительном сроке разработки. Размер призмы обрушения по верхней бровке составляет 4 м.

В связи с тем, что слабая устойчивость откосов обуславливает необходимость сокращения сроков разработки хвостохранилища с целью обеспечения безопасности ведения горных работ, что ограничивает применение технологической схемой 1.1. (таблица 2.11), была рассмотрена технологическая схема 1.2, подразумевающая использование малогабаритных мобильных

механизмов скреперного типа на гусеничном ходу, например бульдозеров для перемещения техногенного сырья к установленному на дамбе экскаватору (рисунок 4.8).

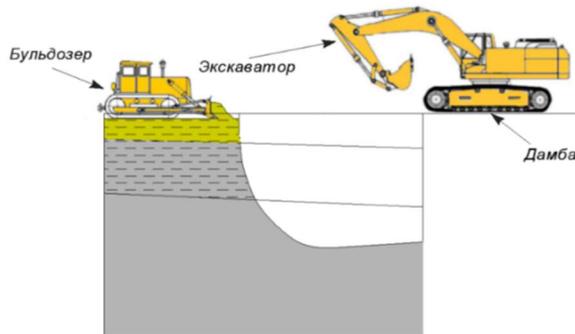


Рисунок 4. 8. Разрез прудковой зоны техногенного образования, разрабатываемой экскаватором с дамбы с помощью бульдозеров, перемещающих к нему техногенного сырья: 2,4 и 5 – номера слоев

Для этого проведено моделирование возможных областей деформирования грунтов под гусеничным экскаватором при его перемещении по поверхности техногенного образования, в основу которого заложено расположение бульдозера (рисунок 4.9) и характеристики слоев в соответствии с данными рисунка 4.4.

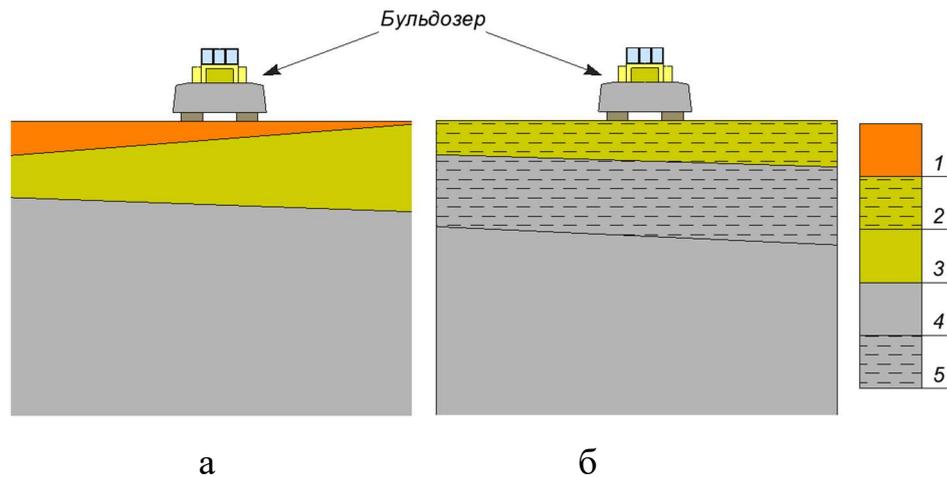


Рисунок 4. 9. Расположение бульдозера, принятое для моделирования областей нарушения условий критерия прочности грунтов под гусеницами: а – разрез пляжной зоны, б – разрез прудковой зоны

В основу модели были заложены технические характеристики бульдозера типа Caterpillar D6, поскольку этот вид техники наиболее благоприятен для ведения горных работ при низкой прочности основания отвала, так как создаваемое ими давление на грунт составляет не более 52 кПа.

В результате моделирования определены области нарушения условия критерия прочности по разрезу пляжной зоны (рисунок 4.4.а) с общим характером

деформирования поверхности (рис 4.10 а) и разрезу прудковой зоны (рисунок 4.4.б) с общим характером деформирования поверхности (рисунок 4.10 б).

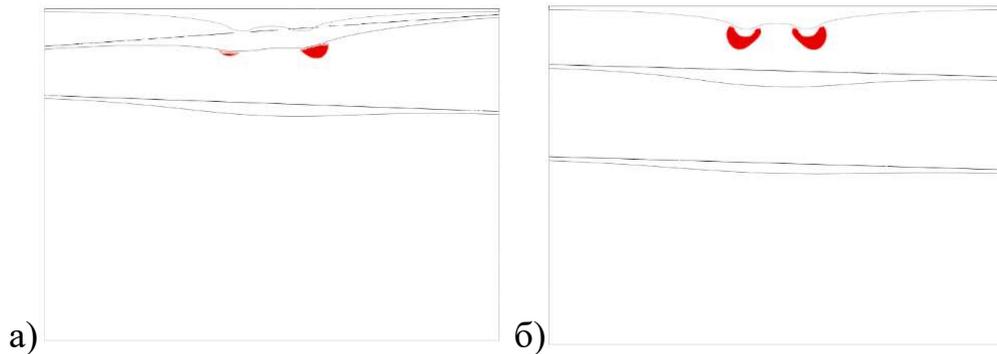


Рисунок 4. 10. Результат моделирования областей нарушения условий критерия прочности грунтов под гусеницами: а – разрез пляжной зоны, б – разрез прудковой зоны

Анализ рисунка 4.10, где области нарушения условий критерия прочности грунтов под гусеницами (показаны красным цветом), свидетельствует о том, что значение относительных деформаций поверхности под бульдозером определяет высокую вероятность продавливания грунтов под гусеницами и образования общего плавного прогиба поверхности техногенного образования в пляжной и прудковой зонах, не препятствующего движению техники. Это обуславливает возможность перемещения бульдозера типа Caterpillar D6 по поверхности старогоднего техногенного образования Сибайской ОФ.

Для оценки влияния мощности ярозитовой корки в пляжной зоне, а также преобладающих в прудковой зоне переувлажненных тонкодисперсных грунтов на потерю устойчивости под гусеничным бульдозером проведено моделирование форм потери устойчивости методом снижения прочности в виде распределения вертикальных перемещений установлено. Результат моделирования представлен на рисунке 4.11.

Анализ рисунка 4.11.а свидетельствует о том, что при наличии ярозитовой корки с изменяющейся мощностью присутствует риск ее проламывания под гусеницами бульдозера и возможно его последующее опрокидывание набок. Таким образом установлено, что хвосты в зоне развития окисленной корки, сложенной сцементированным ярозитом и характеризующей 3 стадию протекающего

процесса окисления, являются достаточно осушенными и уплотненными и в целом могут не вызывать затруднений при перемещении бульдозеров по поверхности. Однако это зависит от мощности ярозитового слоя, в связи с чем при необходимости передвижения такого вида техники должны производиться расчеты предельно допустимой мощности слоя, которая будет предотвращать риск продавливания ярозитовой корки под гусеницами бульдозера с его последующим опрокидыванием на бок.

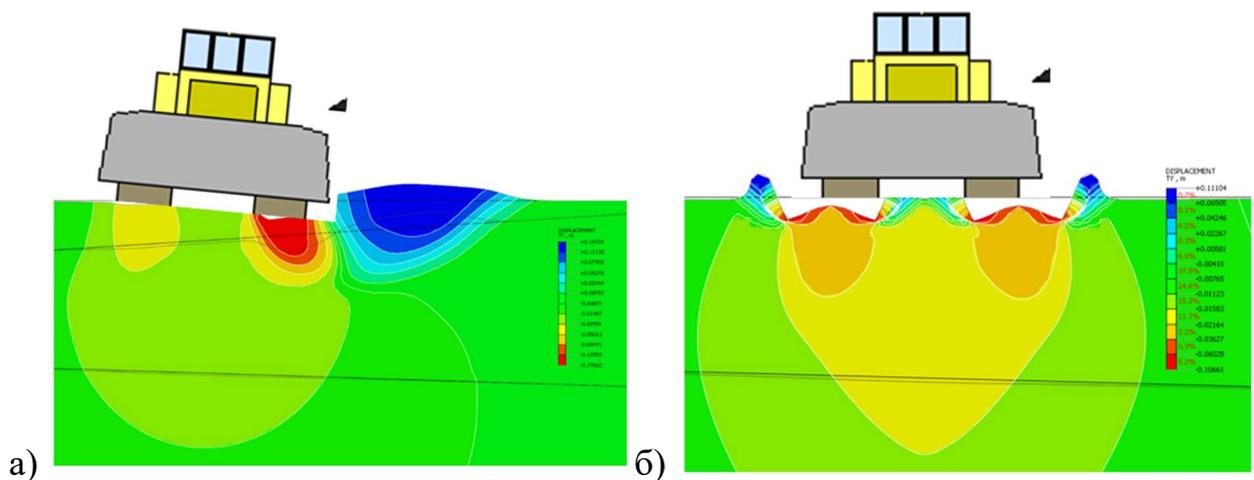


Рисунок 4. 11. Результат геомеханического моделирования форм потери устойчивости под гусеничным бульдозером: а – пляжная зона, б – прудковая зона

Анализ рисунка 4.11.б позволил установить, что несмотря на преобладание переувлажненных пород, обуславливающих слабое основание, бульдозер может передвигаться по поверхности техногенного образования, однако его равномерное погружение в слабые грунты основания на глубину до 20 см с последующим застреванием снизит производительность горных работ ввиду необходимости вытягивания техники. В таком случае для предотвращения провалов необходимо осуществление дополнительных технологических операций по повышению устойчивости поверхности техногенного образования, что приведет к удорожанию ведения горных работ.

В связи с возможностью передвижения по поверхности хвостохранилища бульдозеров на гусеничном ходу проведено моделирование условий применения технологической схемы 1.2. Результат моделирования представлен на рисунке 4.12, анализ которого позволил установить, что формирование области обрушения под

гусеничным бульдозером (рисунок 4.12а) приведет к его сползанию в выемку, созданную экскаватором. Коэффициент запаса устойчивости откосов при таком подходе к разработке хвостохранилища Сибайской ОФ равен 1, что еще меньше, чем в предыдущем варианте.

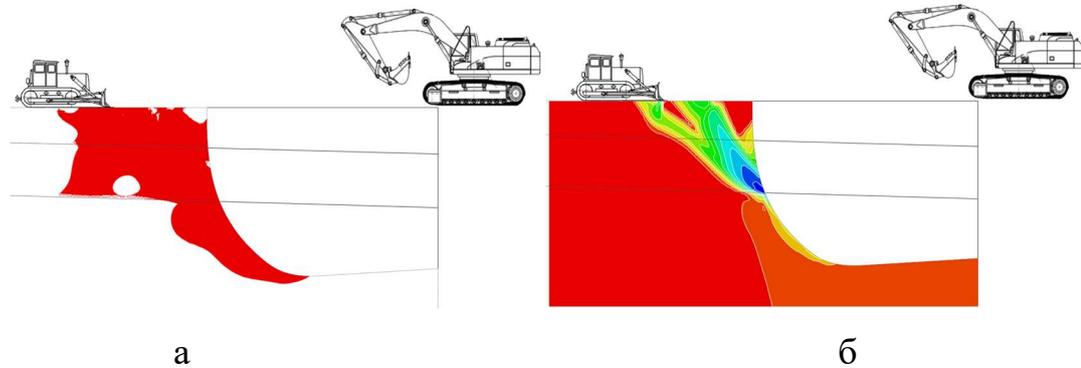


Рисунок 4. 12. Результат моделирования: а – зона нарушения критерия устойчивости незакрепленной выемки, созданной выбранным экскаватором, и бульдозером, расположенным на верхней бровке за пределами призмы обрушения, б – возможная призма обрушения, полученная методом снижения прочности, соответствует КЗУ 1

Форма возможной призмы обрушения, построенная с учетом дополнительной нагрузки от бульдозера на бровке (рисунок 4.12б), полученная методом снижения прочности, свидетельствует о том, что ее ширина равна 6 м. Этот факт свидетельствует о том, что для обеспечения безопасной работы бульдозера на верхней бровке необходимо формировать значительные бермы безопасности, что не позволит бульдозеру сталкивать породу с бровки.

Таким образом, определено, что при низкой устойчивости техногенных грунтов Сибайского хвостохранилища в зоне уменьшения мощности ярозитовой корки, где КЗУ равен 1,25, а также в зоне преобладания переувлажненных и сильно переувлажнённых тонкодисперсных фракций, где КЗУ равен 1, расположение на теле хвостохранилища любого вида техники снижает безопасность и эффективность ведения горных работ за счет высокой вероятности провалов добычного оборудования и приостановления горных работ. Однако при непродолжительном сроке самостоятельной разработки старогоднего Сибайского хвостохранилища ввиду его объема или при поэтапной отработке подготавливаемых интенсификацией окислительных слоев мощностью 1,2-1,5м в

случае его разработки совокупно с освоением природного месторождения возможно применение технологической схемы 1.2. Кроме того, для повышения безопасности ведения горных работ может быть использовано усиление поверхности посредством скальной отсыпки, предварительное осушение массива, использование для разработки техногенного образования малогабаритного добычного оборудования с минимальной нагрузкой на ослабленные грунты типа бульдозеров на увеличенном гусеничном ходу или расположение оборудования на устойчивой поверхности дамб.

4.3. Обоснование режима развития горных работ при разработке старогоднего хранилища отходов переработки медно-колчеданных руд Сибайской обогатительной фабрики

Вскрытие техногенного образования предусматривает проведение комплекса подготовительных работ по предварительному разрушению ярозитовой корки с целью предотвращения ее проламывания при передвижении по поверхности хвостохранилища горнотранспортного оборудования.

С учетом результатов выполненных исследований предпочтителен механизированный способ разработки с послойной выемкой в соответствии с применением технологической схемы 1.2. Технологическая схема производства выемочно-погрузочных и горнотранспортных работ при разработке старогоднего Сибайского хвостохранилища представлены на рисунке 4.13.

Технологическая цепочка при выполнении работ состоит: экскаватор 1 с дамбы производит выемку сырья, формируя устойчивый уступ для работы бульдозера 3, который, в свою очередь, производит послойное скреперование сырья с последующим заполнением сформированной траншеи. Технологическая цепочка подразумевает циклический подход к отработке, т. е. при заполнении ранее пройденной бульдозером траншеи, экскаватор изменяет направление ведения работ на противоположное. Таким образом исключаются простои оборудования, а

скорость заполнения траншеи определяется количеством скреперовальной техники.

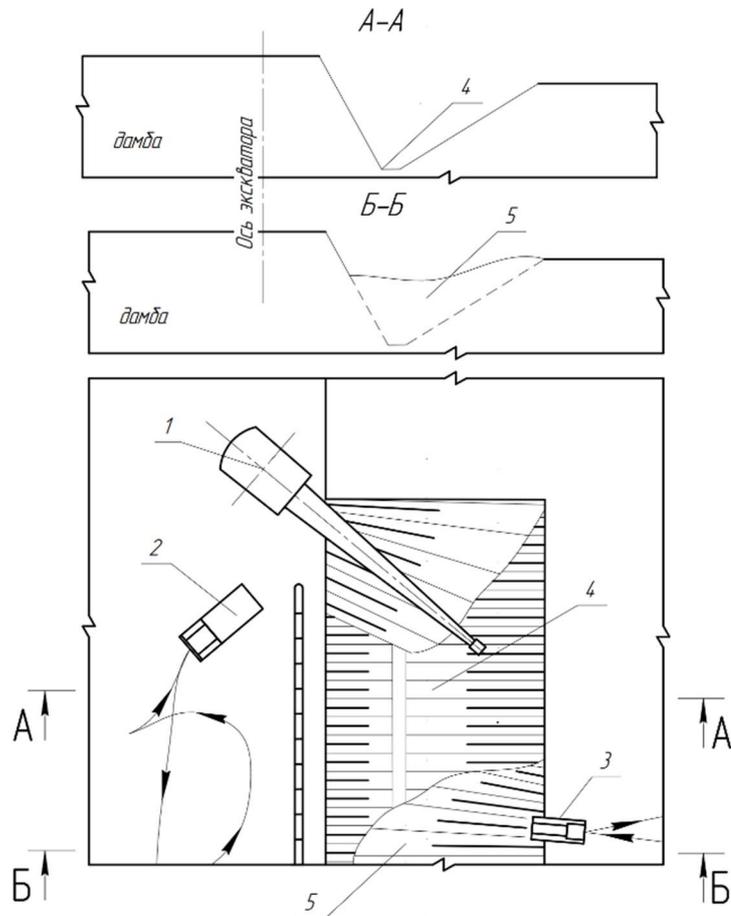


Рисунок 4. 13. Технологическая схема разработки старогоднего хранилища отходов переработки медно-колчеданных руд Сибайской обогатительной фабрики, предусматривающая порядок и направление выемки техногенного сырья

В связи с тем, что необходима подготовка слоев путем интенсификации окислительных процессов, что позволит не только обеспечить подготовку техногенного сырья заданного качества, но и продлить срок разработки техногенного образования с учетом его вовлечения в эксплуатацию совокупно с природными ресурсами, принимается, что за год окисления в соответствии с расчетам Л.З. Бишева [40], мощность окисленного слоя составит 1,2 м. Кроме того, поскольку для косогорных хвостохранилищ при параллельной схеме углубки горных работ будет происходить сокращение площадей подготавливаемых интенсификацией окислительных процессов слоев, что приведет к уменьшению годового объема добычи хвостов, для сохранения постоянства площадей и

годового объема добычи хвостов углубку горных работ следует производить по веерной схеме (рисунок 4.14).

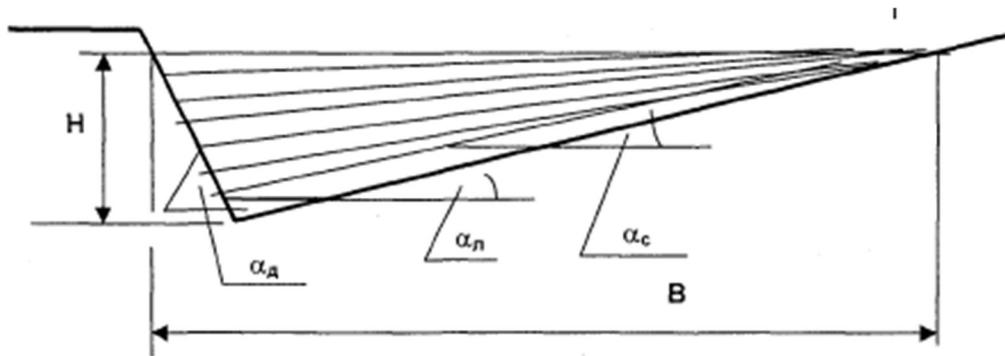


Рисунок 4. 14. Веерная углубка подготавливаемых интенсификацией окислительных процессов слоев [40]

С учетом скорости окисления отработка одного слоя должна начинаться не ранее, чем через 180 дней после начала работ по интенсификации верхнего слоя. Поэтому с целью обеспечения непрерывности ведения выемочных работ предложено делить основной отсек хвостохранилища на два участка. Схема порядка ведения выемочных работ и расположения основных объектов при разработке техногенного образования представлена на рисунке 4.15.

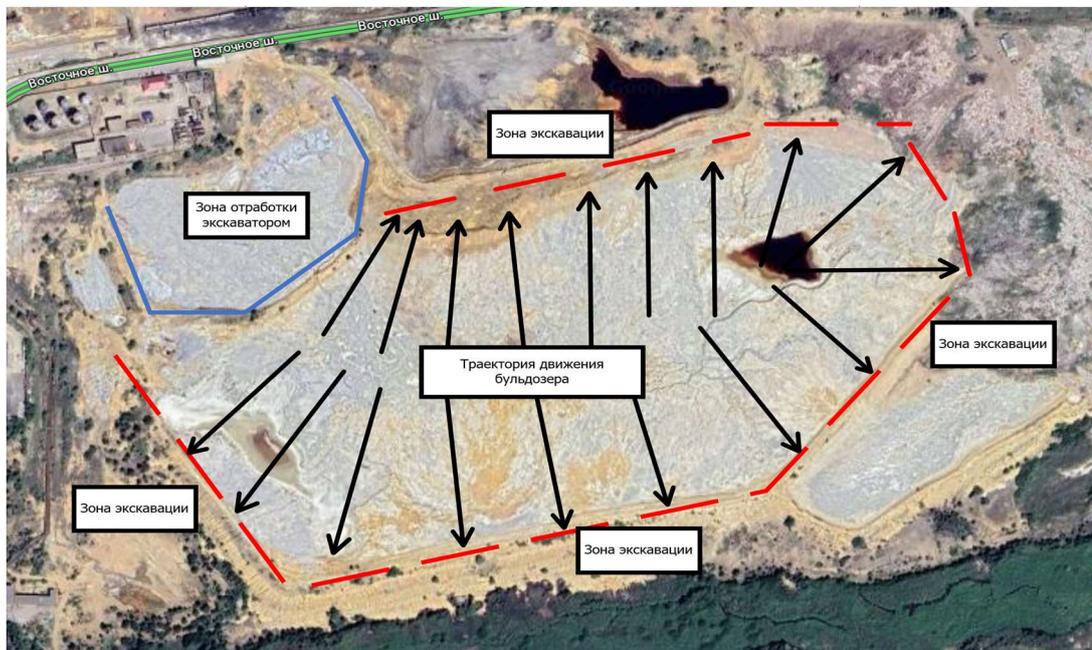


Рисунок 4. 15. Схема разработки Сибайского хвостохранилища, предусматривающая порядок и направление выемки техногенного сырья

Северная часть хвостохранилища имеет сопряжение с действующей автомобильной дорогой, по которой осуществляется городское транспортное

сообщение. Погружённое в автосамосвалы техногенное сырьё транспортируется по существующим дорогам до промплощадки Сибайской обогатительной фабрики с разгрузкой на площадке усреднительных складов.

С учётом строения, состава и физико-механических свойств техногенного сырья, а также проведенного геомеханического моделирования при разработке старогорого хвостохранилища в качестве выемочного горнотранспортного оборудования рекомендуется использовать экскаватор типа Caterpillar 395 и облегченный гусеничный бульдозер типа Caterpillar D6. Для транспортирования техногенного сырья к месту переработки рекомендуется самосвал типа Shacman 366, что обусловлено способностью обеспечить требуемую производительность с возможностью работы в городских условиях, в первую очередь, для движения по существующим автомобильным дорогам. Ширина проезжей части рассчитывается по нижеприведённой формуле:

$$Пп = 2 \cdot (a + y) + x, \quad (4.1)$$

где a – ширина автосамосвала; y – ширина предохранительной полосы между автомобилем и краем проезжей части; x – безопасный зазор между встречными машинами.

$$\text{Так, } Пп = 2 (2,3 + 0,5) + 1,0 = 6,6 \text{ м.}$$

В соответствии со сводом правил по промышленному транспорту значение ширины проезжей части принято 7,5 м. Высота предохранительного вала принимается не менее 0,5 диаметра колеса автосамосвала максимальной грузоподъемности. Диаметр колеса автосамосвала Shacman 366 составляет 1,07 м. Таким образом, высота предохранительного вала составляет 0,7 м, ширина вала – 2 м. С учётом ширины призмы возможного обрушения рекомендуемая ширина транспортной бермы – 8 м. После отработки всего объёма складированного техногенного сырья предусматривается организация рельефа в соответствии с выбранным направлением рекультивации.

4. 4. Оценка экономической эффективности разработки Сибайского хвостохранилища совместно с природным месторождением

В основу оценки эффективности разработки старогоднего хвостохранилища Сибайской обогатительной фабрики заложены технико-технологические решения, рассмотренные в главе 4, а также параметры работы Сибайского карьера.

При определении экономической эффективности разработки старогоднего техногенного образования все расчеты осуществлялись в рублях РФ в ценах по состоянию на 4-й квартал 2023 г. В качестве прогнозного курса доллара США к рублю РФ для расчетов был использован курс 91,23 руб./долл. США. При определении стоимости готовой продукции была использована цена на золото 2000 долл. США за 1 тройскую унцию золота (31,1035 г.) или 64308 долл. США за 1 кг, что соответствует сложившемуся среднему значению цены на Лондонской бирже цветных металлов. Прогнозный уровень цен на серебро взят в расчете 25,53 долл. США за 1 тройскую унцию металла или 820,9 долл. США за 1 кг. Для определения стоимости меди была использована цена 8456 долл. США на 1 т.

Согласно моделированию старогоднего техногенного образования объём складированных отходов составил 3 200 000 м³. С учётом средней плотности материала 1,9 т/м³ масса перерабатываемого материала составила 6 080 000 т. Объём приповерхностного слоя, представленного ярозитовой коркой, мощностью до 1 м, подлежит разрушению и временному складированию и составляет в естественном состоянии 137,1 тыс. м³, в разрыхлённом виде при коэффициенте разрыхления 1,3 – 178,23 тыс. м³.

Расчёт необходимого количества оборудования для разрушения и выемки ярозитовой корки выполнен в соответствии с утверждёнными методиками и рекомендациями, с учётом круглогодичной работы в 2 смены по 8 часов.

Основную массу хвостохранилища принято разрабатывать послойно, согласно описанным ранее схемам (рисунок 4.14-4.15), поэтому мощность каждого выемочного слоя с учетом особенностей его интенсификации не должна превышать 1,5 м. Таким образом, общий объём одного выемочного слоя составляет

– 457 143 м³, количество таких слоев составляет 7 шт, поскольку средняя мощность складирования составляет – 11,5 м. С учетом особенностей интенсификации окисления в подготавливаемых слоях, а также деления основного отсека на два участка время, затрачиваемое на полное извлечение одного слоя, составляет 1 год при непрерывной работе технологического оборудования.

Сменная производительность бульдозера определяется по формуле:

$$P_{\text{пл}} = \frac{3600 * T_{\text{см}} * L * (1 * \sin \alpha -) * K_{\text{в}}}{n \left(\frac{L}{v} + T_{\text{р}} \right)}, \text{ м}^3 \quad (4.1)$$

где L – длина планируемого участка, м; α – угол установки отвала бульдозера, град; C – ширина перекрытия смежных проходов; $K_{\text{в}}$ – коэффициент использования бульдозера во времени; n – число проходов бульдозера по одному месту; $T_{\text{см}}$ – время смены, ч; $T_{\text{р}}$ – время разворота, с; v – средняя скорость движения бульдозера, м/с.

Таким образом, сменная производительность бульдозера составила:

$$P_{\text{пл}} = \frac{3600 * 8 * 400 * (1 * 0,8192 - 0,8) * 0,8}{2 \left(\frac{400}{1,5} + 10 \right)} = \frac{176947,2}{553,33} = 319,79 \text{ м}^3 \quad (4.2)$$

Для разрушения ярозитовой корки необходимо применение одного, а для выемки техногенного сырья двух облегченных гусеничных бульдозеров типа Caterpillar D6.

Сменная производительность экскаватора определяется по формуле:

$$P_{\text{э}} = 60 * T_{\text{см}} * g * k_{\text{н}} * k_{\text{в}} * \frac{n}{k_{\text{р}}}, \text{ м}^3 \quad (4.3)$$

где $T_{\text{см}}$ – время смены, ч; g – геометрическая вместимость ковша, м³; $k_{\text{н}}$ – коэффициент наполнения 0,8-1,5 в зависимости от вида грунта, влажности, рабочего оборудования; $k_{\text{р}}$ – коэффициент разрыхления 1,1-1,3; $k_{\text{в}}$ – коэффициент использования рабочего времени 0,75-0,85; n - число циклов в минуту в конкретных условиях забоя.

Таким образом, сменная производительность экскаватора составила:

$$P_{\text{э}} = 60 * 8 * 6,5 * 0,9 * 0,8 * \frac{0,3}{1,9} = 355 \text{ м}^3 \quad (4.4)$$

Таким образом, для разработки техногенного образования необходимо 2 экскаватора типа Caterpillar 395.

Суточная производительность автосамосвала Shacman 366 составляет 341 т, поэтому для транспортирования техногенного сырья нужно 6 автосамосвалов.

С учетом рекомендуемого способа разработки и объемов техногенного сырья, а также режима горных работ Сибайского месторождения медно-колчеданных руд описан режим горных работ для его совместной разработки со старогодним хранилищем отходов Сибайской обогатительной фабрики (рисунок 4.16). Поскольку хвосты обогащения предполагалось перерабатывать на Сибайской обогатительной фабрике совместно с рудами природного месторождения, при расчетах учитывалась ее годовая производительность, равная 1 500 тыс. тонн. Кроме того, с учетом необходимости интенсификации, мощности хвостохранилища и объемов, срок отработки техногенного образования будет равен 7 лет.

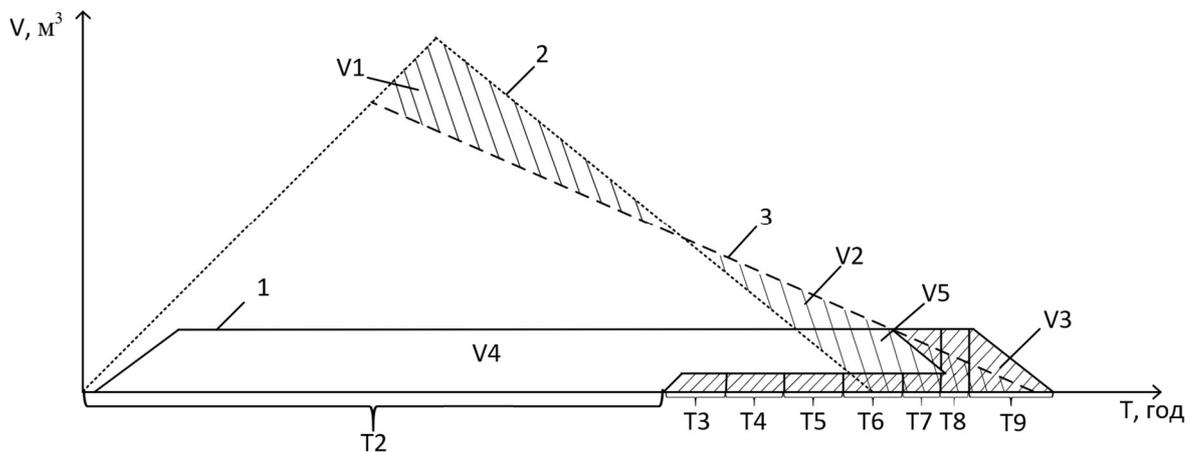


Рисунок 4. 16. График режима горных работ, предусматривающего совокупное использование природных и техногенных минеральных ресурсов за счет освоения Сибайского месторождения и разработки старогоднего хранилища отходов переработки медно-колчеданных руд Сибайской обогатительной фабрики

Сравнительная оценка экономической эффективности вариантов режимов горных работ проводилась по величине приведенных (с учетом фактора времени) затрат, по вскрышным работам, приходящихся на 1 т добываемой руды [69, 68].

Результаты расчетов основных технико-экономических показателей для базового режима развития горных работ Сибайского карьера и предлагаемого

режима развития горных работ с вовлечением техногенного сырья, выполненные по указанным выше формулам, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Техничко-экономические показатели по вариантам режимов горных работ

Показатели	Вариант режима развития горных работ Сибайского карьера	Вариант предложенного режима развития горных
Объем вскрышных работ за весь период отработки, тыс. м ³	270 000	270 000
Объем добытой руды, тыс. т	90 000	90 000
Объем добытого техногенного сырья, тыс. т	-	6 080
Срок освоения месторождения, лет	60	61,5

Техничко-экономические показатели, представленные в таблице 4.3, а также анализ результатов расчетов в целом, свидетельствуют о том, что при выборе режима развития горных работ, предусматривающем совокупное использование природных и техногенных минеральных ресурсов за счет освоения Сибайского месторождения и разработки старогоднего хранилища отходов переработки медно-колчеданных руд Сибайской обогатительной фабрики, будет обеспечено увеличение срока освоения природного месторождения на 1,5 года за счет получения дополнительного финансового потока от эксплуатации техногенного сырья.

Выводы по 4 главе

1. Установлено, что содержания ценных компонентов в окисленном слое ниже, чем в не окисленном, поэтому первоочередное снятие техногенного сырья из зоны гипергенеза необходимо не только ввиду преобладания растворимых минеральных форм, но и в связи с необходимостью подбора иной технологической схемы либо снятием окисленного слоя в качестве вскрыши.

2. Согласно моделированию, объём складированных отходов составил 3 200 000 м³. С учётом средней плотности материала 1,9 т/м³ масса перерабатываемого материала составила 6 080 000 т. Объём приповерхностного слоя, представленного ярозитовой коркой, мощностью до 1 м, подлежит разрушению и временному складированию и составляет в естественном состоянии 137,1 тыс. м³. Мощность каждого выемочного слоя с учетом особенностей его интенсификации не должна превышать 1,5 м. Таким образом, общий объём одного выемочного слоя составляет – 457 143 м³, количество таких слоев составляет 7 шт, поскольку средняя мощность складирования составляет – 11,5 м.

3. 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.

4. Анализ результатов расчетов свидетельствуют о том, что при выборе режима развития горных работ, предусматривающем совокупное использование природных и техногенных минеральных ресурсов за счет освоения Сибайского месторождения и разработки старогоднего хранилища отходов переработки медно-колчеданных руд Сибайской обогатительной фабрики, будет обеспечено увеличение срока освоения природного месторождения на 1,5 года за счет получения дополнительного финансового потока от эксплуатации техногенного сырья.

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 *Stenotropomonas* (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.

Список литературы

1. Bogdanova T.I., Tsaplina I.A., Kondrat'eva T.F., Duda, V.I., Suzina, N.E., Melamud, V.S., Tourova, T.P., Karavaiko, G.I. *Sulfobacillus thermotolerans* sp. nov., a thermotolerant, chemolithotrophic bacterium. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* – 2006. 56. – pp. 1039–1042.
2. Clemente J.S., Huntsman P. Potential climate change effects on the geochemical stability of waste and mobility of elements in receiving environments for Canadian metal mines south of 60°N. *Environmental Reviews.* – 2019. – pp. 1–41.
3. Deditius A.P., Utsunomiya S., Reich M., Kesler S.E., Ewing R.C., Hough R., Walsh J. Trace metal nanoparticles in pyrite. *Ore Geol.* – 2011. Rev. 42, – pp. 32–46.
4. Dino Quispe, Rafael Pérez-López, Patricia Acero, Carlos Ayora, José Miguel Nieto. The role of mineralogy on element mobility in two sulfide mine tailings from the Iberian Pyrite Belt (SW Spain) // *Chemical Geology*, Volume 345, 8 May 2013, – pp. 119–129.
5. Donati E.R., Sand W. *Microbial Processing of Metal Sulphides*. Springer. – 2007.
6. Dopson M., Lindstrom E.B. Potential role of *Thiobacillus caldus* in arsenopyrite bioleaching. *Appl. Environ. Microbiol.* – 1999. 65, – pp. 36–40.
7. Dunkan D.W., e.a. Biological leaching of mill products- *Trans Canads. Int. Mining and Metallurgy.* –1966. № 329. V 69.
8. Eric D. van Hullebusch, Yarlaga V. Nancharaiyah. Biotechnology in the management and resource recovery from metal bearing solid wastes: Recent advances // *Journal of Environmental Management.* – 2018. – Vol. 211. – pp. 138–153.
9. Figueiredo J., Cristina Vila M., Góis J. Bi-level depth assessment of an abandoned tailings dam aiming its reprocessing for recovery of valuable metals // *Minerals Engineering.* – 2019. – Vol. 133. – pp. 1–9.
10. Hakkou, R., Benzaazoua, M., Bussière, B., 2008. Acid mine drainage at the abandoned Kettara mine (Morocco): 1. Environmental characterization. *Mine Water Environ.* 27 (3), – pp. 145–159.

11. Hayes S.M., Root R. A. Surficial weathering of iron sulfide mine tailings under semi-arid climate // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. –2014. Vol. 141, – pp. 240–257.
12. Holanda, R.; Hedrich, S.; Nancucheo, I.; Oliveira, G.; Grail, B.M.; Johnson, D.B. Isolation and characterisation of mineral-oxidising "Acidibacillus" spp. from mine sites and geothermal environments in different global locations. *Res. Microbiol.* 2016, 167. – pp. 613–623.
13. Johnson, A.N., Bergman, C.M., Kreitman, M., Newfeld, S.J. Embryonic enhancers in the dpp disk region regulate a second round of Dpp signaling from the dorsal ectoderm to the mesoderm that represses Zfh-1 expression in a subset of pericardial cells. *Dev. Biol.* – 2003. 262(1). – pp. 137–151.
14. Johnson, D.B., Hallberg, K.B. The microbiology of acid mine waters. *Res. Microbiol.* – 2003. 154. – pp. 466–473.
15. Johnson, D.B.; Holmes, D.S.; Vergara, E.; Holanda, R.; Pakostova, E. Sulfoacidibacillus ferrooxidans, gen. nov., sp. nov., Sulfoacidibacillus thermotolerans, gen. nov., sp. nov., and Ferroacidibacillus organovorans, gen. nov., sp. nov.: Extremely acidophilic chemolitho-heterotrophic Firmicutes. *Res. Microbiol.* – 2023, 174, 104008.
16. Khaing S.Y., Sugai Y., Sasaki K. Gold dissolution from ore with iodide-oxidising bacteria *Sci. Rep.*, 9 (2019), p. 11.
17. Lindsay, M.B.J., Moncur, M.C., Bain, J.G., Jambor, J.L., Ptacek, C.J. & Blowes, D.W. (2015). Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Applied Geochemistry*. 57. – pp. 157–177.
18. McGregor, R., Blowes, D. The physical, chemical and mineralogical properties of three cemented layers within sulfide-bearing mine tailings. *J. Geochem. Explor.* – 2002. 76 (3). – pp. 195–207.
19. Meima, J.A., Regenspurg, S., Kassahun, A., Rammlmair, D. Geochemical modelling of hardpan formation in an iron slag dump. *Miner. Eng.* 2007. – 20 (1). – pp. 16–25.

20. Mendez I, Viñuela A, Astradsson A, Mukhida K, Hallett P, Robertson H, Tierney T, Holness R, Dagher A, Trojanowski JQ, Isacson O. Dopamine neurons implanted into people with Parkinson's disease survive without pathology for 14 years. *Nature Medicine*. – 2008. 14(5). – pp. 507–9.
21. Ñancucheo I., Oliveira R., Dall'Agnol H., Johnson D.B., Grail B., Holanda, R. et al. Draft genome sequence of a novel acidophilic iron-oxidizing Firmicutes species, “*Acidibacillus ferrooxidans*” (SLC66^T). *Genome Announc.* – 2016. – 4. – pp. 53–54.
22. Nordstrom D.K., Southamю G. Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation // *Geomicrobiology: Interactions between Microbes and Minerals*. – 2019. – pp. 361–390.
23. Nordstrom D.K., Kittrick, J.A., Fanning, D.S., Hossner, L.R. Aqueous Pyrite Oxidation and the Consequent Formation of Secondary Iron Minerals // *Acid Sulfate Weathering, Wisconsin*. – 1982. – pp. 37–56.
24. Norris F.H., Stevens S.P. Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness // *American Journal of Community Psychology*. – 2008. 41. – pp. 127–150.
25. Paktunc, D. Mobilization of arsenic from mine tailings through reductive dissolution of goethite influenced by organic cover. *Applied Geochemistry*. – 2013. 36. – pp. 49–56.
26. Panyushkina A.E., Babenko V.V., Nikitina A.S., Selezneva O.V., Tsaplina I.A., Letarova M.A., Kostryukova E.S., Letarov A.V. *Sulfobacillus thermotolerans*: New insights into resistance and metabolic capacities of acidophilic chemo-lithotrophs. *Sci. Rep.* – 2019. 9 (1):15069.
27. Rawlings D.E. Microbially assisted dissolution of minerals and its use in the mining industry. *Pure Appl. Chem.* – 2004. Vol. 76(4). – pp. 847-859.
28. Reith, F., Etschmann, B., Grosse, C., Moors, H., Benotmane, M. A., Monsieurs, P. et al. Mechanisms of gold biomineralization in the bacterium *Cupriavidus metallidurans*. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* – 2009. 106, 17757–17762.

29. Review of Waste Policy and Legislation accessed 6 March 2014. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ec.europa.eu/environment/waste/target_review.htm. Дата обращения: 11.04.2019.
30. Sanyal S.K., Rea M.A., Shuster J., Reith F. Cultured Bacterial Communities from Australian and African Gold Grains // Goldschmidt Abstracts. – 2017.
31. Savage K.S., Tingle T.N., O'Day P.A. Arsenic speciation in pyrite and secondary weathering phases, Mother Lode Gold District, Tuolumne County, California // Applied Geochemistry. – 2000. 15(8). – pp. 1219–1244.
32. Schippers A., Breuker A., Blazejak A., Bosecker K., Kock D., Wright T.L. The biogeochemistry and microbiology of sulfidic mine waste and bioleaching dumps and heaps, and novel Fe(II)-oxidizing bacteria // Hydrometallurgy. – 2010. 104, – pp. 342–350.
33. Wang H., Dowd P.A., Xu C. A reaction rate model for pyrite oxidation considering the influence of water content and temperature. Minerals Engineering. – 2019. 134. – pp. 345–355.
34. Wiesemann N., Bütof L., Herzberg M. et al. Synergistic toxicity of copper and gold compounds in *Cupriavidus metallidurans* Appl. Environ. Microbiol. – 2017. 83(23).
35. Zhang Xiaolong, Zhang Shiyu, Liu Hui, Zhao Yingliang. Disposal of mine tailings via geopolymerization // Journal of Cleaner Production. – 2020. Vol. 284(15).
36. Архипов, А.В. Техногенные месторождения. Разработка и формирование: монография / А. В. Архипов, С. П. Решетняк; под науч. ред. акад. Н. Н. Мельникова. – Апатиты: КНЦ РАН, 2017. – 175 с.
37. Банчи Г. А. Исследования по извлечению меди из руды и концентратов биологическими способами. VIII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых. Т. 2. Докл. Е-6. Ин-т Механообр.Л. –1969.
38. Белогуб Е. В., Щербакова Е. П., Никандрова Н. К. Сульфаты Урала: распространенность, кристаллохимия, генезис. М: Наука, 2007. 159 с.

39. Беневольский Б.И. Два аспекта проблемы утилизации горнопромышленных отходов / Б. И. Беневольский и др. // Минеральные ресурсы России: экономика и управление. 2011. № 1. С. 37–42.

40. Биишев Л.З. Разработка эффективной технологии открытой отработки пиритсодержащих хвостохранилищ // Дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2000. – 174 с.

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

42. Гавришев С.Е., Корнилов С.Н., Пыталев И.А., Гапонова И.В. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 46–51.

43. Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Кириченко Ю.В. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях: монография. – М.: Горная книга, 2012. – 336 с.

44. Гальперин А.М., Ферстер В., Шеф Х.-Ю. Техногенные массивы и охрана природных ресурсов. Том 1. Насыпные и намывные массивы. Учебное пособие для вузов. – М.: Горная книга, 2006. – 391 с.

45. Гончарова Л.И., Ларичкин Ф.Д., Переин В.Н. Потенциал техногенного минерального сырья в России и проблемы его рационального использования // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2015. – № 5 (41). – С. 104–117.

46. Горбатова Е.А. Минералого-технологическая оценка отходов обогащения колчеданных руд Южного Урала // Дис. ... докт. техн. наук. – Москва, 2013. – 210 с.

47. Горлова О.Е., Шадрунова И.В., Жилина В.А. Повышение полноты извлечения золота из лежалых отходов переработки золотосодержащих руд // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2020.

48. ГОСТ 12248.2-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия. – М.: Стандартиформ, 2020. – 8 с.
49. ГОСТ 12536–2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Стандартиформ. – 2019. – 20 с.
50. ГОСТ 25100–2020 Грунты. Классификация. – М.: Стандартиформ. – 2020. – 44 с.
51. ГОСТ 5180–2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартиформ. – 2019. – 20 с.
52. Денисов М.Н., Шуленина З.М. Использование забалансовых руд цветных металлов и их техногенных отходов с учетом охраны окружающей среды / Разведка и охрана недр. – 1989. – № 2. – С. 44-47.
53. Емельяненко Е.А., Ангелов В.А., Емельяненко М.М. Разработка способа формирования техногенного образования из хвостов обогащения медно-колчеданных руд с заданными структурными характеристиками // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2012. – № 1. – С. 13-16.
54. Инвестиционный паспорт городского округа город Сибай Республики Башкортостан, 2016. – 59 с.
55. Исследование режимов и параметров кучного выщелачивания хвостов Учалинской обогатительной фабрики: Отчет по НИР // ООО «Маггеопроект». – Магнитогорск, 2007. – 90 с.
56. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Абдрахманов И.А. Перспективы повышения полноты и комплексности освоения месторождений // Недропользование-21 В. – 2009. – № 3. – С.28-32.
57. Каплунов Д.Р., Рыльникова М. В., Радченко Д.Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений // Горный журнал. – 2013. – № 12. – С. 29-33.

58. 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.

59. Кириченко Ю.В., Зайцев М.П., Кравченко А.Н. Инженерно-геологические особенности формирования хвостохранилищ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – № 7. – С. 116-126.

60. Комаров М.А. Горнопромышленные отходы – дополнительный источник минерального сырья / М. А. Комаров и др. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2007. – № 4. – С. 3–9.

61. Кондрашина А.М., Богомолов Н.В. Влияние бактерий на выщелачивание меди из хвостов Балхашского хвостохранилища. Труды Казмеханообр. Ала-Ата. – 1970. Сб.4.

62. Кузьмин С.Л. и др. Способы регулирования режима горных работ при открытой разработке месторождений полезных ископаемых / Кузьмин С.Л., Фионин Е.А., Моисеев В.А. – Рудный. – 2018. – 80 с.

63. Лазарев А.И., Харламов И.П., Яковлев П.Я., Яковлева Е.Ф. Справочник химика-аналитика. М.: Металлургия, 1976. – 184 с.

64. Макаров А.Б. Главные типы техногенно-минеральных месторождений Урала: условия формирования, особенности состава и направления использования // Известия Уральского государственного горного университета, 2007. – С. 61-68.

65. Макаров А.Б., Хасанова Г.Г., Талалай А.Г. Техногенные месторождения: особенности исследований // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – №3. – С. 58-62.

66. Макаров Д.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование химических превращений сульфидов в техногенных отходах и изучение влияния

продуктов окисления минералов на их технологические свойства и окружающую среду // Дис. ... докт. техн. наук. – Москва, 2006.

67. Матюшенко Г.А. «Разработка технологии формирования и комплексного освоения техногенных месторождений на основе отходов переработки медно-колчеданных руд // Дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2006. – 168 с.

68. Мельников Н.В. Теория и практика открытых горных разработок // М.: Недра. – 1975.

69. Мельников Н.В., Фадеев Б.В. К решению научных и технических проблем глубоких карьеров // В кн.: Глубокие карьеры. – Киев: Наукова думка. – 1970. – 453 с.

70. Месяц С. П., Петров А. А. Информационное обеспечение поддержки принятия решений при разработке и оптимизации технологий сохранения и освоения складированного минерального сырья техногенных месторождений // Горн. информ.-аналит. бюлл. – 2012. – № 5. – С. 181–187.

71. Механика грунтов, основания и фундаменты: учеб. Пособие для строит. спец. вузов / под ред. С.Б. Ухова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 566 с.

72. Ожогина Е.Г., Шадрунова И.В., Чекушина Т.В. Роль минералогических исследований в решении экологических проблем горнопромышленных районов // Горный журнал, 2017. – С. 105–110.

73. Отчет о НИР по материалам выполнения исследований в рамках Программы Президиума РАН №39 «Фундаментальные основы и энергоэффективные, ресурсосберегающие, инновационные технологии переработки минерального сырья, утилизации промышленных и бытовых отходов» на 2018–2020 гг. / рук. М.В. Ральникова. – Москва: ИПКОН РАН, 2018. – 73 с.

74. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. – М.: Недра, 1972.

75. Перельман А.И. Геохимия. – М.: Высшая школа, 1989. – 528 с.

76. Першин Г.Д., Пыталев И.А., Швабенланд Е.Е., Якшина В.В. Согласование производительности карьера и фабрики при формировании техногенных емкостей для размещения в них хвостов обогащения руд // Маркшейдерия и недропользование. – 2022. – С. 24-31.

77. Петрова А. В., Дагкесаманская А., Сокол С., Журавлева Г.А. Анализ экспрессии генов в штамме, мутантном по жизненно важному гену *sur45*, в условиях голодания по азоту // Вестник СПбГУ. Сер. 3, 2009, вып. 4.

78. Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. Под редакцией академика РАН К.Н. Трубецкого // Составители: канд. техн. наук А.В. Шляпин, канд. техн. наук А.Г. Красавин, канд. техн. наук Н.А. Милетенко – М.: ИПКОН РАН. – 2022. – 404 с.

79. Пыталев И.А. Обоснование параметров открытой геотехнологии комплексного освоения крутопадающих месторождений для устойчивого развития горнотехнических систем // Дис. ... докт. техн. наук. – Магнитогорск, 2019.

80. 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. – С. 303-315.

81. 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.

82. Радченко, Д.Н. Разработка комбинированной геотехнологии освоения месторождений медноколчеданных руд с комплексным использованием отходов их переработки // Дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 2004.

83. Рациональное использование вторичных минеральных ресурсов в условиях экологизации и внедрения наилучших доступных технологий:

монография / коллектив авторов; под науч. ред. д. э. н., проф. Ф. Д. Ларичкина, д. э. н., проф. В. А. Кныша. – Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2019. – 252 с.

84. Ржевский В.В. Режим горных работ при открытой добыче угля и руды / Углетехиздат. – М., 1957. – 199 с.

85. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Учебник для вузов. В 2-х частях. Часть 2. Технология и комплексная механизация. – М.: Недра, 1985. – 549 с.

86. 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 ТулГУ. Науки о Земле. – 2020. – № 3. – С. 5–17.

87. 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.

88. 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 ТулГУ. Науки о Земле. – 2023. – №2. – С. 283–299.

89. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Цупкина М.В., Сафонов В.А. Исследование экологического воздействия Новотроицкого хвостохранилища на растительный покров и живые организмы // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2020. – №1. – С. 108–120.

90. 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.

91. Селезнёв С. Г., Степанов Н. А. Отвалы Аллареченского сульфидного медно-никелевого месторождения как новый геолого-промышленный тип техногенных месторождений // Изв. вузов. Горн. журн. – 2011. – № 5. – С. 32–40.
92. Смирнов С.С. Зона окисления сульфидных месторождений // Главная редакция геологоразведочной и геодезической литературы. ОНТИ НКТП СССР, 1936. – 292 с.
93. Терентьева И.В. Обоснование параметров комплексного освоения запасов законсервированного Жезказганского хвостохранилища // Дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. 2016. – 176 с.
94. Техногенное сырье — важнейший резерв развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rareearth.ru/ru/pub/20161025/02891.html>. Дата обращения 11.06.2022.
95. Технология обогащения медных и медно-цинковых руд Урала / под общ. ред. акад. РАН В.А. Чантурия и докт. техн. Наук И.В. Шадруновой; Ин-т проблем комплекс. освоения недр РАН. – М.: Наука, 2016. – 387 с.
96. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Оценка ресурсного потенциала природных и техногенных месторождений медно-колчеданных руд Урала в связи с перспективами комплексного извлечения цветных, редких и благородных металлов / В кн. Геотехнологическая оценка минерально-сырьевой базы России. Под ред. академика К.Н. Трубецкого, академика В.А. Чантурия, чл.-корр. РАН Д.Р. Каплунова. – М.: ИПКОН РАН, 2008. – С. 86-89.
97. Трубецкой К.Н., Рогов Е.И., Уманец В.Н., Никитин М.Б. Обоснование объемов и сроков освоения техногенных месторождений // Горный журнал. – 1988. – №2. – С. 9–12.
98. Трубецкой К.Н., Уманец В.Н. Комплексное освоение техногенных месторождений // Горный журнал. – 1992. – № 1. – С. 12–16.

99. Трубецкой К.Н., Уманец В.Н., Никитин М.Б., Толумбаев А.З. Пути решения проблем ресурсосбережения, охраны недр и окружающей природной среды // Горный журнал. – 1989. – №10. – С. 56-57.

100. Федотов К.В., Артемова А.С. Комплексная переработка лежалых хвостов Джидинского ВМК // В сборнике: Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. – 2005. – С. 39-41.

101. 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.

102. 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.

103. 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. – С. 208–209.

104. 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.

105. 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.

106. 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.

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

108. Чернегов Ю. А. Методы изучения и освоения техногенных месторождений // Горн. информ.-аналит. бюлл. – 2009. – № 3. С. 371–375.

109. Шадрунова И.В., Провалов С.А., Горлова О.Е. Адаптация методов обогащения для доизвлечения золота из лежалых хвостов золотоизвлекательных фабрик. – М.: ИПКОН РАН, 2009. – 206 с.

110. Юн А.Б. Разработка и обоснование параметров горнотехнической системы комплексного освоения Жезказганского месторождения в условиях Восполнения выбывающих мощностей рудников // Дис. ... докт. техн. наук. – Москва, 2016. 333 с.

111. Якубенко Л. В., Гулямов Б. С. Систематизация технологических схем открытой разработки техногенных месторождений // Горн. информ.-аналит. бюлл. – 2008. – № 5. – С. 254–261.

112. Яхонтова Л.К., Грудев А.П. Минералогия окисленных руд: Справочное пособие / Л.К. Яхонтова, А.П. Грудев // М.: Недра, 1987. – 196 с.

113. Яхонтова Л.К., Нестерович Л.Г. Зона гипергенезиса рудных месторождений как биокосная система/ Л.К. Яхонтова, Л.Г. Нестерович // М.: Изд-во МГУ, 1983. – 58с.