

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫЙ ИНСТИТУТ

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

МОНОГРАФИЯ

Под общей редакцией Е.А. Хайрулиной



Пермь 2022

УДК 502.17: 622.271.45

ББК 20.18

Э40

Э40 Экологическая безопасность освоения месторождений полезных ископаемых : монография / под общ. ред. Е.А. Хайрулиной ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2022. – 175 с.

ISBN 978-5-7944-3929-8

Представлены результаты исследований, выполненных научными сотрудниками Естественнонаучного института за последние 10 лет, в том числе при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Биогеохимические и геохимические исследования ландшафтов в условиях интенсивного техногенного воздействия, поиск новых методов мониторинга и прогноза состояния окружающей среды».

Предназначено для научных сотрудников, преподавателей, студентов и аспирантов, работников, занятых в сфере экологии.

УДК 502.17: 622.271.45

ББК 20.18

Печатается по решению ученого совета Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета

Коллектив авторов

Глава 1: Е. А. Хайрулина, Е. А. Меньшикова, П. А. Белкин, М. А. Бакланов, В. Е. Ефимик, Е. Г. Ефимик, Н. В. Митракова, Е. Е. Малышкина, А. А. Перевощикова

Глава 2 Е. А. Меньшикова, С. М. Блинов, Т. И. Караваева, В. П. Тихонов

Глава 3 Е. А. Хайрулина, Н. В. Митракова, А. А. Перевощикова

Глава 4 О. С. Кудряшова, Н. С. Кистанова, А. М. Елохов

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор, научный руководитель Уральского государственного научно-исследовательского института региональных экологических проблем **Б. Е. Шенфельд**;

д-р хим. наук, ст. науч. сотр., профессор кафедры экологии Пермского государственного аграрно-технологического университета им. акад. Д. Н. Прянишникова **А. Е. Леснов**

ISBN 978-5-7944-3929-8

© Коллектив авторов, 2022

© ПГНИУ, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Экологический мониторинг и оценка состояния окружающей среды горнодобывающих территорий.	6
1.1. Система мониторинга состояния окружающей среды	6
1.2. Мониторинг биоразнообразия в районах разработки месторождений	23
Список литературы к главе 1	45
Глава 2. Вторичное использование отходов и технологии очистки твердых и жидких отходов.	50
2.1. Вторичное использование отходов	51
2.2. Технологии очистки сточных вод при разработке россыпных месторождений	73
Список литературы к главе 2	101
Глава 3. Восстановление нарушенных земель.	112
3.1. Объекты и методы	114
3.2. Результаты исследования	115
Список литературы к главе 3	124
Глава 4. Физико-химические основы формирования искусственных геохимических барьеров на основе солей кальция.	128
4.1. Физико-химический анализ систем с целью оптимизации состава растворов для тампонирования горных пород	134
4.2. Обоснование и подбор состава ингибитора кристаллизации водонерастворимых солей кальция из водных растворов	148
4.3. Результаты полевых испытаний и корректировка параметров процесса создания искусственного геохимического барьера	158
Список литературы к главе 4	170

ВВЕДЕНИЕ

В монографии представлены результаты исследований, выполненных научными сотрудниками Естественнонаучного института за последние 10 лет, в том числе при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Биогеохимические и геохимические исследования ландшафтов в условиях интенсивного техногенного воздействия, поиск новых методов мониторинга и прогноза состояния окружающей среды» (№ АААА-А20-120081990070-9).

Разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается комплексным воздействием на окружающую среду. Интенсивность и пролонгированность негативных процессов, связанных с горнодобывающей деятельностью, не сопоставимы с данными параметрами процессов других видов производств.

На примере Верхнекамского месторождения калийных солей изучены механизмы трансформации ландшафтов с использованием геохимических, минералогических и биогеохимических методов, что позволило выполнить анализ трансформации многокомпонентной системы «дренажные воды – подземные воды – породы – почвы – органическое вещество – биотический компонент» и получить новые знания о формирующихся природно-техногенных системах. На основе этих знаний предложена система экологического мониторинга и оценка состояния окружающей среды.

Разработан и осуществлен способ рекультивации засоленных земель, включающий технический и биологический этапы. На основе проведенных работ построена структурная модель трансформации почвенных характеристик при поступлении Na–Cl техногенных потоков.

Для решения экологических проблем и повышения безопасности освоения месторождений калийных солей предложены способы вторичного использования отходов освоения месторождений полезных ископаемых, включая технологии очистки сточных вод; разработаны физико-химические и геохимические основы методов создания искусственных барьеров путем кристаллизации водонерастворимых солей кальция.

ГЛАВА 1. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

Эффективное и безопасное освоение минеральных ресурсов является актуальной задачей. Влияние техногенных факторов при освоении месторождений полезных ископаемых носит прогрессирующий характер и охватывает, наряду с геологической средой, такие компоненты окружающей среды, как атмосферный воздух, поверхностные воды, почвы, биоресурсы. Оценка техногенного влияния разработки месторождений невозможна без различных по масштабу целенаправленных наблюдений за компонентами окружающей среды, на основе результатов которых могут быть установлены тенденции их развития, разработаны способы управления ими. Главной задачей мониторинга является оценка текущего состояния окружающей среды на территории лицензионного участка и соответствия этого состояния требованиям нормативов, стандартов и условий лицензий на пользование недрами при разработке полезных ископаемых.

1.1. Система мониторинга состояния окружающей среды

Необходимость мониторинга экологического состояния окружающей среды определяется Федеральным законом Российской Федерации «Об охране окружающей среды» (2002). Вопросы мониторинга отдельных компонентов окружающей среды (в основном государственного) в той или иной мере отражены в различных нормативных документах: ФЗ РФ «Об охране атмосферного воздуха» (1999), Водный кодекс РФ (2006), Положение о ведении государственного мониторинга водных объектов (2007), ФЗ РФ «О недрах» (1992), Земельный кодекс РФ (2001), ФЗ РФ «О радиационной безопасности населения» (1996), Порядок осуществления государственного мониторинга земель, за исключением земель сельскохозяйственного назначения (Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 22 июля 2021 г. № П/0315), ФЗ «О животном мире» (1995), Порядок ведения государственного мониторинга и государственного кадастра объектов животного мира (Приказ Минприроды России от 30 июня 2021 года № 456), ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» (2004), «Положение о формировании планов проведения почвенных, геоботанических и других обследований земель сельскохозяйственного назначения, а также о проведении таких обследований» (2021), ГОСТ Р 56059–2014 «Производственный экологический мониторинг». Требования и подходы, изложенные в указанном перечне доку-

ментов, могут использоваться для мониторинга состояния окружающей среды при недропользовании.

Некоторые рекомендации по проведению экологического мониторинга приведены в СП 11-102-97, который является федеральным нормативным документом, прежде всего в сфере строительства. Он основан на принципе комплексной оценки воздействия сооружения на окружающую природную среду и воздействия среды на сооружение и условия проживания населения. Так, геоэкологическое опробование и оценка загрязнённости атмосферного воздуха, почв, грунтов, поверхностных и подземных вод – один из основных пунктов инженерно-экологических изысканий. Мониторинг состояния компонентов окружающей среды является завершающей частью инженерно-экологических изысканий и реализуется с целью текущего контроля экологической ситуации, эффективности предусмотренных проектами защитных и природоохранных мероприятий. Проектирование, организация и мониторинг требуют специальных методических проработок, финансирования и является обязательным при разработке как предпроектной, так и проектной документации.

Мониторинг компонентов окружающей среды при разработке месторождений полезных ископаемых регулируется Положением о порядке осуществления государственного мониторинга состояния недр РФ (2001). Государственный мониторинг состояния недр представляет собой систему регулярных наблюдений, сбора, накопления, обработки и анализа информации, оценки состояния геологической среды и прогноза ее изменений под влиянием естественных природных факторов, недропользования и других видов хозяйственной деятельности, являясь составной частью (подсистемой) комплексной системы мониторинга окружающей природной среды. Система государственного мониторинга состояния недр включает: мониторинг подземных вод; опасных экзогенных геологических процессов; опасных эндогенных геологических процессов; месторождений углеводородов; мониторинг месторождений твердых полезных ископаемых; участков недр, используемых для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых; участков недр, испытывающих воздействие хозяйственной деятельности, не связанной с недропользованием; геологической среды континентального шельфа.

Организацию работ по государственному мониторингу состояния недр проводит Министерство природных ресурсов Российской Федерации во взаимодействии с другими специально уполномоченными государственными органами в области охраны окружающей природной среды и природопользования. Государственный мониторинг состояния недр осуществляется на федеральном, региональном, территориальном (административно-территориальном) и объектном (локальном) уровнях. Ведение объектного (локального) мониторинга

состояния недр осуществляют недропользователи и иные субъекты хозяйственной деятельности, влияющие на состояние недр. Условия, объемы и виды мониторинга определяются в процессе получения участков недр в недропользование и указываются в лицензионном соглашении на пользование участком недр.

Принципы организации и ведения мониторинга месторождений твердых полезных ископаемых, его цели и задачи, состав информации содержатся в документе «Требования к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых» (2000). Требования предназначены для органов управления государственным фондом недр и должны использоваться при выдаче лицензий на пользование участками недр для добычи твердых полезных ископаемых и обеспечении ведения объектного уровня мониторинга на указанных месторождениях.

Для горнодобывающих предприятий мониторинг должен учитывать: особенности воздействия на окружающую среду планируемого или действующего предприятия, фоновое состояние окружающей среды на данной территории, иные имеющиеся техногенные источники, существующую систему мониторинга, компонентный состав загрязнителей, особенности природных условий как факторы распространения и аккумуляции загрязнителей [1].

Эксплуатация месторождений по-разному влияет на компоненты окружающей среды. Негативному воздействию подвержены атмосферный воздух, гидрологический и гидрохимический режимы водных объектов, естественный ландшафтный покров территории, а также биоресурсы. Специфика этого воздействия определяется видом месторождения и стадией его освоения (таблица 1.1).

С целью оценки степени негативного влияния на окружающую среду, предупреждения и ликвидации чрезвычайных экологических ситуаций необходимо применять комплексный подход к решению возникающих природоохранных задач [2–5].

Для Пермского края особого внимания в аспекте оценки влияния недропользования на состояние окружающей среды и реализации программ мониторинга заслуживает территория Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Месторождение уникально по своему строению, относится к крупнейшим в мире разрабатываемым месторождениям калийных солей. Соляная толща занимает площадь около 8,1 тыс. км² и прослеживается в меридиональном направлении на 205 км, в широтном – до 55 км. Калийные предприятия включают в свой состав как рудники, ведущие подземную добычу сильвинито-карналлитовых руд и каменной соли, так и обогатительные фабрики по их переработке.

Таблица 1.1 – Характер трансформации природной среды на месторождениях калийных солей на разных этапах разработки

Этапы разработки месторождения	Наиболее типичные загрязнители	Характер трансформации природной среды
Древняя добыча солей	Соли (NaCl), воды с минерализацией до 40 г/л	Засоление почв и поверхностных вод, появление солеросов, вырубка леса, карстовые процессы
Поисково-разведочные работы	Соли (NaCl), воды минерализацией до 300 г/л	Засоление подземных вод, почв и поверхностных вод
Шахтные работы	–	Проседание земной поверхности, заболачивание
Горно-обогатительные работы	Соли, технические воды с минерализацией 300 г/л, микроэлементы, соединения азота и другие органические соединения, в т.ч. искусственные	Засоление, сульфидогенез, осаждение минералов железа, смена видов растительности и гидробионтов, деформация пород и повышение уровня подземных вод

Анализ отечественного и зарубежного опыта показал, что существует огромное количество схожих экологических проблем при освоении соляных месторождений в мире. Среди них проблемы затопления прилегающих территорий и шахт, провалы земной поверхности, загрязнение окружающей среды, изменение гидродинамического режима поверхностных и подземных вод. Существует необходимость утилизации больших объемов промышленных отходов (проблемы расширения солеотвалов и шламохранилищ), модернизации технологии добычи солей, предотвращения экологических катастроф (создание дренажа, фильтрационных завес и экрана и др.), комплексной разработки системы мониторинга окружающей среды.

Таким образом, воздействие калийной промышленности на окружающую среду разнообразно и охватывает многие природные компоненты. В случае затопления шахт катастрофические последствия, сопровождающиеся просадками и провалами, распространяются на значительной территории [6–12]. Так, на Верхнекамском месторождении в 1986 г. на БКПРУ-3 произошел наиболее крупный провал – глубиной более 100 м, в 2007 г. – провал на БКПРУ-1, в 2014 г. – провал на СКРУ-2.

Калийное производство сопряжено с образованием большого количества отходов. К их числу относятся твердые галитовые отходы, глинисто-солевые шламы и избыточные рассолы, образующиеся как в технологическом процессе (оборотные рассолы), так и при взаимодействии атмосферных осадков с поверхностными накопителями отходов. В зависимости от минералогического и химического состава сырья, используемой технологии обогащения на 1 т

готовой продукции может образовываться от 0,99 до 4,97 т твердых и от 0,3 до 1,1 т жидких отходов производства [12].

Твердые солеотходы представляют собой сыпучую среду, содержащую 90 % и более галита, а также небольшое количество других солей и нерастворимого остатка. Основным способом утилизации твердых галитовых отходов во всем мире является складирование их в солеотвалах на поверхности земли. Суммарная площадь изъятия земель под солеотвалы на крупнейших мировых производствах превышает 5600 га. Часть солеотходов направляется на закладку подземных выработок, а также после растворения закачивается в глубокие горизонты. В районах, где добыча и производство калия осуществляются в непосредственной близости от морских бассейнов, применяется утилизация солеотходов в море.

Глинисто-соляная пульпа представляет суспензию с весовым соотношением жидкой фазы к твердой от 3:1 до 2:1. Жидкая среда содержит рассол, обогащенный главным образом NaCl, менее KCl, MgCl₂ и NaSO₄, твердая содержит 15–70 % нерастворимого остатка, остальное – мелкодисперсная масса NaCl и KCl [13]. Жидкие отходы калийного производства – глинисто-солевые шламы и избыточные рассолы – складировать в поверхностных шламохранилищах и рассолосборниках, используют при закладке отработанного пространства, а также осуществляют закачку в глубокие горизонты и сброс в морские бассейны.

Отходы представлены легкорастворимыми компонентами (хлоридами калия, натрия и магния) и содержат большое количество микроэлементов (стронций, марганец, никель, кобальт, хром, цинк и др.), а также реагентов, используемых для обогащения солей.

Водные мигранты формируют ореолы загрязнения поверхностных и подземных вод. На загрязненных почвах происходит замена растительных сообществ на более устойчивые к повышенному содержанию солей и микроэлементов, что приводит к трансформации зональных ландшафтов. Кроме этого, горнодобывающая деятельность сопровождается выбросами различных загрязнителей в атмосферный воздух. С извлечением пород на поверхность возможно поступление природных радионуклидов.

Ведение мониторинга на калийном месторождении подразумевает контроль состояния всех компонентов окружающей среды – атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, почв, растительного и животного мира, ландшафтов, радиационной обстановки. Достоверность результатов такого многокомпонентного мониторинга должна отвечать требованиям научно обоснованной системы наблюдательных пунктов и должна быть ориентирована

на перечень характерных для данного производства загрязнителей, уровни содержания которых не всегда нормативно урегулированы.

Проблема формирования сети экологического мониторинга и перечня определяемых показателей характерна для многих калийных производств. Так, в одном из старейших калийных регионов мира, в долине р. Везер (Германия), мониторинг состояния окружающей среды осуществляется с 1979 г. По данным мониторинга ассоциации WGGWeser (<http://www.fgg-weser.de>), сеть наблюдательных пунктов охватывает только поверхностные водные объекты долины р. Везер, которые находятся в районе воздействия деятельности калийных предприятий. Сравнение полученных результатов наблюдений проводится с нормативными и фоновыми значениями. На протяжении многолетнего периода исследований перечень определяемых компонентов менялся, но систематические исследования состояния окружающей среды в районе воздействия существующих и закрытых калийных предприятий в основном сводятся к изучению химических показателей аквальных экосистем (таблица 1.2).

Мониторинг включает также исследование биотических компонентов в речных экосистемах. Изучению подлежат ихтиофауна, макрозообентос, диатомовые водоросли, фитопланктон и др. [14, 15]. Одним из важнейших показателей является оценка биоразнообразия, появление пресноводных видов свидетельствует об улучшении экологической ситуации.

Как видно из таблицы 1.2, перечень определяемых компонентов, особенно в перечне микроэлементов, носит формальный характер и не отражает микроэлементную специфику калийного производства. Также отсутствуют суммарные показатели загрязнения или коэффициенты, отражающие трансформацию химического состава компонентов окружающей среды.

Изучение проблемы воздействия техногенного галогенеза на трансформацию природных геосистем в России и зарубежом показало, что анализ состояния окружающей среды производится на основании исследований одного или двух компонентов окружающей среды. Проблемы трансформации всего природного комплекса или геосистемы не рассматриваются.

Таблица 1.2 – Перечень показателей мониторинга состояния аквальных экосистем в долине р. Везер [14, 15]

Показатель	Ед. измерения	Показатель	Ед. измерения
Поверхностные воды			
рН	-	Na	мг/л
Температура	°С	Ca	мг/л
Содержание кислорода	мг/л	Mg	мг/л
Растворенное органическое в-во	мг/л	As	мкг/л
Хим. потребление кислорода	мг/л	Cd	мкг/л
Уд. электропроводность	мСм/м	Cr	мкг/л
PO ₄ ³⁺	мг/л	Cu	мкг/л
NH ₄ ⁻	мг/л	Fe	мкг/л
NO ₃ ⁻	мг/л	Ni	мкг/л
Cl ⁻	мг/л	Pb	мкг/л
SO ₄ ²⁻	мг/л	Zn	мкг/л
HCO ₃ ⁻	мг/л	Mn	мкг/л
K ⁺	мг/л		
Донные отложения			
Hg	мг/кг	Pb	мг/кг
Ni	мг/кг	Cd	мг/кг
Zn	мг/кг	Fe	мг/кг
Cu	мг/кг	Mn	мг/кг
Cr	мг/кг	As	мг/кг

Согласно документу [15], мониторинг состояния недр при недропользовании рекомендуется проводить в трех зонах, что обусловлено интенсивностью ведения горных работ и размещением предприятий технологического цикла [1]:

зона I – зона непосредственного ведения горных работ и размещения других технологических объектов, влияющих на изменение состояния недр, в пределах границ горного отвода;

зона II – зона существенного влияния разработки месторождения на различные компоненты геологической среды;

зона III – периферийная зона.

Анализ опыта разработки калийных месторождений в Канаде, Германии, Белоруссии и особенностей калийного производства позволяет заключить, что при создании системы мониторинга состояния окружающей среды по степени влияния также целесообразно выделять три зоны (рисунок 1.1). Такое зонирование поможет оптимизировать систему мониторинга на территории месторождения, включая определение плотности наблюдательной сети, перечня компонентов и др.

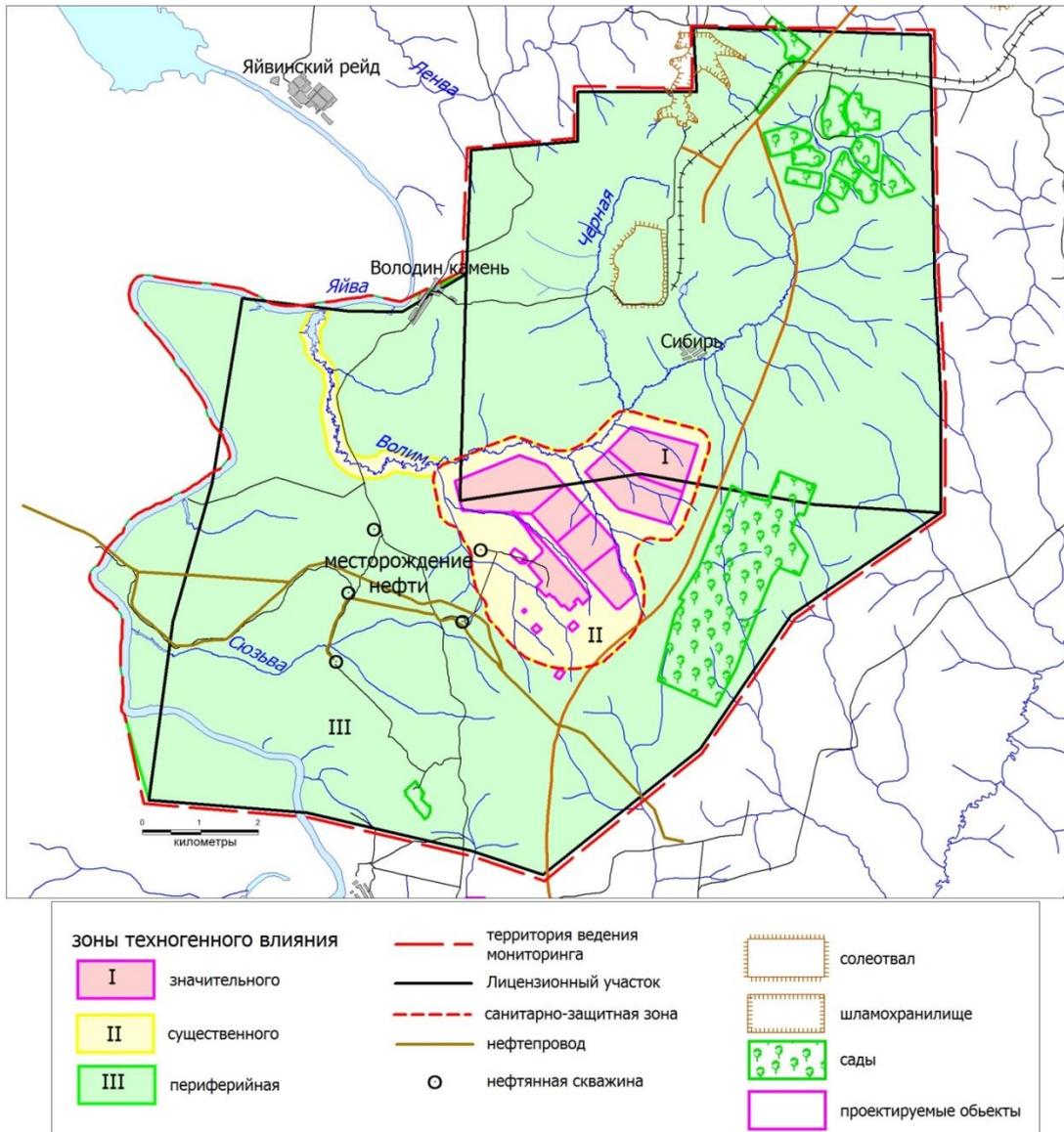


Рисунок 1.1 – Зонирование территории ведения мониторинга окружающей среды на лицензионном участке [1]

Зона значительного влияния приурочена к основным источникам техногенного воздействия проектируемого объекта и чаще всего совпадает с территорией промышленной площадки. Наблюдения за поверхностными и подземными водами, почвами, растительным и животным миром, проводимые в районе солеотвалов и шламохранилищ, показывают, что около них фиксируются максимальные концентрации загрязняющих веществ и отмечается значительная техногенная трансформация параметров. Пункты наблюдения за состоянием компонентов окружающей среды располагаются вблизи источников воздействия и на границе промышленной площадки.

Зона существенного влияния. Со временем около накопителей отходов калийного производства формируются ореолы засоления почв, подземных и поверхностных вод. Их размеры и форма во многом определяются скоростью

и направлением поверхностного и подземного стоков. В зону существенного влияния, как правило, входит санитарно-защитная зона (СЗЗ) объекта. Мониторинг состояния атмосферного воздуха, подземных вод, почв, растительности и животного мира, радиационной обстановки и влияния физических факторов желательно проводить на границе СЗЗ.

Во многих случаях границами существенного влияния могут служить долины рек, дренирующие верхнюю часть потока подземных вод, загрязненных фильтрационными рассолами. Благодаря дренирующей функции рек засоление пресных подземных вод не распространяется на значительные площади. Долины рек обеспечивают транспорт солей вниз по течению. Поэтому зоны существенного влияния поверхностных вод имеют линейный характер и могут выходить за пределы СЗЗ.

Площадь зоны может меняться по мере продолжения горных работ. Основной задачей наблюдений является отслеживание путей миграции загрязняющих веществ, ореола влияния источников воздействия. Результаты наблюдений в зоне существенного воздействия служат для обоснования мероприятий по предупреждению негативных изменений на периферии ореолов влияния источников воздействия. Сеть наблюдательных пунктов в зоне II более редкая, чем в зоне I.

Периферийная зона (зона фонового мониторинга). В пределах этой зоны отслеживаются изменения всех фоновых показателей, которые могут быть вызваны как разработкой месторождения, так и факторами, не связанными с калийным производством. Относительно равномерное распределение наблюдательных пунктов в периферийной зоне позволяет исследовать в динамике качество поверхностных и подземных вод, почв, изменение видового состава растительности и животного мира, радиационной обстановки лицензионного участка в целом, а также проявление случайных, временных и других источников техногенного воздействия. Наблюдения в пределах периферийной зоны ведутся по разреженной сетке.

В пределах выделенных зон для каждого компонента окружающей среды устанавливаются свои требования к размещению наблюдательных пунктов, исходя из природно-техногенных особенностей территории месторождения. Например, при расположении наблюдательных пунктов за состоянием атмосферного воздуха учитывается преобладающее направление ветра, наблюдательные скважины размещаются в зависимости от структуры потока подземных вод и поверхностного стока. Контроль состояния растительности проводится на участках с типичными растительными ассоциациями, почвенный мониторинг отражает фактическое состояние почв, типичных для территории и занимающих доминирующее положение в почвенной структуре.

Пункты мониторинга состояния животного мира должны охватывать все основные типы наземных и водных биоценозов, а также учитывать биологические и экологические особенности основных систематических групп представителей животного мира.

Перечень наблюдаемых показателей, временной режим и иные требования к ведению мониторинга за состоянием атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, недр, растительного и животного мира, почв, ландшафтов и радиационного фона должны учитывать особенности природной среды и специфику техногенного воздействия. Особенность экологического мониторинга на месторождениях солей заключается в отсутствии нормативных значений по приоритетным загрязнителям для снеговых талых вод, почв, растительности и животного мира. Ряд значений, например ПДК по Cl^- , Na^+ в поверхностных и подземных водах, могут отражать высокий уровень содержания солей в связи с разгрузкой высокоминерализованных подземных вод естественного происхождения, а не техногенный характер воздействия на природные воды в районе разработки калийного месторождения.

Анализ происходящей трансформации природных комплексов на исследуемой территории позволил разработать систему эколого-геохимических индикаторов для районов техногенного засоления. Индикаторы объединены в шесть групп: атмосферные, геологические, гидрологические, почвенные, биотические и ландшафтные. В каждой группе выделены компоненты, индикаторы с их пороговыми значениями, которые свидетельствуют о критической техногенной нагрузке (таблица 1.3).

Атмосферный воздух. Программа натурных наблюдений за состоянием атмосферного воздуха нацелена на контроль уровня загрязнения атмосферного воздуха специфичными для предприятия загрязняющими примесями. Кроме наблюдений непосредственно за уровнем загрязнения атмосферы, согласно РД 52.04.186–89, в качестве косвенных методов рекомендуется определять содержание вредных веществ в снеге: снегомерную съемку и отбор проб снежного покрова – по стандартным методикам перед началом снеготаяния; отбор проб снежного покрова – по регулярной сетке. Это позволит выделить зоны с различной интенсивностью техногенного воздействия (рисунки 1.2, 1.3).

Высокая изменчивость концентраций химических веществ в талых снежных водах затрудняет оценку загрязнения атмосферного воздуха. Наиболее информативными показателями являются мольные соотношения Cl^- и Na^+ , Cl^- и SO_4^{2-} , Na^+ и K^+ . Анализ рекомендуемых значений для оценки техногенного воздействия основывается на сравнении с фоновыми значениями.

Таблица 1.3 – Система эколого-геохимических индикаторов при ведении мониторинга состояния окружающей среды на калийных предприятиях

Группа индикаторов	Компоненты	Индикатор
Атмосферные	Химический состав снежного покрова	Водородный показатель Cl/Na (моль) Cl/SO ₄ (моль) Na/K (моль)
Геологические	Горные породы	Коэффициент концентрации загрязняющего вещества (Kc) Суммарный показатель загрязнения (Zc)
	Подземные воды	Водородный показатель Содержание Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , NH ₄ ⁻ , NO ₂ ⁻ Na/K (моль) Na/Cl (моль)
Гидрологические	Поверхностные воды	Коэффициент концентрации загрязняющего вещества (Kc) Суммарный показатель загрязнения (Zc) Содержание Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , NH ₄ ⁻ , NO ₂ ⁻ Na/K (моль) Водородный показатель
	Донные отложения	Коэффициент концентрации загрязняющего вещества (Kc) Тип водной вытяжки Суммарный показатель загрязнения (Zc) Тип водной вытяжки
Почвенные	Почвы	Коэффициент концентрации загрязняющего вещества (Kc) Суммарный показатель загрязнения (Zc) Водородный показатель Сумма токсичных солей SAR Тип водной вытяжки
Биотические	Растительность	Площадь вырубок Площадь болот Повреждения растительности техногенными выбросами/вредителями
	Животный мир	Биомасса донных сообществ Видовое разнообразие

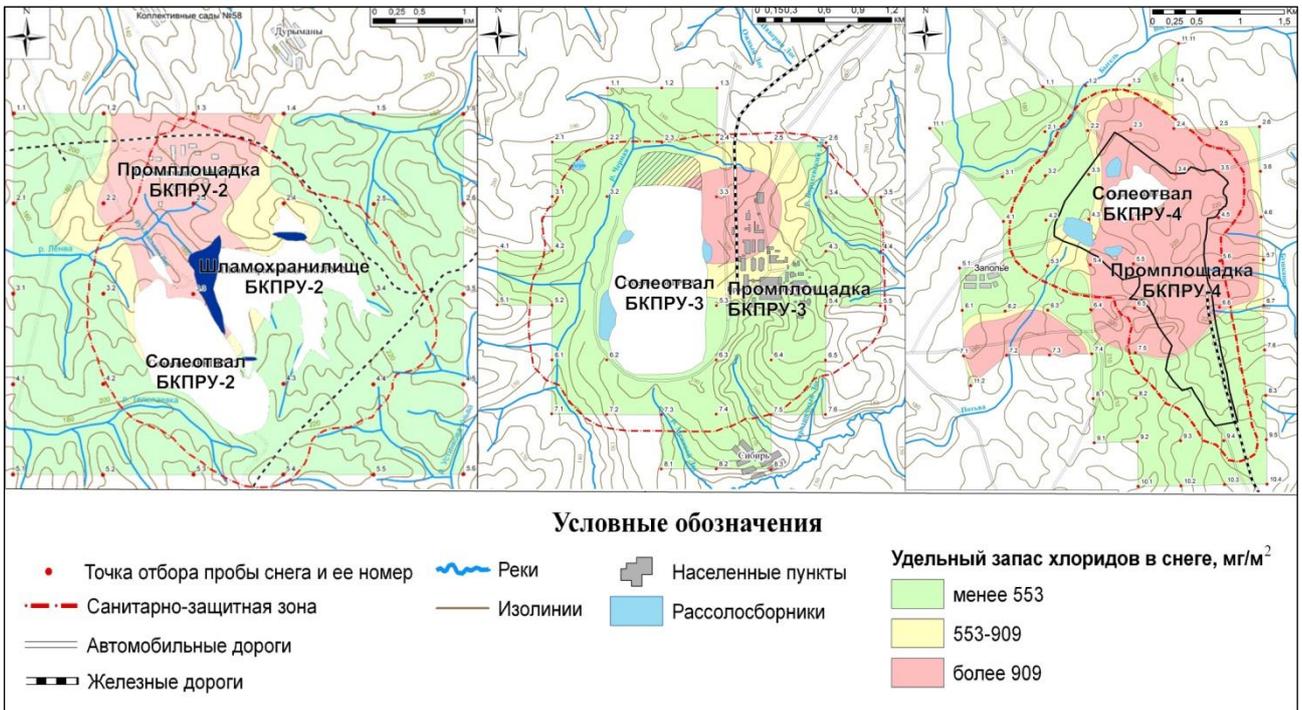


Рисунок 1.2 – Распределение содержания **хлоридов** в снежном покрове в зоне влияния рудоуправлений ВКМКС

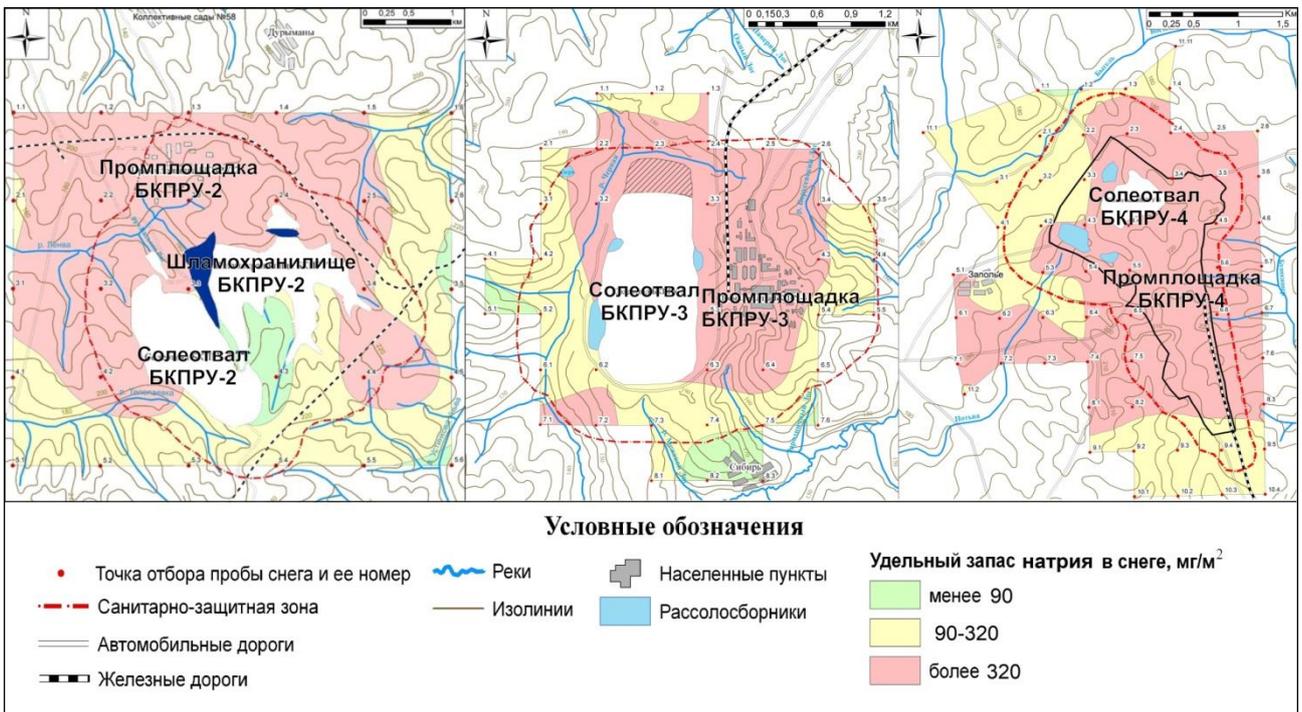


Рисунок 1.3 – Распределение содержания **натрия** в снежном покрове в зоне влияния рудоуправлений ВКМКС

Поверхностные и подземные воды. Наблюдения за состоянием поверхностных вод проводятся на водотоках, полностью (или практически полностью) расположенных в пределах лицензионного участка рек и их бассейнов, характеризующихся трансграничным характером загрязнения.

Ведущее место в нарушении исходной гидрохимической обстановки большинство исследователей отводят воздействию поверхностных накопителей отходов – шламохранилищ и солеотвалов [13, 16–19]. Инфильтрующиеся растворы, содержащие значительное количество растворенных веществ и обладающие повышенной плотностью, проникают в зону активного водообмена. Наиболее обогащенные водорастворимыми солями подземные воды погружаются в глубокие горизонты водопроницаемой толщи. Этому способствуют большая мощность зоны активного водообмена и отсутствие в ней выдержанных водоупоров. Кроме того, воздействие на состав природных вод проявляется на территориях промплощадок за счет фильтрации из небольших местных рассолоборников, открытых канализационных траншей, разовых сливов рассолов на территории промплощадок, смыва и растворения солей, потерянных на погрузочных пунктах, растворения скоплений солей у складов готовой продукции и т.п. [13, 18].

Наряду с функционирующими производственными объектами в пределах месторождений калийных солей встречаются древние рассолопромыслы, заброшенные скважины, участки высокого гипсометрического положения соляных пород, приуроченные к сводам положительных структур, где активно протекают процессы соляного карста. Взаимодействие пресных подземных вод зоны активного водообмена с соляными породами на таких участках также приводит к трансформации химического состава подземных вод.

Перечень компонентов и показателей при гидрохимических наблюдениях должен учитывать требования нормативных документов и специфику калийного производства, основными загрязнителями которого являются хлориды, натрий, калий, соединения азота. Оценка уровня загрязнения данными компонентами проводится в сопоставлении с ПДК_{рх}, установленными Министерством сельского хозяйства РФ в приказе от 13 декабря 2016 года № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения...» для поверхностных вод, а также СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», которые содержат санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных

помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.

Оценку трансформации химического состава поверхностных и подземных вод, связанной с воздействием калийных предприятий, можно проводить по коэффициенту соотношения Na/K, что позволяет выявить зависимость содержания солей от воздействия калийной промышленности, поскольку естественные выходы высокоминерализованных вод связаны с растворением галита и характеризуются высоким содержанием Na^+ при минимальных концентрациях K^+ . Оценка уровня трансформации химического состава проводится в сравнении с фоновыми значениями.

Повышенные концентрации соединений азота в поверхностных и подземных водах также наиболее объективно отражают техногенное воздействие фильтрационных вод с объектов хранения отходов калийной промышленности.

Гидрохимическими индикаторами воздействия предприятий калийной промышленности на ионный состав подземных вод зоны активного водообмена, по результатам проведенных исследований на территории Верхнекамского месторождения калийных солей [20], являются хлориды, бромиды, катионы натрия, калия, кальция, магния, аммония. В меньшей степени прослеживается связь воздействия калийных предприятий с увеличением концентраций в подземных водах нитратов, сульфатов и общего железа.

Результаты проведенных работ по сопоставлению микроэлементного состава подземных вод верхнесоликамской терригенно-карбонатной подсвиты в пределах разрабатываемых участков ВКМКС и фонового Половодовского участка детальной разведки позволяют выделить элементы-индикаторы, демонстрирующие влияние производственной деятельности калийных предприятий. В этот перечень входят: *марганец, кобальт, мышьяк, ванадий, никель, сурьма, барий, стронций, селен*. Для этих элементов доказана связь роста концентраций с увеличением минерализации и снижением значения рН подземных вод, что является характерной чертой подземных вод, попадающих под влияние жидких отходов калийного производства [21].

Санитарно-гигиеническая оценка максимальных содержаний изученных веществ показала, что наибольшую опасность в подземных водах, находящихся под влиянием объектов калийных производств, представляют мышьяк, селен, стронций, барий, натрий, магний, хлориды, бромиды, аммоний.

При выборе периодичности контроля состояния поверхностных и подземных вод необходимо наблюдение в наименее благоприятные периоды (межень, паводки и др.), с учетом особенностей водного режима малых рек.

Донные отложения, формирующиеся в результате смыва минерального и органического вещества с водосборных площадей и взаимодействия с речными водами, являются индикаторами экологического состояния не только водных объектов, но и водосборной площади в целом. В отличие от водной среды, они являются наиболее стабильным компонентом и характеризуют техногенное воздействие на протяжении большого отрезка времени.

При разработке системы мониторинга донных отложений учитывается наличие тесной связи между ними и поверхностными водами. Расположение точек наблюдений за донными отложениями, как правило, совпадает с точками отбора поверхностных вод.

Экологическая оценка состояния донных отложений с формальной точки зрения затруднена из-за отсутствия нормативных показателей. За исходные показатели химического состава донных отложений принимаются фоновые концентрации, что позволяет проследить динамику загрязнения.

Индикатором загрязнения является смена типа водной вытяжки донных отложений с Ca-HCO_3 на Na-Cl . Для оценки микроэлементного состава донных отложений можно рекомендовать суммарный показатель загрязнения Z_c .

Почвенный покров. Мониторинг состояния почв определен Земельным кодексом РФ (2001) – ст. 67 указанного документа, Порядком осуществления государственного мониторинга земель, за исключением земель сельскохозяйственного назначения (Приказ Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии от 22 июля 2021 г. № П/0315).

Система почвенно-геохимического мониторинга может разрабатываться с учетом общих требований, изложенных в соответствующих разделах СП 11-102–97. Целью мониторинга является контроль за физическими, химическими и биологическими изменениями в почвенном покрове под влиянием техногенной нагрузки.

Помимо природных факторов при размещении реперных участков необходимо учитывать существующие очаги техногенной нагрузки. Для характеристики степени засоления почв высокую эффективность показали коэффициент адсорбируемости натрия (SAR) [21] и сумма токсичных солей [22]. Показатель SAR более 13 свидетельствует о развитии солонцовых процессов в горизонтах. По степени засоления почвы классифицируются в зависимости от типа химизма засоления [23].

Оценка микроэлементного состава может проводиться с помощью суммарного показателя загрязнения Z_c .

Растительность. Для оценки состояния растительного покрова можно использовать оценочные показатели и критерии, утвержденные ГНТУ Минприроды РФ [24]. Методическое обеспечение исследований разрабатывается с учетом стандартных классических методик оценки состояния растительности как компонента природной среды, апробированных многолетней историей геоботанических наблюдений, и соответствуют требованиям нормативных документов.

Территориальная сеть мониторинга формируется из эталонных реперных участков, отражающих состояние типичных растительных ассоциаций, например мезофильной лесной, мезофильной луговой, гидрофильной (болотной).

При разработке месторождений полезных ископаемых наиболее информативными показателями состояния растительного покрова являются контроль за изменениями площади вырубок, площади болот и оценка повреждения растительности. Если мониторинг появления новых вырубок позволяет отслеживать прямое уничтожение естественных биотопов, то анализ изменения площади болот на разрабатываемых месторождениях позволяет косвенным образом оценить изменения водного режима территории, причинами чего могут быть проседания земной поверхности, формирование депрессионных «воронок» и т.д. Оценка поврежденности растительности производится как на основе натурных исследований, так и с помощью данных дистанционного зондирования.

Животный мир. Проведение мониторинга состояния животного мира регламентируется ФЗ РФ «О животном мире», Приказом Минприроды России от 30 июня 2021 года № 456 «Порядок ведения государственного мониторинга и государственного кадастра объектов животного мира», ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов», приказом Министерства сельского хозяйства «Об утверждении методики исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам» от 31 марта 2020 г. № 167. Целью мониторинга является контроль за состоянием животного мира и оценка его изменений под влиянием ожидаемой техногенной нагрузки.

Экологический мониторинг объектов складирования отходов предполагает комплексные исследования состояния окружающей среды, в том числе анализ изменения химического состава компонентов окружающей среды, и изучение ответных реакций живых организмов при загрязнении. В условиях устойчивого загрязнения окружающей среды мониторинг биотических компонентов остается неоднозначным с точки зрения

методологии и интерпретации результатов. Проблемы изучения состояния донных сообществ и ихтиофауны при техногенном засолении поверхностных вод рассмотрены на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

Территориальная сеть мониторинга формируется за счет мониторинговых площадок, которые должны охватывать все основные типы наземных и водных биоценозов, учитывать биологические и экологические особенности основных систематических групп представителей животного мира, места массового размножения водоплавающих и околоводных видов, пути весенних и осенних миграций птиц.

В водных биоценозах исследуется состояние зообентоса и ихтиофауны. В наземных биоценозах мониторинговые наблюдения ведутся за птицами и млекопитающими как наиболее многочисленными классами наземных позвоночных.

Наиболее устойчивыми и информативными являются значение биомассы донных сообществ и видовое разнообразие. При возрастании содержания Cl^- наблюдается уменьшение общей биомассы в 2–8 раз. Наиболее объективным показателем негативной реакции биотического компонента на засоление является количество обнаруженных при исследовании видов. Стабильный состав бентоценозов наблюдается в фоновых пресных водах с максимальным видовым разнообразием.

Ландшафты. Специфика ландшафтного мониторинга обусловлена представлением о ландшафте как генетически однородном природном территориальном комплексе, все компоненты которого (климат, воды, почвы и подстилающие породы, биота) развиваются в тесном взаимодействии друг с другом. Нарушение любого из ландшафтообразующих компонентов влечет изменение всех прочих, включая систему внутренних связей и экологическое состояние природного ландшафта в целом. Поэтому ландшафтный раздел в системе мониторинга необходим для получения целостной картины изменений, построенной на основе синтеза частных компонентных наблюдений.

Задачами ландшафтного мониторинга являются интегральная оценка состояния природной среды, прогнозирование тенденций ее развития, отслеживание и моделирование локальных экологических ситуаций на фоне региональных процессов природной динамики.

Организационно-методическую основу ландшафтного мониторинга может составить ландшафтное картографирование с использованием методологического подхода М.А. Глазовской [25], направленное на выделение ландшафтных ареалов, различающихся по миграционной и геохимической

структуре. Итогом структурирования является план-схема миграционных геохимических ареалов в границах территории исследования.

Таким образом, структура экологического мониторинга на горнодобывающих предприятиях включает: регулярные наблюдения за состоянием атмосферного воздуха, рельефа, горных пород, почв, поверхностных и подземных вод, растительным и животным миром. Экологический мониторинг осуществляется по принципу «наблюдение – оценка – прогноз» и предполагает наблюдение за состоянием природных сред и фиксацию происходящих изменений, контроль выполнения природопользователем экологических (санитарно-гигиенических) нормативов, выявление и оценку неблагоприятных тенденций в состоянии компонентов природной среды и природных ресурсов, прогноз их состояния при сложившемся или планируемом уровне техногенной нагрузки, оценку соответствия состояния каждого из наблюдаемых компонентов природной среды заранее установленной норме и режиму природопользования. Структура мониторинга должна оптимизироваться по мере накопления информации. Если результаты мониторинга будут указывать на стабилизацию экологической обстановки в районах месторождений, то возможно сокращение объемов и дискретности наблюдений. На основании экологического мониторинга принимаются управленческие решения по необходимости проведения природоохранных мероприятий.

1.2. Мониторинг биоразнообразия в районах разработки месторождений

Биологическое разнообразие – вариабельность живых организмов из всех источников, включая наземные, морские и иные водные экосистемы и экологические комплексы, частью которых они являются. Это понятие включает в себя разнообразие в рамках вида, между видами и разнообразие экосистем [26]. В этом контексте биоразнообразие – не только редкие или необычные виды, находящиеся под угрозой исчезновения, но и набор тривиальных, наиболее распространенных видов и их мест обитания.

Биологическое разнообразие является одним из важнейших показателей благополучия и устойчивости развития экосистем. Стабильность и устойчивость экосистем при этом достигается благодаря сложной системе взаимосвязей как между различными видами в сообществах, так и видами и средой. Считается, что чем больше видовое богатство биоты, тем выше устойчивость организации экосистем и их резистентность к внешним воздействиям. Биологическое разнообразие является неотъемлемой частью функционирования окружающей среды и обеспечения условий для поддержания жизни человека.

Антропогенная деятельность вызвала необратимый рост изменений в окружающей среде, которые сопровождаются значительной утратой биоразнообразия. Основной причиной этих изменений является преобразование мест обитания, которое происходит в результате освоения земель, вызванного некачественным планированием и управлением процессом эксплуатации ресурсов, внедрения чужеродных (инвазивных) видов и изменения климата [27, 28].

При освоении месторождений полезных ископаемых ущерб биологическому разнообразию может быть существенным, так как происходит изъятие земель под техногенные объекты, строительство протяженных линейных объектов, нарушающих пути миграции наземных животных, загрязнение окружающей среды и шумовое воздействие.

На 10-й Конференции Сторон Конвенции о биологическом разнообразии (октябрь 2010 г., г. Нагоя, Япония) принят актуализированный Стратегический план в области сохранения и устойчивого использования биоразнообразия на 2011–2020 гг., который включал пять стратегических целей по сохранению и устойчивому использованию биоразнообразия:

- введение борьбы с основными причинами утраты биоразнообразия путем включения тематики биоразнообразия в деятельность правительств и общества;
- сокращение прямых нагрузок на биоразнообразие и стимулирование устойчивого использования;
- улучшение состояния биоразнообразия путем охраны экосистем, видов и генетического разнообразия;
- увеличение объема выгод для всех людей, обеспечиваемых биоразнообразием и экосистемными услугами;
- повышение эффективности осуществления за счет общественного планирования, управления знаниями и создания потенциала.

Более конкретно управление биоразнообразием имеет следующие цели [29]:

1. Планировать и координировать все усилия по сохранению биоразнообразия.
2. Охранять и восстанавливать экосистемное, видовое и генетическое разнообразие, используя стратегии их сохранения *in-situ* и *ex-situ*.
3. Устойчиво использовать биоразнообразие в рамках уже имеющихся систем управления, таких как лесоводство, рыболовство, животноводство и земледелие.
4. Справедливо распределять выгоды от сохранения биоразнообразия посредством различных социальных и экономических инструментов.
5. Предоставлять правовую основу для деятельности по сохранению и устойчивому использованию биоразнообразия.

6. Создавать возможности для людей и организаций интегрировать в планы и схемы социально-экономического развития природоохранные мероприятия.

Согласно «Модельному закону о сохранении, устойчивом использовании и восстановлении биологического разнообразия» (Приложение к постановлению МПА СНГ от 20 мая 2016 г. N 44-9) устанавливается единый подход и порядок регулирования процессов сохранения, устойчивого использования и восстановления биологического разнообразия для удовлетворения продовольственных, рекреационных, социальных и иных потребностей человека с учетом интересов нынешнего и будущих поколений.

Статья 5 указанного закона регулирует основные принципы политики государства в области сохранения, устойчивого использования и восстановления биологического разнообразия:

- осуществление стратегии долгосрочного комплексного управления земельными, водными и живыми ресурсами, обеспечивающей сохранение, устойчивое использование и восстановление биологического разнообразия;
- использование наилучших доступных технологий и, при соответствующих обстоятельствах, традиционных знаний в качестве основы для принятия решений, влияющих на биологическое разнообразие и биологические ресурсы;
- поддержание высокого запаса устойчивости природных экосистем и природно-антропогенных систем, сохранение биологического и ландшафтного разнообразия;
- системная последовательность действий по достижению важнейших стратегических ориентиров в сфере экологии на локальном, региональном и глобальном уровнях на основе современной методологии анализа природных рисков и оценки экологического ущерба;
- обоснованность и прозрачность управленческих решений в сфере экологии, открытость и доступность экологической информации;
- экологическая ориентированность роста экономики, признание значимости для общества жизнеобеспечивающих функций экосферы при соблюдении баланса потребностей настоящего и будущих поколений в благосостоянии и экологическом благополучии;
- стоимостная оценка биологического разнообразия и экосистемных услуг;
- распределение между всеми заинтересованными сторонами на справедливой основе затрат и выгод, связанных с устойчивым использованием биологического разнообразия и рациональным использованием биологических ресурсов;

- обеспечение условий непревышения критических уровней негативного воздействия на компоненты биологического разнообразия на основе оперативного регулирования производственных процессов, установления квот на негативное воздействие и их рыночного оборота;
- необходимая достаточность норм регулирования экономической деятельности по экологическим основаниям, их экономическая обоснованность и учет отдаленных экологических последствий;
- ответственность субъектов хозяйственной и иной деятельности за ее экологические последствия, а также за экологические последствия деятельности лиц, правопреемниками которых они являются;
- учет позиции населения по общим и частным вопросам политики в области сохранения, устойчивого использования и восстановления биологического разнообразия, информационная обеспеченность и открытость деятельности в области экологической безопасности;
- признание значимой роли общественной и предпринимательской инициативы в реализации целей политики государства в области сохранения, устойчивого использования и восстановления биологического разнообразия и необходимости ее поощрения, в том числе в инвестиционной сфере;
- учет трансграничного влияния хозяйственной и иной деятельности в макрорегиональном и глобальном масштабах, гармонизация норм и стандартов с учетом международной практики, сотрудничество в решении глобальных проблем;
- гуманное отношение к животным, включая оказание помощи животным в случае заболеваний, угрозы гибели при стихийных бедствиях, техногенных катастрофах и вследствие других причин.

В ходе Саммита по устойчивому развитию 25 сентября 2015 г. в Нью-Йорке 193 государства – члена ООН утвердили новые глобальные цели на предстоящие 15 лет (2016–2030). «Меняя наш мир: повестка дня устойчивого развития до 2030 года» включает 17 целей устойчивого развития для обеспечения всеобщего благополучия. Проблема сохранения биоразнообразия занимает центральное место и тесно связана с большинством других целей [30].

Для сохранения экосистем суши в рамках устойчивого развития определены следующие задачи [31]:

1. Обеспечить сохранение и восстановление наземных и внутренних пресноводных экосистем.
2. Остановить обезлесение и восстановить деградировавшие леса.
3. Проводить мероприятия, направленные на борьбу с опустыниванием и восстановление деградировавших земель.
4. Обеспечить сохранение горных экосистем.

5. Остановить утрату биологического разнообразия и природных сред обитания.

6. Осуществить справедливое распределение благ от генетических ресурсов и доступа к ним.

7. Проводить мероприятия, направленные на борьбу с браконьерством и контрабандной торговлей охраняемыми видами флоры и фауны.

8. Предотвратить проникновения чужеродных инвазивных видов на наземные и водные экосистемы.

9. Обеспечить учет ценности экосистем и биоразнообразия в ходе национального и местного планирования.

10. Увеличить финансовые ресурсы в целях сохранения биоразнообразия и экосистем.

11. Мобилизовать ресурсы для финансирования рационального лесопользования.

Нормативные документы Российской Федерации по сохранению биоразнообразия

Нормативная база Российской Федерации провозглашает необходимость сохранения биоразнообразия естественных экологических систем, природных ландшафтов и природных комплексов [32]. В рамках обязательств по Конвенции о биологическом разнообразии в России разрабатываются Национальные стратегии и План действий по сохранению биоразнообразия, федеральные проекты по сохранению биологического разнообразия и развития экологического туризма. На законодательном уровне введен в использование Национальный стандарт «Наилучшие доступные технологии. Биологическое разнообразие», действуют законы «Об охране окружающей среды», «О животном мире», «Об особо охраняемых природных территориях», «Об экологической экспертизе» и др. В целях реализации Федерального проекта «Сохранение биологического разнообразия и развитие экологического туризма» утверждены методические рекомендации по структуре и содержанию программ сохранения биологического разнообразия коммерческих организаций.

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 11 ноября 2015 г. № 1219 (Собрание законодательства Российской Федерации, 2015, № 47 ст. 6586), в целях реализации подпункта 3.4.1 Плана мероприятий по реализации Федерального проекта «Сохранение биологического разнообразия и развитие экологического туризма» Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации разработало и утвердило «Методические рекомендации по структуре и содержанию программ сохранения биологического разнообразия коммерческих организаций» [33].

Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 г., утвержденные Президентом Российской Федерации от 28 апреля 2012 г. № Пр-1102, предусматривают решение следующих основных задач:

- формирование эффективной системы управления, предусматривающей взаимодействие и координацию деятельности органов власти;
- совершенствование нормативно-правового обеспечения охраны окружающей среды и экологической безопасности;
- обеспечение экологически ориентированного роста экономики и внедрение экологически эффективных инновационных технологий;
- предотвращение и снижение текущего негативного воздействия на окружающую среду;
- восстановление нарушенных естественных экологических систем;
- обеспечение экологически безопасного обращения с отходами;
- сохранение природной среды, в том числе естественных экологических систем, объектов животного и растительного мира;
- развитие экономического регулирования и рыночных инструментов охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности;
- совершенствование системы государственного экологического мониторинга (мониторинга окружающей среды) и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также изменения климата;
- научное и информационное обеспечение охраны окружающей среды и экологической безопасности;
- формирование экологической культуры, развитие экологического образования и воспитания;
- обеспечение эффективного участия граждан, общественных объединений, некоммерческих организаций и бизнес-сообщества в решении вопросов, связанных с охраной окружающей среды и обеспечением экологической безопасности;
- развитие международного сотрудничества в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности.

Для решения задачи сохранения природной среды, в том числе естественных экологических систем, объектов животного и растительного мира, используются следующие механизмы: укрепление охраны, развитие и обеспечение устойчивого функционирования системы особо охраняемых природных территорий всех уровней значения; создание эффективной системы мер, направленной на сохранение редких и находящихся под угрозой исчезновения объектов животного и растительного мира; предотвращение неконтролируемого распро-

странения на территории Российской Федерации чужеродных (инвазивных) видов животных, растений и микроорганизмов; сохранение генетического фонда диких животных [34].

Текущее негативное воздействие на окружающую среду можно снизить за счет совершенствования процедуры и методологии оценки этого воздействия и создания нормативной правовой базы для стратегической экологической оценки, а также проведения обязательной государственной экологической экспертизы проектной документации экологически опасных объектов, увеличения объема строительства зданий и сооружений, сертифицированных с учетом международного опыта применения «зеленых» стандартов [34].

В качестве решения проблемы восстановления нарушенных естественных экологических систем предлагается проводить инвентаризацию территорий с целью установления районов с неблагоприятной экологической ситуацией и в последующем осуществлять программы, направленные на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду и ликвидацию экологического ущерба, связанного с прошлой экономической и иной деятельностью; организовывать работы по оценке и поэтапной ликвидации экологических последствий деятельности; сохранять и восстанавливать защитные и средообразующие функции естественных экологических систем вне особо охраняемых природных территорий. Развитие правовых, экономических, организационных и методологических механизмов возмещения вреда, причиненного окружающей среде, также будет способствовать восстановлению нарушенных систем [34].

В соответствии с развитием задачи по сохранению природной среды, в том числе естественных экологических систем, объектов животного и растительного мира, и политикой экологического развития приняты Концепция развития системы особо охраняемых природных территорий федерального значения на период до 2020 года (распоряжения Правительства Российской Федерации от 22 декабря 2011 г. № 2322-р) и Стратегия сохранения редких и находящихся под угрозой исчезновения видов животных растений и грибов (распоряжение от 17 февраля 2014 г. № 212-р). Это свидетельствует об особом приоритете развития для государства указанных направлений сохранения биоразнообразия [34].

Планомерное снижение сбросов, в том числе биогенных веществ, и выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду – одна из целевых задач Стратегии. Сохранение биологического разнообразия при осуществлении хозяйственной и иной деятельности, оказывающей воздействие на окружающую среду, относится к числу основных принципов охраны окружающей среды в Российской Федерации (Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»).

Примерами успешного внедрения принципов устойчивого развития и сохранения биоразнообразия являются программы промышленных предприятий, направленные на сохранение биологического разнообразия. В рамках стратегии устойчивого развития в компаниях разрабатываются программы сохранения биоразнообразия, которые являются внутренними документами компании, выражающие обязательства корпоративной политики в области минимизации воздействия на окружающую среду и сохранения биоразнообразия.

Компания «Сахалин Энерджи» выполняет свои обязательства в отношении минимизации воздействия на окружающую среду. В рамках реализации Программы экологического мониторинга и Плана действий по сохранению биоразнообразия, разработанных компанией, внедряются меры, направленных на сохранение редких и исчезающих видов, уязвимых биотопов. Компания проводит контроль состояния популяций охраняемых видов растений и животных, а также их местообитаний с целью оценки воздействия на этапе эксплуатации и разработки мер по снижению уровня воздействия в случае необходимости [35].

Мониторинг охраняемых видов растений и животных проводится в строгом соответствии с действующим российским природоохранным законодательством. Особи из природной среды не изымаются, их регистрация и оценка состояния основаны исключительно на принципе количественного и качественного учета по данным визуальных наблюдений. Сохранение биоразнообразия в районах эксплуатации объектов компании включает меры по исследованию и защите охраняемых видов и экологически уязвимых биотопов: серых китов, белоплечих орланов, охраняемых видов птиц, охраняемых видов растений (в рамках программы мониторинга растительности), сахалинского тайменя, болот, акватории порта Пригородное, залива Анива [35].

ПАО «НК «Роснефть» – глобальная энергетическая компания, на долю которой приходится около 6 % мирового производства нефти. Компания намерена предотвращать и минимизировать воздействие своей деятельности на биоразнообразие на протяжении всего цикла реализации проектов и использования продукции. План по углеродному менеджменту до 2035 г. включает использование механизма природных поглотителей в целях сокращения выбросов парниковых газов (лесопосадки и устойчивое ведение лесного хозяйства), что также способствует сохранению биоразнообразия [36].

Подход НК Роснефть к сохранению биоразнообразия заключается в том числе в добровольном исключении зон деятельности. При планировании новых проектов во всех регионах своего присутствия компания предпринимает все возможные действия, направленные на избежание ведения деятельности или какого-либо воздействия на особо охраняемые природные территории – охраняемые территории категорий 1a и 1b по классификации Международного сою-

за охраны природы (IUCN), а также объекты всемирного наследия ЮНЕСКО. Компания в соответствии с требованиями законодательства обязуется не проводить разведку нефтяных месторождений в ледовых районах Арктических морей без предварительного проведения строгой экологической экспертизы, мониторинга и независимой верификации деятельности. Компания не ведет добычу на шельфе Арктических морей [36].

Роснефть реализует в Арктике комплексную долгосрочную исследовательскую программу, которая включает геологические, гидрометеорологические и экологические мероприятия в сотрудничестве с ведущими научными и проектными организациями страны. Компания провела около 30 арктических экспедиций по всему побережью Северного Ледовитого океана. Начиная с 2014 г. Роснефть последовательно восстанавливает систему арктических метеонаблюдений. В полевой сезон 2020 г. совместно с Институтом проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Центром морских исследований МГУ, Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом была проведена масштабная экспедиция по изучению популяции атлантического подвида моржа, белого медведя и белой чайки, занесенных в Красную книгу. Кроме того, совместно с Сибирским федеральным университетом продолжается изучение популяции дикого северного оленя, являющегося основой жизни коренных малых народов севера. Цель этих работ – оценить состояние и устойчивость арктических экосистем на основании исследований ключевых видов животных [36].

Компания Карачаганак Петролиум Оперейтинг (КПО) осваивает Карачаганакское нефтегазоконденсатное месторождение. При разработке Карачаганака применялась самая передовая технология добычи углеводородов, но в ходе своей производственной деятельности компания стремится обеспечить эффективное использование потенциала Карачаганака, с достижением максимальных социально-экономических благ для местного населения. КПО разрабатывает и реализует План мероприятий по сохранению биоразнообразия (ПМСБ), который определяет основные направления деятельности Компании по сохранению биоразнообразия и экосистемных услуг в регионе в соответствии с Кодексом устойчивого развития КПО [37].

ПМСБ является частью многоплановой работы, которая позволяет рассмотреть проблему сохранения биоразнообразия с точки зрения оценки возможного негативного воздействия производственной деятельности, существующей законодательной базы, современного состояния территории, ее чувствительности и способности восстанавливаться, а также приоритетности сохранения видов и территорий (сохранения коренных экосистем) для будущего, а

также для нахождения баланса между «брать» и «давать» всеми заинтересованными сторонами [37].

Основой для ПМСБ является документ IPIESA «Инструкция по составлению Планов мероприятий по сохранению биоразнообразия для нефтегазовой отрасли», в котором предложена структура Плана и рекомендации по его разработке [37].

С 2012 г. ведется мониторинг животного мира и растительности. Мониторинг животного мира проводится по 17 пешим маршрутам и 5 площадкам каждые три года. Оценка состояния мест обитания отдельных животных, а также количественный и качественный состав различных систематических групп животных определяются методами визуальных наблюдений. Мониторинг растительности проводится на 27 площадках в сравнении с предыдущими годами. Исследование включает в себя геоботаническое описание: обилие, фенофаза, жизненность, степень антропогенной трансформации. Кроме того, периодически проводится отбор частей растений для анализа на содержание хлоридов, сульфатов, серы, нитратов и нефтепродуктов. Периодичность – 1 раз в 3 года. Стоит отметить, что на территории КНГКМ запрещены все виды охоты и рыболовства, что отражено во внутренней процедуре «Зона повышенного контроля на КНГКМ» [37].

Главным принципом деятельности АО «Зарубежнефть» и предприятий группы компаний при добыче, подготовке и транспортировке нефти выступает устойчивое развитие, которое подразумевает в том числе обеспечение промышленной и экологической безопасности, а также минимизацию негативного воздействия на окружающую среду [38].

Для реализации целей политики в части экологической безопасности в компании были разработаны и реализованы Краткосрочная программа мероприятий по охране и восстановлению окружающей среды АО «Зарубежнефть» на период 2014–2016гг. и Долгосрочная программа Мероприятий по охране и восстановлению окружающей среды АО «Зарубежнефть» на период 2015–2020гг. [38].

Программы представляют собой систему мероприятий по сохранению, улучшению и восстановлению окружающей среды, ее частей и компонентов, рациональному природопользованию, контролю за состоянием окружающей среды, экологическому образованию и управлению, информированию населения о состоянии окружающей среды [38].

В основу Экологических программ были положены среднесрочные и краткосрочные Планы природоохранных мероприятий дочерних компаний АО «Зарубежнефть», имеющих в своем составе производства с потенциальными источниками воздействия на здоровье человека и окружающую среду. С целью

планомерного снижения негативного воздействия на окружающую среду Группой компаний АО «Зарубежнефть» ежегодно реализуются мероприятия по управлению природоохранной деятельностью [38].

ПАО «Уралкалий» – крупнейший в мире производитель калийных удобрений. Важнейшим аспектом деятельности компании является минимизация негативного воздействия на окружающую среду и ее сохранение, поэтому она предпринимает все необходимые меры по поддержанию благоприятной окружающей среды в регионах присутствия [39].

Предприятия «Уралкалия» не располагаются в особо охраняемых природных территориях (ООПТ). Деятельность компании не угрожает видам, включенным в Красный список Международного союза охраны природы (МСОП) и Красные книги России. Ежегодно проводятся мероприятия для улучшения состояния биоресурсов водных объектов, например, выпуск молоди видов рыб, способствующих восстановлению локальных экосистем [40].

В соответствии с российским законодательством Компания планирует деятельность по закрытию рудников на ранних стадиях проекта и оценивает затраты, связанные с работами по восстановлению земель. Впоследствии в ходе реализации проекта периодически проводится переоценка затрат. «Уралкалий» проводит искусственное воспроизводство биологических ресурсов ежегодно с 2015 г.

Цели и принципы разработки программы сохранения биоразнообразия

Целью Программы сохранения биологического разнообразия (ПСБ) является планирование и реализация комплекса мер, направленных на предотвращение и сокращение негативного воздействия на состояние биоразнообразия при ведении хозяйственной деятельности, защиту и сохранение биоразнообразия в границах зон воздействия хозяйственной деятельности, восстановление природных комплексов, нарушенных в результате хозяйственной деятельности, обеспечение безопасного освоения и сохранение ценных и уникальных экосистем, если таковые будут обнаружены.

Программа должна включать мероприятия, направленные на научные исследования биоценозов, наблюдения за индикаторными видами живых организмов и их изучение, научно обоснованную оценку чувствительности территории и мест обитания, сбор и анализ фондовой информации о состоянии окружающей среды, мониторинг и оценку воздействия на окружающую среду намечаемой хозяйственной и иной деятельности и другие природоохранные мероприятия по сохранению биологического разнообразия в границах зон воздействия хозяйственной деятельности.

В рамках Программы могут быть проведены или запланированы следующие мероприятия:

- анализ видового разнообразия в границах зон воздействия хозяйственной деятельности;
- проведение идентификации и минимизации экологических рисков за счет разработки и реализации предупреждающих мероприятий;
- формирование комплекса мер, направленных на сохранение биологического разнообразия;
- выполнение методических, научно-исследовательских работ и проведение природоохранных мероприятий в ходе геологоразведочных работ;
- подготовка обоснованного перечня видов, являющихся индикаторами устойчивого состояния экосистем, включающего представителей флоры и фауны средней тайги, а также представление данных о встречаемости видов на территории хозяйственной деятельности.

Практического опыта реализации требований по сохранению важных для редких видов местообитаний в России очень мало. В ряде регионов РФ были разработаны методики по сохранению биоразнообразия в ходе лесозаготовительной деятельности. В частности, такой опыт имеется в Кировской, Псковской, Архангельской областях, Республиках Коми и Карелии [32].

Правовой основой для разработки и реализации ПСБ является комплекс международных соглашений в области охраны окружающей среды и устойчивого развития, а также современное экологическое законодательство и комплекс нормативно-правовых актов РФ и Пермского края, содержащие применимые требования к охране БР.

Принципы экосистемного подхода представляют собой систему стратегии комплексного управления земельными, водными и живыми ресурсами, которые обеспечивают их сохранение и устойчивое развитие [41]. При этом основу экосистемного подхода составляет применение соответствующей научной методологии, охватывающей все уровни биологических систем, включая основные структуры, процессы, функции и взаимосвязи между организмами и средой их обитания. В этом отношении биологические принципы, заложенные в Национальной стратегии сохранения биоразнообразия России, в значительной степени коррелируют с указанной методологией.

В рамках экосистемного подхода подчеркивается, что данный подход должен обеспечивать достижение надлежащего равновесия между сохранением и устойчивым использованием биологического разнообразия и их интеграцию.

В Национальной стратегии сохранения биоразнообразия России 2001 г. цель сформулирована следующим образом: «Сохранение биоразнообразия природных биосистем на уровне, обеспечивающем их устойчивое существование и

неистощительное использование, а также сохранение разнообразия одомашненных и культивируемых форм живых организмов и созданных человеком экологически сбалансированных природно-культурных комплексов на уровне, обеспечивающем развитие эффективного хозяйства и формировании оптимальной среды для жизни человека».

Стратегия сохранения биоразнообразия должна основываться на принципах, определенных Национальной стратегией сохранения биоразнообразия России, и в то же время учитывать специфику природных и социально-экономических условий региона.

На начальном этапе разработки программы сохранения биоразнообразия проводится инвентаризация биологического разнообразия региона и анализ его состояния. На этом этапе прежде всего важно оценить достаточность имеющихся данных о регионе и наличие необходимой научной базы для разработки стратегии. Эффективная стратегия может быть разработана только на основании конкретных сведений о состоянии биоразнообразия, тенденциях и причинах его изменения, распределении объектов по территории. Если таковые отсутствуют, необходимо провести специальные обследования региона.

Следующим этапом является осуществление деятельности в рамках программы сохранения биоразнообразия (ПСБ), которое подразумевает ведение мониторинга. Под мониторингом биоразнообразия понимается комплексная информационная система наблюдений за состоянием микроорганизмов, растительного и животного мира в целях выявления, анализа и прогнозирования возможных изменений на фоне естественных процессов под влиянием антропогенных факторов [42].

Цель мониторинга биоразнообразия – организация и проведение наблюдений за биотой, контроль её состояния, а также структурно-функциональных изменений, происходящих под воздействием природных и антропогенных факторов. Основные задачи мониторинга сводятся к следующему [43]:

1. Анализ исходной информации и обеспечение картографическим материалом.
2. Проведение наблюдений и контроль состояния биоты в зонах влияния хозяйственных объектов и на прилегающих территориях.
3. Оценка и прогноз сукцессионных и инвазионных процессов, состояния биоты фитопатологического состояния древесной растительности.
4. Картирование биотопов, местообитания редких, краснокнижных и инвазивных видов в зонах влияния гидроэнергетических объектов и на прилегающих территориях.

5. Разработка комплекса природоохранных мероприятий (рекультивация, реинтродукция и др.) по устранению и минимизации отрицательного воздействия хозяйственного объекта на биоразнообразие.

Основной задачей мониторинга биоразнообразия является раннее предупреждение возможных резких и значительных нарушений состояния природных систем, отдельных сообществ и популяций, определяющих характер окружающей среды с целью защиты жизни человека и сохранения природно-хозяйственных ландшафтов [44].

Мониторинг не может проводиться в отрыве от наблюдений за другими компонентами окружающей среды и процессами, в ней происходящими, так как на биологические сообщества оказывают большое влияние и глобальные изменения климата, и уровень содержания тех или иных химических веществ в атмосфере, и особенности землепользования.

Мониторинг компонентов природной среды, отдельных естественных экологических систем может давать достаточно много информации для оценки состояния биоразнообразия и его тенденций. При этом используемые индикаторы должны иметь логическое обоснование, достаточную простоту разработки, учитывать масштабы применения, доступность источников данных таким образом, чтобы сформировать ограниченное количество простых, легко применимых и рентабельных индикаторов [34].

Мониторинг проводится на ключевых участках, выделенных на территории лицензионных участков и/или в границах горных отводов, в наземных и аквальных экосистемах, а также на особо охраняемых природных территориях. Ключевые участки выделены в лесных, луговых и пойменных биотопах с целью исследования биоразнообразия и оценки его динамики.

Наблюдения за выбранными компонентами осуществляются с определенной периодичностью (таблица 1.4). Мониторинг в области сохранения и устойчивого использования биоразнообразия является важным элементом адаптивного управления. Составной частью мониторинга является разработка индикаторов биоразнообразия, которые представляют собой информационные инструменты, позволяющие обобщать соответствующую информацию для выявления состояния и тенденций в области биоразнообразия в целях повышения эффективности осуществляемых мероприятий по управлению биоразнообразием [34].

Биоиндикация – это обнаружение и определение биологически и экологически значимых антропогенных нагрузок на основе реакций на них живых организмов и их сообществ [45].

При помощи биоиндикаторов возможно обнаружение места скопления в экологических системах различного рода загрязнения; возможно отследить

скорость изменений, которые происходят в природной среде; по биоиндикаторам возможно сделать вывод о степени вредности тех или иных веществ для живой природы.

Таблица 1.4 – Периодичность и сроки проведения мониторинга биоразнообразия

Компонент окружающей среды	Периодичность	Сроки
Растительность	1 раз в 2 года	Весенний, летний период
Рыбы	1 раз в 2 года	Весенний, летний период
Птицы	1 раз в 2 года	Весенний, летний период
Беспозвоночные животные (почвенные)	1 раз в 2 года	Весенний, летний период
Наземные животные	1 раз в 2 года	Летний период
Водные беспозвоночные животные	1 раз в 2 года	Осенний период
Почвы	1 раз в 2 года	Летний период

У живых биоиндикаторов есть преимущества по сравнению с химическими методами оценки состояния природной среды, широко используемыми в настоящее время [45]:

1. Объединяют все биологически важные данные о природной среде и характеризуют ее состояние в целом.

2. На фоне хронической антропогенной нагрузки реагируют на незначительное влияние в силу кумулятивного эффекта.

3. Исключают целесообразность регистрации физических и химических показателей среды.

4. Делают необязательным использование дорогостоящих и трудоемких физических и химических методов для измерения биологических показателей; живые организмы постоянно присутствуют в природной среде и реагируют на кратковременные и залповые выбросы токсикантов, которые можно не регистрировать при помощи автоматической системы контроля с периодичным отбором проб на анализы.

5. Фиксируют скорость происходящих в природной среде изменений.

6. Указывают пути и места скоплений различного рода загрязнений в экологических системах и возможные пути попадания этих веществ в пищу человека.

7. Дают возможность делать вывод о степени вредности синтезированных веществ для природы и человека и контролировать воздействие этих веществ.

8. Позволяют нормировать допустимую нагрузку на экосистемы, которые отличаются своей устойчивостью к антропогенному воздействию.

В конце прошлого столетия принята программа «Биоиндикаторы» на Общей ассамблее Международного союза биологических наук, в соответствии с которой все биологические системы дифференцированы на 6 групп согласно биологическим дисциплинам и могут применяться для биоиндикации (рисунок 1.4) [45].

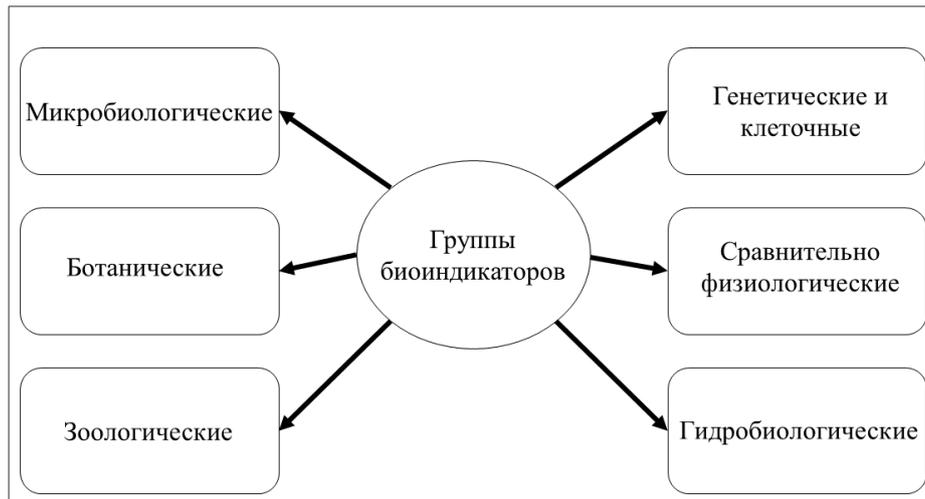


Рисунок 1.4 – Биологические системы, применяемые в качестве биоиндикаторов

Группа микробиологических индикаторов. У микроорганизмов достаточно высокая скорость реакции на изменение уровня загрязненности воды и почвы. Перемены в сообществе микроорганизмов обусловлены наличием в среде их обитания специфических токсических агентов [45].

Группа ботанических индикаторов. В целях идентификации специфических загрязнений воздушного бассейна целесообразно использование чувствительных видов. Это низшие растения, лишайники, грибы, многие высшие растения. Определенный подбор организмов дает возможность обнаруживать кратковременное или длительное воздействие загрязнителей. Индикационными свойствами обладают и фитоценологические характеристики растительных сообществ в целом [45].

Группа зоологических индикаторов. Исследование отдельных видов и их сообществ позволяет получить сведения о накопленных химических веществах в теле животных. Эти данные могут быть применены для установления степени токсичности веществ в продуктах питания человека [45].

Группа генетических и клеточных индикаторов. Превосходный биоиндикатор – клеточные и субклеточные элементы организма, которые адаптированы к конкретным условиям среды [45].

Группа сравнительно физиологических индикаторов. Большинство животных в процессе появления новых агентов в окружающей среде способны изменять поведение. Множество жизненно важных процессов нарушается в результате воздействия загрязняющих веществ, происходит изменение функционирования ряда систем [45].

Группа гидробиологических индикаторов. Зоны распространения либо спектр видов, которые чувствительны к качеству воды, характеризует состояние водного бассейна. Для каждого конкретного токсиканта необходим подбор соответствующих индикаторных видов [45].

Таблица 1.5 – Индикаторы состояния биоразнообразия

Компонент экосистемы	Индикаторы
Растительность	Общее количество видов растений
	Количество инвазивных и синантропных видов
	Индекс видового богатства, индекс концентрации видового богатства, доля инвазивных видов во флоре
	Наличие видов растений, включенных в Красные книги региона, Российской Федерации, в Красный список МСОП
Позвоночные животные	Общее количество видов наземных и водных животных
	Наличие видов животных, включенных в Красные книги региона, Российской Федерации, в красный список МСОП
	Наблюдение за видами-индикаторами
Беспозвоночные животные	Биомасса, плотность
	Индекс видового богатства
Зообентос, зоопланктон	Биомасса гидробионтов
	Индекс Шеннона, индекс видового богатства
Почвы	Диагностика и классификация
	Оценка степени нарушенности
Микробный компонент	Учет численности и выделение чистых культур из почвенных образцов
	Анализ морфологии колоний микроорганизмов, выросших на агаризованной питательной среде

Для оценки биоразнообразия в рамках ПСБ предлагается исследовать следующие компоненты экосистемы: растительность, животный мир (позвоночные наземных и аквальных экосистем, подстилочные беспозвоночные), почвы, зообентос, зоопланктон, микробиологическое сообщество (таблица 1.5).

Позвоночные животные:

- общее количество видов наземных и водных животных,
- наличие видов животных, включенных в Красные книги региона, Российской Федерации, в Красный список МСОП,
- наблюдение за видами индикаторами – стерлядь, серый журавль.

В предложенной нами программе сохранения биоразнообразия в качестве видов-индикаторов, за которыми проводилось наблюдение, выбраны стерлядь (*Acipenser ruthenus* Linnaeus) (рисунки 1.5, 1.6) и серый журавль (*Grus grus* Linnaeus).

Серый журавль в ходе маршрутного обследования территории обнаружен только на ООПТ «Маргинское болото», но его местообитание может являться характерным и для участков, находящихся под хозяйственной деятельностью. Серый журавль занесен в Приложение к Красной книге Пермского края, по критериям Международного союза охраны природы относится к категории пониженной уязвимости. По встречаемости этого вида можно судить о негативных изменениях окружающей среды, поскольку этот вид птиц чувствителен к изменениям гидрологических и почвенных условий водно-болотных экосистем. Поэтому данный вид может служить биологическим индикатором в определении реакции биоценозов на природные и антропогенные воздействия.

Охраняемые виды, которые занесены в Красный список Международного союза охраны природы (МСОП) и в Красные книги регионального и федерального значений, а также места обитания этих видов могут находиться в зоне влияния деятельности предприятия. Зафиксированный список видов, находящихся под угрозой исчезновения, может помочь организации выявить области ее деятельности, которые представляют опасность для этих видов животных и растений. Путем выявления такой опасности организация сможет предпринять действия, позволяющие избежать ущерба для этих видов и предотвратить их исчезновение. Красный список МСОП и списки Красных книг охраняемых видов можно использовать в качестве источников информации мест обитания, для формирования управленческих решений по мероприятиям хозяйственной деятельности без причинения ущерба охраняемым видам.



Рисунок 1.5 – Экземпляр стерляди длиной 495 мм и массой 365 г, отловленный при проведении научно-исследовательских обловов верхней части Камского водохранилища (особь возвращена в естественную среду)



Рисунок 1.6 – Экземпляр стерляди длиной 520 мм и массой 430 г, отловленный при проведении научно-исследовательских обловов верхней части Камского водохранилища (особь возвращена в естественную среду)

Современное разнообразие живых организмов отдельных континентов и регионов сформировалось не только за счет длительного процесса эволюции, но и в результате перемещений ранее возникших видов – биологических инвазий чужеродных видов. Инвазии чужеродных видов (или видов-вселенцев) происходили всегда, но если ранее растения и животные переселялись по естественным причинам, связанным прежде всего с глобальными геологическими и климатическими преобразованиями Земли, то в последние 400–500 лет они в основном прямо или косвенно обусловлены деятельностью человека [34].

Для сохранения биоразнообразия необходимо контролировать численность инвазивных видов, идентифицировать и классифицировать по приоритетности

пути их интродукции, регулировать и искоренять пути перемещения чужеродных видов для предотвращения их интродукции и внедрения [34].

Виды-вселенцы, которые, внедрившись в новые для себя (аборигенные) сообщества, наносят им существенный ущерб, который складывается из всевозможных воздействий вида-вселенца на компоненты сообщества. В частности, они могут:

- существенно изменять местообитания аборигенных видов (особенно когда виды-вселенцы являются «ключевыми видами» сообщества);
- становиться конкурентами аборигенных видов, снижать их численность и вытеснять их;
- становиться хищниками по отношению к аборигенным видам и также вытеснять их;
- переносить или сами вызывать болезни или быть паразитами аборигенных видов;
- изменять генетическую структуру популяций аборигенных видов, влияя на их численность и гибридизуясь с ними.

В настоящее время биологические инвазии угрожают биоразнообразию в глобальном масштабе. Чужеродные виды являются представителями всех таксономических групп живых организмов: вирусы, бактерии, грибы, водоросли, мхи, папоротники, высшие растения, беспозвоночные, рыбы, земноводные, рептилии, птицы, млекопитающие. Они внедряются и влияют на состояние местной биоты практически всех регионов Земли. Распространение и массовое размножение вселенцев нарушает генетическую изоляцию коренных сообществ видов растений и животных, прошедших длительную коэволюцию [34].

Исследования показали, что успешность инвазии того или иного вида в новое место определяется пятью основными факторами:

- наличием транзитных путей («инвазионных коридоров»);
- наличием способов переноса (векторов инвазий);
- адаптивными возможностями видов-вселенцев;
- величиной прессы рекрутов (числа особей и числа вселений чужеродного вида);
- уязвимостью аборигенной экосистемы.

Инвазионный процесс превратился в глобальную экологическую проблему, не осталась в стороне и территория Российской Федерации. В результате исследований было установлено, что более уязвимыми к инвазиям являются нарушенные экосистемы. Чаще всего эти нарушения вызваны хозяйственной деятельностью человека, вследствие которой происходит разрушение или преобразование местообитаний, переэксплуатация отдельных видов биологических

ресурсов, увеличение притока биогенных элементов [9]. Для снижения риска транспортировки, распространения или случайной интродукции инвазионных чужеродных видов растений и животных, вредителей и патогенных организмов необходимо предпринимать профилактические меры. В районах, где инвазионные виды представляют значительную угрозу для естественных и критических сред обитания (например, за счет сокращения существующих сред обитания или численности пищевых объектов для местных или мигрирующих видов), рекомендуется включать обследование и анализ таких видов в оценку исходного состояния биоразнообразия [46].

Планируется идентификация и ранжирование инвазивных видов и путей их интродукции и распространения, а в отношении приоритетных инвазивных видов и путей их интродукции осуществляются меры регулирования или искоренения. Для оценки выполнения данной задачи выделен следующий набор индикаторов [20]:

- общее число выявленных чужеродных видов с разбивкой по основным таксономическим группам и средам обитания;
- доля выявленных чужеродных видов (процент к общему числу видов фауны и флоры);
- общее число выявленных инвазивных чужеродных видов с разбивкой по основным таксономическим группам и средам обитания;
- доля выявленных инвазивных чужеродных видов (процент к общему числу выявленных чужеродных видов);
- доля выявленных инвазивных чужеродных видов, в отношении которых осуществляются меры регулирования и искоренения (процент к общему числу выявленных инвазивных чужеродных видов);
- доля инвазионных коридоров, на которых установлен контроль и осуществляются меры регулирования интродукции чужеродных видов.

Одним из опасных инвазивных видов является борщевик Сосновского (рисунок 1.7), особенно быстро распространяющийся по территории именно из-за большого количества нарушенных ценозов. Это наиболее опасный инвазивный вид для всей обследуемой территории и для территории края в целом.

Для борьбы с борщевиком используют различные методы. Метод избавления от борщевика зависит от площади его распространения. При этом необходимо учесть, что использование того или иного метода не должно причинить вред редким и охраняемым видам растений, животным и человеку. Изучение территорий в границах зон воздействия хозяйственной деятельности позволяет организации выявить и осознать определенные риски, связанные с биоразнообразием. Мониторинг, осуществляемый на охраняемых территориях и террито-

риях с высокой ценностью биоразнообразия вне границ, способствует снижению рисков воздействия.

Мониторинг также позволяет организации контролировать воздействие на биоразнообразие или избегать неверных управленческих решений. Неспособность организации адекватно контролировать такие воздействия может нанести вред репутации, привести к увеличению сроков реализации инвестиционных проектов.

Нами предложены следующие приоритетные направления или стратегии программы сохранения биоразнообразия для предприятия калийной промышленности:

- сокращение прямых нагрузок на экосистемы и биоразнообразия и ведение рационального природопользования;
- мониторинг биоразнообразия с целью определения воздействия деятельности предприятия на биоразнообразие, включая как прямые, так и косвенные воздействия (положительные и отрицательные), создание комплекса мер, направленных на сохранение текущего уровня биоразнообразия и/или его повышения;
- подготовка обоснованного перечня видов растений и животных, являющихся индикаторами устойчивого состояния экосистем;
- осуществление мероприятий, направленных на сохранение и восстановление редких и находящихся под угрозой исчезновения объектов животного и растительного мира и мест их обитания;
- просветительская деятельность, выполнение методических, научно-исследовательских работ и природоохранных мероприятий.

Кроме прямого воздействия хозяйственной деятельности предприятия на биоразнообразие и компоненты экосистем отмечается косвенное влияние, в результате которого экосистема может подвергаться негативным воздействиям, что приведет к ее деградации. К косвенным воздействиям относятся строительство или использование производственных мощностей, горнодобывающих объектов, транспортной инфраструктуры; загрязнение; интродукция чужеродных видов, вредителей и возбудителей заболеваний; сокращение численности и разнообразия видов; трансформация места обитания; изменения экологических процессов, выходящие за пределы естественного диапазона колебаний (например, засоленность или изменение уровня грунтовых вод).



Рисунок 1.7 – Борщевик Сосновского

На уровне отдельного вида существенное воздействие приводит к сокращению численности популяции и/или изменению распространения в такой степени, что естественное восстановление популяции (путем воспроизводства или миграции с незатронутых территорий) за ограниченное число поколений становится невозможным. Существенное воздействие также может повлиять на индивидуальное или коммерческое использование природных ресурсов в такой степени, что благосостояние пользователей этих ресурсов будет затронуто в долгосрочной перспективе.

Поэтому для разработки рекомендаций к программе сохранения биоразнообразия необходимо учитывать весь спектр воздействий на окружающую среду и ее компоненты, такие как животный и растительный мир, почвы.

Список литературы к главе 1

1. Максимович Н.Г., Хайрулина Е.А. Основы мониторинга окружающей среды при разработке месторождения калийных солей // Инженерные изыскания. 2012. № 8. С. 8–18.
2. Бондарик Г.К., Иерусалимская Е.Н. Научные основы и методика организации режимной сети мониторинга региональных природно-технических систем // Известия вузов. Геология и разведка. 2009. № 5. С. 56–62.

3. Королев В.А. Мониторинг геологической среды. М.: Изд-во МГУ, 1995. 272 с.
4. Мониторинг и методы контроля окружающей среды: учеб. пособие в 2 ч. Ч. 2. Специальная / Ю.А. Афанасьев, С.А. Фомин, В.В. Меньшиков [и др.]. М.: Изд-во МНЭПУ, 2001. 337 с.
5. Чижова М.А., Хайруллина Л.И., Тучкова О.А. Принципы создания и структура экологического мониторинга на объектах нефтедобычи // Вестник Технологического университета. 2015. Т.18, №16. С.290–292.
6. Осипов В.А., Барях А.А., Санфиров И.А., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Гидрогеохимические условия формирования карстовых провалов на территории калийных рудников в г. Березники Пермского края // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016. № 2. С. 142–148.
7. Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Геохимические особенности развития карста на подработанной территории Врехнекамского месторождения калийных солей в г. Березники Пермского края // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016. № 3. С. 214–219.
8. Шиман М.И. Предотвращение затопления калийных рудников / М.И. Шиман. – М.: Недра, 1992. – 160 с.
9. Luo J. 3D modeling of saline groundwater flow and transport in a flooded salt mine in Stassfurt, Germany / J. Luo, H.-J. Diersch, L. Monninkhoff // Mine water Environ. – 2012. – No. 31. – P. 104–111.
10. Mozer S.P., Kowaljaw O.W., Thorikow I.J. Monitoring stanu warstwy ochronnej wodnej w kopalniach soli potasowych // Gyrnictwo i geologia. 2010. No. 5(1). P. 89–102.
11. Melnichenko A.M., Kuzina A.V. Protection of potash mines from flooding // Gornyye nauki i tekhnologii. 2010. No. 1. P. 48–56.
12. Andreichuk V.A., Eraso A., Domínguez M.C. Large sinkhole in the Verchnekamsky potash basin in the Urals // Mine water Environ. 2000. Vol. 19(1). P. 2–18.
13. Rauche H. Die Kaliindustrie im 21 / Jahrhundert. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2015. 580 p.
14. Бельтюков Г.В. Карстовые и гипергенные процессы в эвапоритах: дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Пермь, 2000. 337 с.
15. Die Flussgebietsgemeinschaft Weser <http://www.fgg-weser.de>
16. Требования к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых. М., 2000. 30 с.
17. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. 262 с.
18. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах. Л.: Недра, 1988. 279 с.

19. Горбунова К.А., Максимович Н.Г., Андрейчук В.Н. Техногенное воздействие на геологическую среду Пермской области: Препринт. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 44 с.

20. Кирюхин В.А. Прикладная гидрогеохимия: учеб. пособие /СПбГГУ. СПб., 2011. 230 с.

21. Белкин П.А. Химический состав родникового стока в районе складирования отходов разработки и обогащения калийных солей // Вестник Пермского университета. Геология. 2020. Т. 19, № 3. С. 232–240. DOI: 10.17072/psu.geol.19.3.232

22. Soil Taxonomy. Agriculture Handbook. 1999. № 436. 869p.

23. Базилевич Н.И., Панкова Е.И. Методические указания по учету засоленных почв. М., 1968. 89 с.

24. Базилевич Н.И., Панкова Е.И. Опыт классификации почв по содержанию токсичных солей и ионов // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 1972. Вып. 5 С. 36–49.

25. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. М.: ГНТУ Минприроды РФ, 1992. 30 с.

26. Конвенция о биологическом разнообразии. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/biodiv.shtml.

27. Международная финансовая корпорация Руководство № 6 «Сохранение биологического разнообразия и устойчивое управление живыми природными ресурсами» 1 января 2012 года (с изменениями и дополнениями от 27 июня 2019 г.). URL: https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/fece3f95-4a93-44a1-8414-31c122ffd21a/GN6_Russian_06272019_Final.pdf?MOD=AJPERES&CVID=nXqngIB (дата обращения: 09.10.2022).

28. Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis. Island Press, Washington, DC.

29. Розенберг Г.С., Евланов И.А., Зибарев А.Г. и др. Содержание, оценка, охрана и контроль биологического разнообразия в социо-эколого-экономических системах // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2016. № 6(140). С. 50–59.

30. Руководящие принципы разработки национальных стратегий использования мониторинга биоразнообразия. URL: https://unece.org/sites/default/files/2022-02/BIODIVERSITY%20guidelines%20revision%20RU_final.pdf (дата обращения: 09.10.2022).

31. <http://sdg.openshkola.org/goal15#targets> (дата обращения: 09.10.2022).

32. Нормативно-правовая основа сохранения биоразнообразия при заготовках древесины и рекомендации по ее применению. URL:

https://wwf.ru/upload/iblock/40f/norm_prav_biodiv.pdf (дата обращения: 09.10.2022).

33. Об утверждении методических рекомендаций по структуре и содержанию программ сохранения биологического разнообразия коммерческих организаций: Распоряжение Минприроды от 25 ноября 2019 г. № 35-р. URL: <https://rulaws.ru/acts/Rasporyazhenie-Minprirody-Rossii-ot-25.11.2019-N-35-r/> (дата обращения: 05.11.2022).

34. Стратегия и План действий по сохранению биологического разнообразия Российской Федерации мин природы 2014. URL: <https://www.cbd.int/doc/world/ru/ru-nbsap-v2-ru.pdf> дата обращения 09.10.2022).

35. <http://www.sakhalinenergy.ru/ru/hse/environment/biodiversity/> (дата обращения: 09.10.2022).

36. https://www.rosneft.ru/Investors/ESG/Publichnie_pozicii/Cohranim_planetu_na_bлаго_nineshnego_i_budushhih_pokolenij_priverzhennost_PAO_NK_Rosneft_k_sohraneniju_bioraznoobrazija/ (дата обращения 09.10.2022).

37. https://kpo.kz/ru/ustoichivoe-razvitie/okhrana-okruzhajushchei-sredy/sokhranenie-bioraznoobrazija/plan-meroprijatii-po-sokhraneniju-bioraznoobrazija__ (дата обращения 09.10.2022).

38. https://www.zarubezhneft.ru/ru/ustoichivoe_razvitie/ohrana-okruzhayushejsredy-i-promyshlennaya-bezopasnost/ (дата обращения 09.10.2022).

39. <https://www.uralkali.com/ru/sustainability/environment/> (дата обращения: 09.10.2022).

40. <https://www.uralkali.com/ru/sustainability/environment/biodiversity/> (дата обращения: 09.10.2022).

41. Решения, принятые седьмым совещанием конференции сторон конвенции о биологическом разнообразии, приложение. URL: <https://www.cbd.int/doc/decisions/COP-07/full/cop-07-dec-ru.pdf> (дата обращения: 09.10.2022).

42. Соколов В.Е., Решетников Ю.С. Мониторинг биоразнообразия в России // Мониторинг биоразнообразия. М.: ИПЭИЭ, 1997. С. 8–14.

43. Методология организации и ведения мониторинга биоразнообразия в зонах влияния ГЭС на примере крупных гидроузлов Приамурья / Подольский С.А., Игнатенко С.Ю., Игнатенко Е.В., Тиунова Т.М., Павлова К.П., Коцюк Д.В., Антонов А.И., Михеев П.Б., Шмигирилов А.П., Борисова И.Г., Старченко В.М. URL: <file:///C:/Users/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C/Downloads/metodologiya-organizatsii-i-vedeniya-monitoringa-bioraznoobrazija-v-zonah-vliyaniya-ges-na-primere-krupnyh-gidrouzlov-priamurya.pdf> (дата обращения: 09.10.2022).

44. <http://kubsau.ru/upload/iblock/049/0495db01c6b42e513711bdb7aea88f34.pdf>(дата обращения: 09.10.2022).

45. Исаева С.Э., Оказова З.П., Гаппоева В.С. Место биоиндикации в системе экологического мониторинга // Успехи современной науки. 2017. Т.1. №8. С. 130–133.

46. Социально-экологические принципы операций ИПФ СЭСб «Сохранение биологического разнообразия и устойчивое управление живыми природными ресурсами». URL:<https://thedocs.worldbank.org/en/doc/4726615572399011850290022019/original/ESFGN6russian.pdf> (дата обращения: 09.10.2022).

ГЛАВА 2. ВТОРИЧНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ И ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Основной объем промышленных отходов концентрируется в относительно небольшом числе регионов в местах добычи полезных ископаемых, а также в районах металлургических, химических, нефтехимических, деревообрабатывающих, целлюлозно-бумажных и некоторых других производств. Так, на территории РФ подавляющая часть накопленных отходов располагается в Сибирском (18,1 млрд т, или более 57 % общероссийской величины) и Уральском (6,9 млрд т, или 22 %) федеральных округах. Общая величина накопленных и учтенных отходов производства и потребления в целом по России составляла на конец 2015 г. примерно 31,5 млрд т, а количество образовавшихся отходов с 2006 по 2015 г. возросло на 44 % [1]. Основная часть накопленных и идентифицированных отходов относится к V классу опасности, т.е. неопасным отходам (31,1 млрд т, или почти 99 % их общего объема).

Общая динамика образования отходов показывает тенденцию ежегодного устойчивого увеличения их объема. За период с 2010 по 2019 г. совокупная масса отходов, образованных в Российской Федерации, увеличилась с 3725 млн т до 7750,9 млн т [2]. Лидирующей по количеству отходов отраслью является добыча полезных ископаемых (преимущественно угледобыча).

На протяжении последних десятилетий популярна экологически и экономически оправданная концепция вторичного использования отходов. С 1996 г. в целях реализации Закона № 89-ФЗ «Об охране окружающей природной среды» в России существует Государственная программа «Отходы», основная цель которой – сокращение загрязнения окружающей среды отходами и экономия природных ресурсов за счет максимально возможного вторичного вовлечения отходов в хозяйственное использование. Программа предусматривает снижение объемов образования отходов на основе внедрения малоотходных и безотходных технологий, сокращение видов и объемов токсичных и опасных отходов на основе применения новых технологических решений, повышение уровня использования отходов, их экологически безопасное размещение и др.

В основах государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 г. в части обращения с отходами предполагается раздельный сбор отходов, жёсткие санкции за ненадлежащую утилизацию, поэтапное введение запрета на захоронение отходов, пригодных к вторичной переработке. В ряде регионов разработаны стратегии обращения с отходами, которые предполагают финансирование преимущественно за счёт внебюджетных средств. В частности, в Пермском крае в 2016 г. краевым Министерством стро-

ительства и жилищно-коммунального хозяйства утверждена территориальная схема обращения с отходами производства, в том числе коммунальными.

Достаточная проработка вопросов вторичного использования отходов, прежде всего в строительной отрасли, находит отражение в образовательном процессе. Во многих технических вузах, как правило, для студентов строительных специальностей читаются лекционные курсы по комплексному использованию минерального сырья и отходов промышленности. В основе концептуального подхода к вторичному использованию отходов лежит принцип поступательного истощения минерально-сырьевых ресурсов, а также появление новых технологий переработки складированных отходов, что делает отходы пригодными по количеству и качеству для промышленного использования. В рассматриваемом ключе функционирует и популярный зарубежный подход – *urbanmining*, когда городские территории и техногенные отвалы рассматриваются как месторождения будущих ресурсов с оценкой отложенного ресурсного потенциала уже на этапе проектирования производства [3]. Лидерами в реализации этого направления являются Германия, Япония, Швейцария и Австрия [4, 5].

Ниже детально рассмотрены некоторые реализованные авторами направления вторичного использования отходов освоения месторождений полезных ископаемых, включая технологии очистки сточных вод при разработке драгоценных месторождений.

2.1. Вторичное использование отходов

Низкий уровень комплексного использования минерального сырья и технологические потери руд при добыче и переработке приводят к поступлению в объекты размещения отходов ценных компонентов. Многие техногенные массивы объектов размещения отходов горной добычи являются потенциальными техногенными месторождениями строительных материалов, ценных металлов, химического сырья и др. [6–13].

С целью оценки перспектив комплексного использования авторами проведены **исследования хвостов мокрой магнитной сепарации АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат» (ЕВРАЗ КГОК) [14].** Исходные титаномагнетитовые руды месторождений Качканарского рудного поля (Свердловская область), разрабатываемые ЕВРАЗ КГОК, подвергаются дроблению и постадийному сухому и мокрому обогащению с применением магнитной сепарации. Конечным полезным продуктом сепарации является железованадиевый концентрат. Складирование хвостов мокрой магнитной сепарации осуществляется в хвостохранилище, в которое ежегодно доставляется порядка

45 млн т хвостов. Транспорт хвостов осуществляется в форме пульпы с содержанием твердой фазы до 10 %. В настоящее время предприятием реализуется проект строительства нового отсека хвостохранилища с применением прогрессивной технологии сгущения хвостов до пастообразного состояния с содержанием твердого остатка в пределах 65–70 %, что позволит существенно сократить площадь размещения отходов и воздействие на водные объекты.

Значительные территории, занимаемые шламо- и хвостохранилищами, а также необходимость сокращения их негативного влияния на окружающую среду ставят задачи комплексного использования отходов. Перспективным направлением использования отдельных многотоннажных отходов горной добычи являются технологии каменного литья, среди которых очень активно развивается производство минеральных волокон, обозначаемых на практике понятием «базальтовые волокна», «базальтовые технологии» [15].

Базальтовые волокна обладают повышенными физико-химическими свойствами в сравнении с традиционными стеклянными волокнами, позволяют создавать широкий ассортимент различных материалов строительного и технического назначения. Наибольшее применение они находят в производстве строительных материалов – конструкционных и облицовочных пластиков, армирующих и штукатурных сеток, базальтопластиковой арматуры, щелочестойких материалов, базальтовых матов и ткани для армирования бетона и термоизоляции зданий и др. Базальтовые волокна также широко используются в различных областях промышленности в качестве тепло- и звукоизоляции, конструкционных материалов, негорючих композиционных материалов, в химической и нефтехимической промышленности – для производства химически стойких труб, защитных покрытий, в качестве фильтров для очистки газов, промышленных и коммунальных стоков [16].

В роли высококачественного сырья для производства базальтового волокна могут быть использованы некоторые виды отходов горнодобывающих предприятий, особенно после их дополнительной обработки [17–19]. В частности, благоприятные предпосылки имеются для использования с этой целью отходов мокрой магнитной сепарации титаномагнетитовых руд Качканарского рудного поля [15]. Объектом наших исследований являлись хвосты мокрой магнитной сепарации. Для детального изучения вещественного состава и последующей дополнительной обработки из хвостохранилища ЕВРАЗ КГОК были отобраны пробы массой до 7 кг. Исследования были проведены на кафедре минералогии и петрографии Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ) и включали комплексирование целого ряда методов.

Гранулометрический анализ проб показал присутствие заметного количества (более 20 %) гравийных зерен, представленных сростками и обломками

пород. Для более надежного определения минерального состава отходов и с целью максимального раскрытия сростков с высвобождением в виде свободных частиц полезного компонента (титаномагнетита) они были подвергнуты дроблению до крупности частиц менее 0,2 мм.

По данным оптического минералогического анализа, полученные продукты дробления хвостов мокрой магнитной сепарации представлены в основном клинопироксенами (разностями диопсида) – содержание 42–74 %. В меньшем количестве присутствуют плагиоклазы – 7–25 %, минералы группы эпидота (в том числе цоизит и клиноцоизит) – 5–15 %, амфиболы (обыкновенная роговая обманка и в меньшем количестве актинолит) – 2–15 %, титаномагнетит – 1–2 %, оливин – 1 % и др. Обычно в долях процента находятся хлориты, сульфиды, гранаты, апатит, ильменит, очень мало биотита, шпинели (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Минеральный состав продуктов дробления хвостов мокрой магнитной сепарации Качканарского ГОКа (–0,2 мм), %

Минерал	Минералогический анализ			Дифрактометрический анализ		
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
Пироксены	74,0	42,0	74,0	75,87	67,85	71,24
Плагиоклазы	7,0	25,0	10,0	8,41	13,59	16,91
Гр. эпидота	6,0	15,0	5,0	5,08	6,39	5,68
Амфиболы	2,0	15,0	7,0	8,65	11,12	5,52
Магнетит	2,0	1,0	1,0	1,38	0,35	0,37
Оливин	1,0	1,0	1,0	0,70	0,70	0,28
Хлориты	1,0	–	–	–	–	–
Гетит	–	1,0	0,5	–	–	–
Сульфиды	0,1	+	0,3	–	–	–
Гранаты	0,1	–	0,5	–	–	–
Ильменит	0,1	–	–	–	–	–
Апатит	0,1	–	–	–	–	–
Прочие	6,6	–	0,7	–	–	–
Сумма	100	100	100	100	100	100

Контрольное определение минерального состава продуктов выполнено с применением дифрактометрического метода. Анализ проведен на порошковом дифрактометре 2D PHASER фирмы Bruker (ФРГ) с использованием медного анода, скорость набора импульсов 0,1 с, диапазон шкалы 2θ – от 5 до 75°, длительность одного анализа – 15 мин. Для расчета количественных содержаний минералов использована программа TOPAS.

Данные дифрактометрического анализа в некоторых случаях существенно расходятся с таковыми, полученными традиционным минералогическим мето-

дом. Причиной является значительное количество сростков (например, пироксенов и эпидота с плагиоклазами и амфиболами) и микровключений минералов. Дифрактометрический анализ позволяет определить массовую долю каждого минерального вида, в то время как минералогический метод не рассчитан на точную диагностику сростков и выделение микровключений.

Химический состав дробленого материала хвостов мокрой магнитной сепарации определен рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре S8 TigerBruker с использованием программы Silicates. Он оказался довольно однородным во всех пробах, несмотря на заметное различие их минерального состава (таблица 2.2). Причиной является близость химического состава преобладающих в продуктах силикатных минералов (пироксенов, амфиболов, эпидота, плагиоклазов). Преобладающими компонентами в продуктах дробления хвостов являются (в мас. %) кремнезем (44,41–45,31), оксиды кальция (20,12–22,51), магния (13,32–14,16), железа (9,49–10,40) и глинозем (6,29–7,94), на долю которых приходится более 95 % минеральной массы. Модуль кислотности (отношение содержания суммы SiO_2 и Al_2O_3 к сумме CaO и MgO), который является определяющим критерием пригодности сырья для производства всех видов базальтовых изделий – непрерывного базальтового волокна, базальтовой ваты, базальтового литья, по данным химического анализа составил 1,4–1,6. Эти значения явно недостаточны для того, чтобы рекомендовать хвосты мокрой магнитной сепарации предприятия в качестве сырья для получения качественного базальтового волокна, для которого рекомендованные значения модуля кислотности находятся в диапазоне 4,7–6,5 [20].

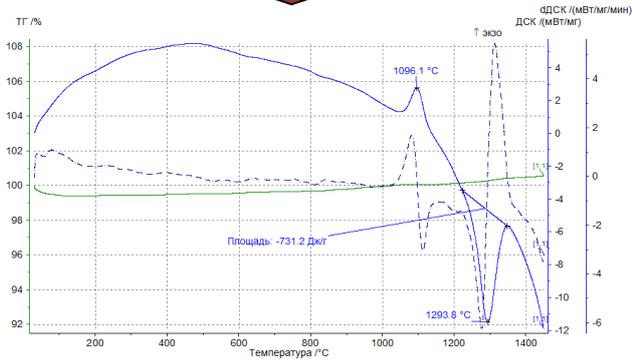
Моделирование процесса плавления описанных выше продуктов дробления хвостов мокрой магнитной сепарации проведено с использованием синхронного термоанализатора STA 409 PCLuxx фирмы NETZSCH (ФРГ). В рамках эксперимента небольшая навеска подвергалась нагреву до температуры 1430 °С, что обеспечивало полное его расплавление и одновременно позволяло изучить различные термические эффекты, как в ходе нагрева, так и при последующем охлаждении расплава (рисунок 2.1, таблица 2.3).

Проведенные эксперименты показали, что исследованные продукты хвостов характеризуются небольшой потерей массы в процессе нагревания (менее 5 %). Процесс плавления породообразующих минералов начинается при температуре 1200–1223 °С и проявляется на термограммах в виде эндозффекта с ориентировочными энергетическими затратами в пределах от –479...731 Дж/г вещества.

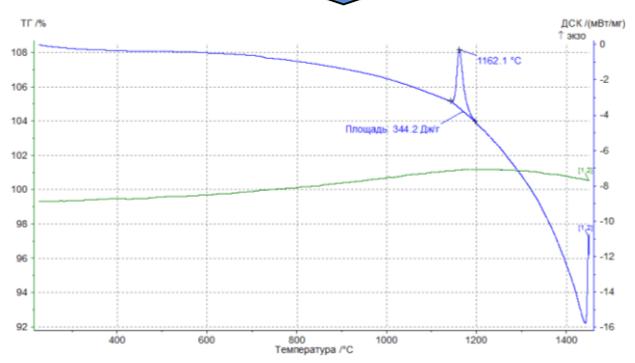
Таблица 2.2 – Химический состав исходных проб хвостов мокрой магнитной сепарации Качканарского ГОКа, мас. %

Компонент	Проба № 1	Проба № 2	Проба № 3
SiO ₂	45,31	44,77	44,41
TiO ₂	0,803	0,722	0,834
Al ₂ O ₃	6,29	7,94	6,99
FeO*	9,57	10,40	9,49
MnO	0,121	0,117	0,118
CaO	22,51	20,12	20,80
MgO	14,16	13,32	14,07
Na ₂ O	0,730	1,202	1,030
K ₂ O	0,045	0,072	0,051
P ₂ O ₅	0,011	0,020	0,015
S	0,021	0,026	0,020
Sc	0,0114	0,0105	0,0111
Cl	0,0100	0,0100	0,0087
Ba	0,0008	0,0089	0,0129
Cr	0,0058	0,0104	0,0057
V	0,0288	0,0320	0,0284
Sr	0,0095	0,0202	0,0148
Cu	0,0025	0,0027	0,0017
Zn	0,0040	0,0041	0,0039
Pb	0,0009	0,0010	0,0010
Rb	0,0002	0,0002	0,0002
Zr	0,0049	0,0055	0,0052
Ga	0,0009	0,0011	0,0010
Ni	0,0038	0,0042	0,0037
La	0,0008	0	0
Nb	0,0011	0,0011	0,0011
W	0,0055	0,0050	0,0150
Co	0,0034	0,0034	0,0038
As	0,0010	0,0010	0,0008
Sb	0,0006	0,0009	0,0010
Y	0,0007	0,0007	0,0006
Sn	0,0005	0,0009	0,0009
Модуль кислотности $\frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$	1,4	1,57	1,47

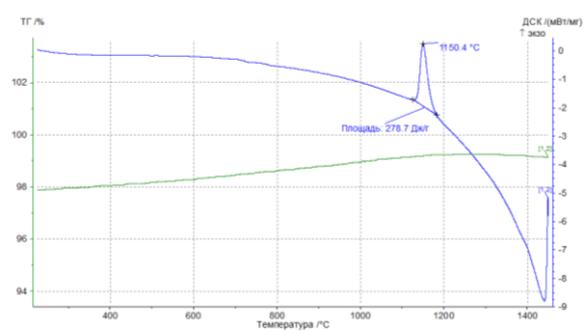
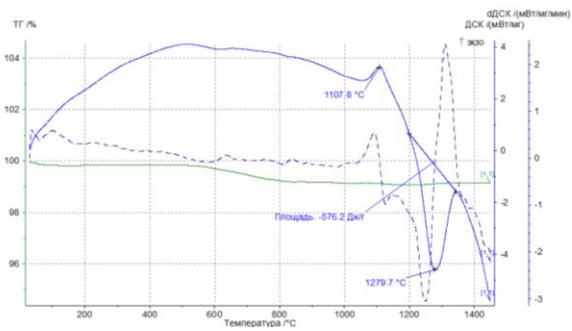
Термограммы нагрева



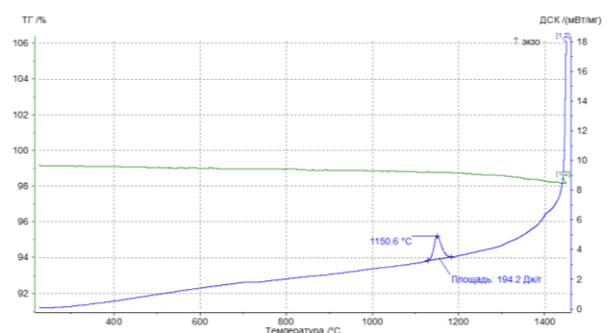
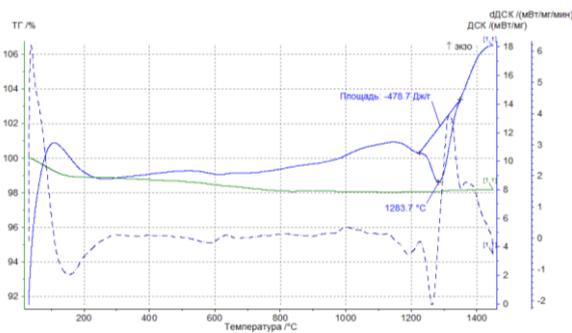
Термограммы охлаждения



Образец 1



Образец 2



Образец 3

Рисунок 2.1 – Термограммы процесса плавления и охлаждения хвостов мокрой магнитной сепарации Качканарского ГОКа

Таблица 2.3 – Характерные эффекты на термических кривых хвостов мокрой магнитной сепарации Качканарского ГОКа

Номер и характер пробы	Процесс нагревания				Процесс охлаждения	
	Начало плавления, °С	Пик плавления, °С	Конец плавления, °С	Энергозатраты, Дж/г	Пик кристаллизации, °С	Энергозатраты, Дж/г
Проба 1	1223	1293,8	1348	-731,2	1162,1	+344,2
Проба 2	1200	1279,7	1343	-576,2	1150,4	+278,7
Проба 3	1223	1283,7	1348	-478,7	1150,6	+194,2
Проба 2, хвосты ВШ	1240	1283,7	1347	-442,7	1149,8	+167,5
Проба 2, Немагнитный остаток ВШ	1223	1265,7	1336	-598,3	1156,9	+128

Последующее охлаждение полученного расплава со скоростью 10 °С в минуту проводилось с целью исследования процессов его кристаллизации. Анализ кривых охлаждения указывает на наличие в расплаве нежелательного эффекта кристаллизации вещества, создающего в выпускаемой продукции зоны неоднородности, при температуре 1150–1162 °С. В технологических процессах на действующих предприятиях, где используется качественное сырье, такие эффекты отсутствуют.

Для повышения качества сырья в данном случае использована гравитационная сепарация. Моделирование этого процесса проведено в лаборатории на винтовом шлюзе с диаметром желоба 160 мм. Исходный дробленый обломочный материал хвостов мокрой магнитной сепарации был обогащен на винтовом аппарате с получением нескольких продуктов: концентрата (4,5–7,5 %), промпродукта (60–80 %) и хвостов.

В составе концентрата оказались в основном титаномагнетит, ильменит и сульфиды. Кроме того, в нем обнаружены золото, касситерит, интерметаллиды меди и цинка, самородная медь и сульфиды мышьяка. Титаномагнетит может быть легко выделен из него магнитной сепарацией и добавлен к основному продукту предприятия. Промпродукт по составу является в основном пироксеновым, а хвосты – полевошпатовыми.

Термические испытания с некоторыми полученными продуктами гравитационного обогащения показали, что они более пригодны в качестве сырья для получения базальтового волокна. В частности, процесс плавления хвостов гравитационного обогащения сопровождается более низкими энергетическими затратами по сравнению с аналогичным процессом для исходного продукта: они

снизились примерно на 23 %. В то же время для них оказалась существенно менее выраженной кристаллизация при охлаждении.

Причинами улучшения качества сырья при гравитационном обогащении продуктов являются удаление тугоплавких компонентов (титаномагнетита, хромита, ильменита и др.), снижение содержания железа, хрома, титана и ряда других нежелательных примесей. Попутно удаляются из продуктов и сульфиды, содержащие серу и токсичные элементы (например, мышьяк).

Проведенные исследования демонстрируют опыт ПГНИУ в перспективном направлении комплексного использования сырья, которое решает задачу утилизации отходов многих горнодобывающих предприятий и обогатительных производств, попутно охватывая проблемы охраны окружающей среды. Рекомендуемая технологическая схема использования хвостов мокрой магнитной сепарации Качканарского ГОКа приведена на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Технологическая схема переработки хвостов мокрой магнитной сепарации Качканарского ГОКа

Для использования рассматриваемых отходов может быть применен сравнительно дешевый метод гравитационного обогащения на винтовом сепараторе с получением коллективного концентрата, промпродукта и хвостов. В отличие от описанной выше лабораторной схемы обогащения, в производственных условиях рекомендуется применить более сложную схему гравитационного обогащения с получением мономинеральных продуктов. На сепараторе может быть поставлено два отсека, что позволило бы получить концентрат с выходом 1–2 %, промпродукт с выходом 70–80 % и хвосты.

В *концентрате* практически будут присутствовать в основном зерна титаномагнетита. Он может быть использован как полезный продукт с повышенным содержанием ванадия. Качество такого продукта будет существенно повышено при дополнительном обогащении концентрата с применением магнитной сепарации. Оставшийся материал концентрата будет содержать сульфиды, интерметаллиды меди, олова и цинка, платиноиды, золото, касситерит с ураном, циркон с гафнием, ильменит с повышенным содержанием ванадия и ряд других полезных минералов. Предлагается возможность получения платинового и золотосодержащего продукта.

Промпродукт гравитационного обогащения будет содержать практически только пироксены с примесью эпидота, оливина, амфиболов. Он может оказаться ценным сырьем для изготовления минерального волокна, поскольку содержит мало железа и других вредных для каменного литья примесей.

Наконец, *хвосты* гравитационного обогащения будут содержать в основном плагиоклазы. Их применение возможно в качестве сырья для изготовления фарфора, фаянса, керамических изделий и др.

Ниже рассмотрены возможности расширения ресурсной базы Пермского края за счет использования отходов местных предприятий – АО «Березниковский содовый завод», ПАО «Уралкалий», а также разработки Кизеловского угольного бассейна.

Горнодобывающая отрасль, как правило, технологически совмещается с химической или металлургической переработкой сырья. Предприятием указанного профиля является АО «Березниковский содовый завод» (БСЗ), который осуществляет выпуск соды аммиачным методом и является одним из крупнейших производителей кальцинированной соды в России. Исходным сырьем для производства являются известняки Чаньвинского месторождения и каменная соль Верхнекамского месторождения, используемая для приготовления рассолов.

Аммиачный метод основан на взаимодействии насыщенного водного раствора хлористого натрия и углекислого газа в присутствии аммиака с образованием бикарбоната натрия и последующей его кальцинацией. Источником для

получения раствора хлористого натрия служат галитовые отходы калийного производства ПАО «Уралкалий». В 2015 г. на БСЗ внедрена упрощенная схема производства раствора хлористого натрия. Перевозка галитовых отходов до фабрики приготовления рассола заменена на гидротранспорт, что позволило уменьшить количество используемого оборудования и снизить себестоимость раствора. На узле дробления установили станцию приготовления пульпы, где вода и галитовые отходы смешиваются, образуя пульпу, которую перекачивают на фабрику приготовления рассола. В ходе перекачки пульпы в трубопроводе отходы дорастворяются с образованием раствора хлористого натрия. Таким образом, ежегодно утилизируется до 1 млн т галитовых отходов [21].

Отходы Чаньвинского карьера известняков. Чаньвинское месторождение (Александровский район Пермского края) разрабатывают карьерным способом, его ежегодная проектная мощность 5 млн т. Добываемый известняк большей частью используется в виде «химического камня» в производстве кальцинированной соды. Вредным компонентом в составе карбонатного сырья является глина, которая присутствует на месторождении во многих формах, составляя основную часть вскрышных пород и материала, заполняющего различные полости внутри массива известняков. Общее количество глины на месторождении довольно велико и по предварительным расчётам составляет порядка 25–35 млн т. При разработке месторождения глинистый материал концентрируется в отвале, который, по существу, представляет собой техногенное месторождение глины [22].

Результаты гранулометрического (таблица 2.4), минералогического и силикатного анализов (таблица 2.5), общего химического анализа водной вытяжки, а также опытов по определению сушильных свойств, параметров набухания и показателей пластичности крупнообъемной пробы глин из отвала рассматриваемого месторождения дают основание утверждать, что технологические свойства глины и ее химический состав удовлетворяют требованиям к сырью для производства керамического кирпича и камней.

Таблица 2.4 – Гранулометрический состав глин отвала Чаньвинского карьера известняков, мас. %

>10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001
2,8	3,2	3,5	1,8	2,2	2,5	4,8	5,2	15,5	5,5	12	41

Таблица 2.5 – Минеральный и химический состав глин отвала
Чаньвинского карьера известняков, мас. %

Минералы	Проба		Соединения	Проба	
	О-1	О-2		О-1	О-2
Каолинит	20	20	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	60,20/18,28	56,36/17,89
Монтмориллонит	30	25	Fe ₂ O ₃ /FeO	6,68/0,50	9,53/0,36
Гидрослюды	8	9	TiO ₂	0,71	0,80
Хлорит	<5	0	MnO	0,08	0,12
Кальцит	3	4	MgO/CaO	1,37/1,83	1,22/2,68
Кварц	26	30	Na ₂ O/ K ₂ O	0,31/1,55	0,16/1,45
Полевые шпаты	2	3	P ₂ O ₅	0,19	0,19
Гетит	4	7	S (общая)	<0,03	<0,03
Гематит	2	2	CO ₂	0,65	1,30

Однако глины содержат крупные карбонатные включения в количествах, значительно превышающих нормы, вследствие чего без дополнительной обработки (удаления карбонатных частиц фракции более 0,5 мм) не могут быть использованы для производства керамических изделий. Тем не менее изученные глины без какой-либо предварительной подготовки можно использовать в цементной промышленности для получения (в смеси с карбонатными породами) портландцементного клинкера и для рекультивации породных отвалов шахт Кизеловского угольного бассейна. Также после выделения песков глины могут быть использованы как материал для производства адсорбентов и буровых растворов.

Отходы Березниковского содового завода. В процессе производства соды на БСЗ образуется большое количество отходов. При аммиачном способе получения соды в процессе извлечения аммиака образуется хлорид кальция, который с одной стороны, является важным побочным продуктом, с другой стороны составляет большую часть отходов производства. В шламонакопители отходы поступают в виде пульпы, в которой преобладает жидкая фаза (до 98 %). Шламонакопитель расположен на северо-западной окраине г. Березники, на левом берегу Камского водохранилища. Отходы БСЗ складированы в действующей и старой картах шламонакопителя, которые ограничены дамбами из щебня и дресвы известняка. Площадь действующей карты составляет 155 га, старой – около 89 га. По данным бурения и фондовым материалам, мощность накопленного шлама увеличивается в северо-восточном направлении от 2,5 до 15 м. По ориентировочным расчетам, объем шлама в настоящее время превышает 10 млн м³.

Жидкая фаза пульпы из производственного цикла характеризуется сильнощелочной средой (рН = 12,3) и минерализацией 179 г/л. В составе содержит

ся значительное количество растворенных ионов – хлоридов, сульфатов, натрия и калия, аммония, миграционная способность которых достаточно велика. В старой карте эти компоненты «вымыты» из складированного шлама за счет инфильтрации атмосферных осадков и отсутствия свежих поступлений с пульпой (таблица 2.6). Отходы старой карты изучались более детально: проведено полевое определение консистенции и лабораторное определение влажности отходов, рентгеноструктурный и спектральный анализы, а также анализ водной вытяжки отходов (таблица 2.7).

Таблица 2.6 – Химический состав жидкой фазы пульпы отходов БСЗ [23], в мг/л

Место отбора	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_2^-	CO_3^{2-}	Ca^{2+}	Na^++K^+	NH_4^+	Минерализация	pH
Выпуск из производственного цикла	61,0	7 204,6	106 359,0	3,6	н.о.	41 082,0	25 858,9	204,0	180 773,1	12,3
Западная часть действующей карты	36,6	1 883,8	15 251,9	0,4	51,0	5 511,0	45 35,4	13,5	27 283,6	11,1

Примечания: н.о. – не обнаружено. NO_3^- , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} анализом не обнаружено.

Таблица 2.7 – Химический состав водной вытяжки отходов с поверхности из действующей и старой карт шламонакопителя БСЗ, в мг/кг (100 г отходов на 500 мл дистиллированной воды) [23]

Место отбора	Влажность, %	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	NO_2^-	Ca^{2+}	Na^++K^+	NH_4^+	Сумма солей	pH
Действующая карта	82,9	488,1	12348,7	11912,2	90,0	10,5	10822,1	4184,1	13,0	39868,7	11,8
Старая карта	69,9	30,5	305,0	322,6	24,5	2,9	300,6	78,2	5,4	1069,7	10,4

Примечания: CO_3^{2-} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} анализом не обнаружено.

По данным рентгеноструктурного анализа, преобладающим минералом складированных отходов БСЗ является кальцит, находящийся в кристаллическом (до 58 %) и в скрытокристаллическом состояниях (до 70 %). Общее его количество находится в пределах 79–97 %, причем наибольшее содержание характерно для верхнего слоя, мощностью 1–1,5 м. Помимо кальцита в шламе в небольших количествах также присутствуют другие карбонаты – арагонит (1–2 %), доломит (до 1 %). Кроме того, в значительных количествах содержится гидроксид кальция [23]. Для детального определения состава минеральных примесей карбонатную и щелочную составляющую шлама (кальцит, арагонит, портландит и др.) растворили в HCl. Оставшаяся часть шлама (1–6 %) состоит

из геленита – алюмосиликата кальция (30–31 %), и кварца (10–17 %), присутствуют гематит, плагиоклаз, микроклин.

Особенности химического состава и агрегатное состояние рассмотренных отходов БСЗ создают возможность *использования их для природоохранных мероприятий*. В частности, для нейтрализации кислых шахтных вод и стоков породных отвалов Кизеловского угольного бассейна, которые являются одной из острых экологических проблем Пермского края. Согласно опубликованным данным объем поступления основных загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты Кизеловского угольного бассейна в 2016 г. составил (в т/год): сульфатов –44 888; общего железа –15 896; алюминия –535; марганца –172; цинка –4,43 [24]. При этом анализ данных многолетних наблюдений указывает на зависимость объемов поступлений загрязняющих веществ от количества атмосферных осадков. В отдельные годы возможно увеличение поступлений в диапазоне 30–50 % от средних многолетних значений.

Очистка шахтных вод на основе механизма геохимического барьера возможна с применением в качестве реагента отходов БСЗ [25, 26]. В результате нейтрализации рН шахтной воды повышается с 2,5 до 6–7, что удовлетворяет требованиям нормативов всех видов водопользования. В шахтных водах значительно снижается содержание основных загрязнителей. Эффективность очистки по железу и алюминию составляет 90–95 %. Содержание бериллия, цинка, никеля, кобальта, меди, превышающих ПДК в шахтных водах, снижается до значений, удовлетворяющих требованиям для водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [27]. Образующийся осадок можно использовать в качестве добавок к сырью на металлургических и цементных заводах. Предлагаемый метод эффективен, прост в применении, не требует значительных капитальных затрат. Кроме того, результаты первых предварительных лабораторных исследований и экспериментов показали возможность использования отходов БСЗ для нейтрализации стоков медедобывающих шахт.

Сотрудниками Пермского университета разработан метод использования отходов БСЗ для рекультивации сернокислых ландшафтов. В предложенном методе осуществляется совместное использование отходов БСЗ и активного ила ПАО «Метафракс» [25, 28, 29].

В Пермской сельскохозяйственной академии проведены исследования по возможности использования отходов БСЗ для раскисления почв [30]. Удалось добиться улучшения агрохимических свойств и плодородия почв, повышения урожайности культур. Твердые отходы содового производства перспективны для использования в составе сухих строительных смесей в качестве наполнителя, так как имеют подходящий гранулометрический и химический состав. Про-

блема подготовки отходов заключается в удалении из их состава растворимых хлоридов и влаги. При хранении шлама «белого моря» под воздействием атмосферных осадков происходит вымывание растворимых хлоридов из поверхностного слоя, содержание становится допустимым для строительных материалов. Специалистами БСЗ была изучена кинетика сушки шлама: при снижении влагосодержания ниже критического (19–22 %) шлам становится сыпучим. На основании этого выбрано подходящее оборудование, предложено использовать барабанную сушилку, а в качестве сушильного агента – топочные газы от сжигания природного газа. Перспективно проведение исследований по использованию дистиллерной жидкости (пульпы) в производстве асбестоцементных изделий, тампонажных композиций нефтяных скважин, расширяющих добавок для портландцемента, а также для получения пероксида кальция [31, 32].

Солеотходы Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Современная мировая калийная промышленность ежегодно производит 40–42 млн т продукции, на которую приходится 100–120 млн т твердых отходов в виде галитовых хвостов и глинистых шламов и примерно такое же количество избыточных рассолов [33].

Согласно данным официального доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края» в регионе на конец 2017 г. накоплено 816 млн т отходов, в том числе на объектах ПАО «Уралкалий» – 612,2 млн т. Общая площадь объектов размещения отходов калийной промышленности в Пермском крае, по данным анализа космических снимков 2017–2018 гг., составляет более 1300 га и включает объекты ПАО «Уралкалий» и ООО «ЕвроХим – Усольский калийный комбинат».

Одним из рекомендованных государственным стандартом (ГОСТ Р 55100–2012) в области ресурсосбережения способом обращения с отходами горнодобывающей отрасли с учетом доступности технологии является закладка выработанного пространства подземных горных выработок. Это мероприятие рассматривается как одна из стадий технической рекультивации, обеспечивающая снижение затрат на транспорт отходов, платежей за изъятие земель, воздействия на компоненты окружающей среды [34].

Обобщенные данные по ПАО «Уралкалий» показывают, что закладочные работы являются основным способом использования крупнотоннажных отходов калийной промышленности с направленной тенденцией роста в последние годы (таблица 2.8). Указанное обусловлено эффективностью обеспечения экологической безопасности отработки солей – сочетанием защиты подземного пространства рудников от затопления, уменьшения оседания земной поверхности, сокращения площадей солеотвалов и шламохранилищ, расширение которых требует значительных финансовых вложений. Разрабатываемые техноло-

гии твердеющей закладки [35] направлены и на повышение извлечения солей за счет сокращения междукамерных целиков.

Таблица 2.8 – Образование и использование отходов ПАО «Уралкалий» по данным докладов «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края»

Год	Объем образования, тыс. т	Использование для приготовления раствора NaCl, тыс. т	Гидрозакалка галитовых отходов и глинисто-солевых шламов, тыс. т	Итого использование образующихся отходов, %
2017	32 697	990	13 480	44,25
2016	30 153	910	11 306	40,52
2015	31 272	910	9 560	33,48
2014	34 767	857	6 010	19,75
2013	28 145	842	10 000	38,52
2012	26 705		10 200	38,20
2011	30 059	400	8 300	28,94

В рамках реализации подходов комплексного использования сырья при производстве калийных удобрений осуществляется приготовление рассолов для нужд содового производства, производство технической соли и отгрузка неочищенной технической соли. Шламовые составляющие могут быть использованы в качестве добавок к цементным растворам и бетонам. Кроме того, запатентованы подходы по извлечению ряда ценных компонентов – золота, платины и других благородных металлов, алмазов, лечебных грязей [36]. В глинисто-солевых шламах СКРУ-1 в существенных количествах установлен Sc [37], который востребован ядерной энергетикой, космической и авиационной промышленностью. Элемент связан с минералами кальция (гипсом, доломитом, апатитом) нерастворимого осадка солей.

За последнее десятилетие значительно вырос спрос на литий, поскольку этот элемент стал ключевым фактором для развития целого ряда промышленных продуктов, особенно аккумуляторов для электронных устройств и электромобилей. Кроме того, отмечена возрастающая потребность в этом элементе со стороны стекольной и керамической промышленности, обусловленная сокращением энергетических затрат и облегчением обработки продукции при использовании Li [38]. При этом в последние 50 лет значительно изменилась структура природных источников его добычи, и в настоящее время до 70 % извлечения этого элемента за рубежом осуществляется за счет эксплуатации рассолов бессточных соляных озер. Все указанное обуславливает перспективность

исследования солеотходов и глинисто-солевых шламов на содержание этого металла.

Отвалы Кизеловского угольного бассейна. Все большее внимание при изучении возможности использования отходов горнодобывающей отрасли уделяется редким и редкоземельным элементам (РЗЭ). Привлекательность извлечения РЗЭ из отходов горной добычи связана с их низкими концентрациями в практически всех источниках сырья, а технологически процесс их извлечения из отходов горной добычи не существенно отличается от традиционных способов.

РЗЭ являются важным и крайне дефицитным видом сырья. Уникальные свойства этих веществ (магнитные, люминесцентные, химические) определили их широкое использование в высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как производство компьютерной техники и электроники, магнитов, аккумуляторов, каталитических нейтрализаторов. Кроме того, редкоземельные элементы широко применяются в нефтяной промышленности, а также являются важным элементом при разработке «зеленых» технологий, таких как электрообогрев, производство ветровых турбин, энергоэффективное освещение и др. [39].

Международный союз теоретической и прикладной химии (IUPAC) объединяет под названием РЗЭ 17 химических веществ, в том числе 15 элементов в группе лантаноидов, а также скандий и иттрий [40]. Несмотря на свое название, редкоземельные элементы характеризуются достаточно высоким содержанием в земной коре. Например, средние глобальные содержания церия в осадочных горных породах (Ce – 75 мг/кг) выше содержания цинка (Zn – 52 мг/кг), а средние содержания лантана и иттрия (La – 48 мг/кг, Y – 31 мг/кг) сопоставимы с содержанием меди (Cu – 36 мг/кг) [41]. При этом важнейшей особенностью РЗЭ является высокая степень рассредоточенности в земной коре, малое количество месторождений. В этом отношении к РЗЭ близки такие редкие элементы, как скандий, галлий, германий.

Большая часть мирового производства РЗЭ в настоящее время связана с добычей и переработкой четырех минералов: бастнезит, монацит, ксенотим и лопарит. Эти минералы в основном связаны с магматическими породами (щелочными породами и карбонатитами) и продуктами их выветривания, которые характеризуются весьма ограниченным распространением. На конец второго десятилетия XXI в. наибольшую долю мировой добычи и переработки РЗЭ удерживают производители из Китая (85–90 %) [39, 42].

Значительная потребность в РЗЭ и редких металлах, высокая цена этих веществ на мировом рынке способствовала проведению большого числа исследований альтернативных источников редких элементов.

Одним из таких источников могут выступать угольные месторождения. Исследования В.В. Середина и С. Даи показали, что для многих угольных месторождений характерны высокие содержания РЗЭ как в самих углях и угольных золах, так и во вмещающих породах и породах фундамента некоторых угольных бассейнов [43]. Исследователи выделили четыре генетических типа обогащения угольного бассейна РЗЭ:

- ✓ терригенный тип (поступление РЗЭ с поверхностными водами);
- ✓ туфогенный тип (поступление РЗЭ с вулканическим пеплом);
- ✓ инфильтрационный (метеорный) тип (поступление с грунтовыми водами);
- ✓ гидротермальный тип (поступление РЗЭ с восходящими потоками термальных вод и глубинных флюидов).

Наряду с потенциальной возможностью использования углей как источника РЗЭ, для многих угледобывающих территорий остро стоит проблема хранения и утилизации отходов добычи угля и его сжигания. Исследования содержания редкоземельных и рассеянных элементов в отходах угольной промышленности и продуктах сжигания угля проводились в России [44–46], Польше [47, 48], Бразилии [49]. Так, зола сжигания углей Кузбасса содержит существенные концентрации галлия и ниобия (до 3 г/кг), германия (до 2,7 г/кг) [44]. Разрабатываются технологии извлечения редких и редкоземельных элементов из золошлаковых отходов Кемеровской области. Технологии основываются на методах последовательного осаждения посторонних компонентов из вытяжки золы, а также ее обогащения методом ионной флотации [46]. Полученные экстракты интересны содержанием лантана (до 19 мг/кг), иттрия (до 14 мг/кг) и празеодима (до 7 мг/кг).

Исследования различных видов угольной золы в Польше демонстрируют существенное обогащение ее неодимом (до 81,3 мг/кг) и иттрием (до 73,2 мг/кг) [47]. Гипергенные процессы в отвалах добычи и переработки угля, особенно сопровождаемые эндогенными пожарами, вызывают различные фазовые превращения вещества с повышением концентраций в нем иттрия (до 71 мг/кг), лантана (до 46 мг/кг), неодима (до 41 мг/кг), иттербия (до 4,6 мг/кг) [48].

Исследования летучей золы угольной электростанции в Бразилии также показали высокие содержания в ней целого ряда РЗЭ (Ce, Dy, Eu, Cd, La и др.), что позволяет рассматривать этот отход в качестве перспективного источника РЗЭ [49].

Инициативные исследования авторов содержания редких и рассеянных элементов в шахтных отвалах Кизеловского угольного бассейна проведены для целей возможного применения вещества рассматриваемых техногенных массивов. Более широкое их использование за счет экономии средств на добычу ми-

нерального сырья повышает ресурсосбережение и направлено на решение важнейшей задачи обеспечения экономики России собственным сырьем для производства РЗЭ.

Объектом исследования являются породы отвалов угольных шахт в окрестностях города Губахи Пермского края. Исследования включали отбор проб пород из шести отвалов шахт «Центральная», «им. Калинина», «Новая», «Нагорная», «Шумихинская» и «им. 40-летия Октября» (рисунок 2.3). Для изучения отобраны пробы пород отвалов с поверхности, а также с глубины 0,5 м. Всего отобрано и исследовано 30 проб.

Лабораторные исследования проводились в Секторе наноминералогии Центра коллективного пользования Пермского государственного национального исследовательского университета и включали в себя оценку концентрации 48 микроэлементов в образцах пород методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS, Aurora M90, Bruker). Исследования проведены по методике научного совета по аналитическим методам Всероссийского института минерального сырья (Россия) № 499 «Определение элементного состава горных пород, почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой и масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой методами».

Обобщенные результаты исследований содержания лития, галлия, германия и редкоземельных металлов приведены в таблице 2.9, содержащей данные по средним (приведены в числителе) и максимальным (в знаменателе) содержаниям исследованных элементов. Для оценки концентраций исследованных элементов в отвалах Кизеловского угольного бассейна использованы их средние содержания в осадочных горных породах [41].

Результаты оценки демонстрируют обогащение вещества всех исследованных отвалов литием, скандием и германием. Для отдельных исследованных отвалов (шахты 40 лет Октября, Нагорная, Центральная, Шумихинская) отмечено высокое содержание галлия. При этом содержание иттрия и лантаноидов в изученных отвалах значительно ниже средних концентраций в осадочных породах. Указанные сравнения со средними содержаниями элементов в осадочных породах в первом приближении позволяют сделать вывод о возможной перспективе их использования в качестве сырья для извлечения лития, германия и скандия, отдельных отвалов – галлия.

Сравнение измеренных содержаний перспективных элементов в отвалах Кизеловского угольного бассейна с опубликованными данными по содержанию этих элементов в промышленных рудах показало, что даже максимальные содержания лития существенно ниже рассматриваемого минимального предела для промышленных руд (он составляет 0,5 % по Li_2O).

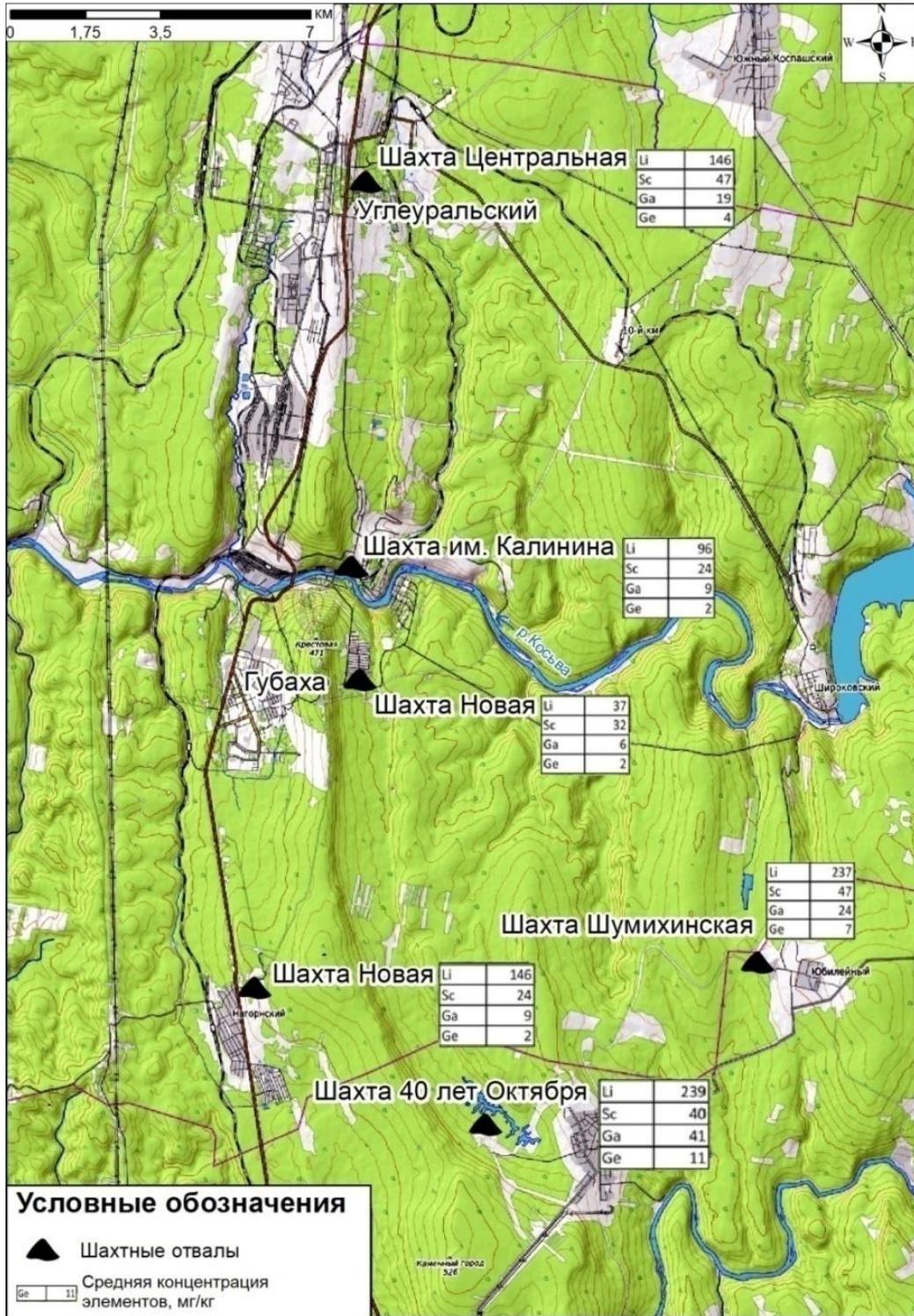


Рисунок 2.3 – Схема расположения отвалов на территории Кизеловского угольного бассейна и содержания в них перспективных к использованию элементов

Таблица 2.9 – Содержание редких и редкоземельных микроэлементов в пробах шахтных отвалов
Кизеловского угольного бассейна

Наименование отвала, количество проб	Содержание, мг/кг (среднее/максимальное)										
	Li	Sc	Ga	Ge	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	
Шахта 40 лет Октября, горелый отвал (п. Шумихинский), n= 6	239,6/ 275,7	40,92/ 51,40	41,74/ 57,26	11,73/ 19,17	2,47/ 3,52	3,30/ 4,97	8,30/ 13,08	0,98/ 1,51	2,92/ 4,51	0,51/ 0,80	
Шахта Нагорная, n= 4	146,5/ 206,2	53,99/5 8,66	32,34/ 35,89	7,71/ 11,03	2,33/ 3,40	3,13/ 4,79	7,57/ 11,10	0,87/ 1,23	2,63/ 3,58	0,49/ 0,65	
Шахта им. Калинина, n= 4	96,9/ 109,1	24,47/ 28,27	9,71/ 10,47	2,96/ 3,06	0,21/ 0,29	0,07/ 0,12	0,23/ 0,29	0,01/ 0,01	0,08/ 0,10	0,01/ 0,02	
Шахта Новая, n= 4	37,7/ 49,6	32,53/ 48,59	6,00/ 7,93	2,16/ 3,07	6,40/ 10,54	3,71/ 6,60	9,40/ 15,65	0,96/ 1,63	3,87/ 6,47	0,93/ 1,46	
Шахта Центральная, n= 4	146,8/ 297,1	47,56/ 55,22	19,58/ 25,78	4,84/ 9,28	0,09/ 0,11	0,08/ 0,10	0,22/ 0,27	0,01/ 0,01	0,06/ 0,09	0,004/ 0,10	
Шахта Шумихинская, n= 8	273,7/ 305,2	47,41/ 64,37	24,31/ 28,65	7,91/ 9,87	0,14/ 0,35	0,14/ 0,41	0,39/ 1,02	0,02/ 0,12	0,14/ 0,42	0,02/ 0,08	
Среднее содержание для изученных проб	177,9	41,9	23,8	6,8	1,7	1,6	4,1	0,4	1,5	0,29	
Обобщенное содержание в каменных углях*	14,0	3,70	6,0	2,40	8,20	11,0	23,0	3,40	12,0	2,20	

Среднее содержание в осадочных породах по данным Григорьева Н.А.	46,0	15,0	16,0	2,0	31,0	48,0	75,0	10,0	36,0	8,0
	Содержание, мг/кг (среднее/максимальное)									
Наименование отвала, количество проб	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣPЗЭ
Шахта 40 лет Октября, горелый отвал (п. Шумихинский), n = 6	0,15/ 0,24	0,63/ 0,97	0,07/ 0,11	0,42/ 0,61	0,07/ 0,11	0,28/ 0,61	0,04/ 0,06	0,24/ 0,36	0,03/ 0,04	20,43/ 31,31
Шахта Нагорная, n = 4	0,14/ 0,20	0,59/ 0,85	0,08/ 0,11	0,41/ 0,60	0,08/ 0,12	0,27/ 0,37	0,04/ 0,06	0,30/ 0,46	0,04/ 0,06	18,98/ 27,53
Шахта им. Калинина, n= 4	0,02/ 0,03	0,03/ 0,04	0,032/ 0,035	0,03/ 0,06	0,025/ 0,031	0,02/ 0,04	0,017/ 0,021	0,02/ 0,04	0,019/ 0,023	0,83/ 1,11
Шахта Новая, n= 4	0,20/ 0,34	1,07/ 1,75	0,16/ 0,29	1,28/ 2,05	0,24/ 0,41	0,83/ 1,30	0,10/ 0,16	0,80/ 1,20	0,10/ 0,17	30,04/ 48,94
Шахта Центральная, n= 4	0,02/ 0,03	0,02/ 0,03	0,036/ 0,037	0,007/ 0,013	0,034/ 0,035	0,017/ 0,022	0,022/ 0,023	0,034/ 0,038	0,025/ 0,026	0,68/ 0,81
Шахта Шумихинская, n= 8	0,02/ 0,03	0,03/ 0,08	0,03/ 0,04	0,01/ 0,04	0,031/ 0,034	0,014/ 0,017	0,021/ 0,022	0,026/ 0,033	0,025/ 0,026	1,07/ 2,63
Среднее содержание для изученных проб	0,09	0,36	0,06	0,32	0,07	0,21	0,04	0,21	0,04	–
Среднее содержание в каменных углях мира*	0,43	2,70	0,31	2,10	0,57	1,00	0,30	1,00	0,20	–
Среднее содержание в осадочных породах по данным Григорьева Н.А.	1,2	5,8	0,83	4,4	0,7	1,9	0,6	2,5	0,39	–

Примечание: полужирным шрифтом выделены ячейки, в которых среднее содержание элемента в пробах превышает средние глобальные содержания в осадочных горных породах;

*Данные по [50].

Более интересно перспективное использование германия, основным источником которого в России являются бурые угли месторождений Дальнего Востока и Забайкалья. Известно тяготение германия к сульфидам и силикатам. Именно полиметаллические сульфидные руды являются в мире главным сырьем этого элемента. Высокое содержание тонкодисперсных сульфидов железа в породах Кизеловского угольного бассейна является и возможной причиной высоких концентраций германия в исследованных отвалах шахт. Для промышленного использования с целью извлечения германия рассматривают бурые угли с содержанием этого элемента в диапазоне 0,01–0,1 %. Эти концентрации указывают, что вещество отвалов шахты 40 лет Октября и Нагорной имеет перспективу в качестве источника германия.

Высокие содержания скандия в природе также связаны с сульфидами. Этот элемент может накапливаться в углистом веществе, а для промышленного использования рассматриваются золы углей и шлаки с содержанием Sc_2O_3 в диапазоне 0,001–0,06 % [51]. Даже с учетом среднего содержания для всей группы проанализированных проб (~0,01% по Sc_2O_3) вещество породных отвалов Кизеловского угольного бассейна может рассматриваться в качестве потенциального источника скандия.

В настоящее время основным источником галлия выступают следующие виды достаточно широко распространенного минерального сырья: бокситы, нефелиновые концентраты, полиметаллические руды. В качестве потенциального источника галлия рассматриваются также угли, фосфориты, руды лития.

Мировые резервы галлия в бокситовых рудах, запасами которых человечество обеспечено на многие десятилетия вперед, в настоящее время фактически недоступны [52]. Это связано с ограниченными производственными мощностями, которые нацелены в первую очередь на добычу алюминия. С учетом среднего содержания галлия в апатит-нефелиновых рудах на уровне 15 мг/кг, содержание этого элемента в отвалах шахт 40 лет Октября (до 57 мг/кг) и Нагорная (до 35 мг/кг) имеет перспективу изучения и дальнейшего использования.

Таким образом, результаты исследований вещества отвалов Кизеловского угольного бассейна в сравнении с глобальными концентрациями элементов в осадочных породах демонстрируют их обогащение литием, скандием и германием. Для отдельных исследованных отвалов отмечено высокое содержание галлия. При этом содержание иттрия и лантаноидов в изученных отвалах значительно ниже средних концентраций в осадочных породах.

Оценка содержаний редких и редкоземельных элементов в отвалах Кизеловского угольного бассейна по отношению к их рудам показала высокие концентрации скандия (диапазон средних содержаний в исследованных объектах

24-54 мг/кг), в перегоревших отвалах германия (среднее содержание 11 мг/кг) и галлия (среднее содержание 42 мг/кг). Ассоциация скандия и германия обусловлена сульфидной минерализацией пород угленосной формации Кизеловского бассейна.

Очевидно, что, несмотря на отмеченные перспективные содержания ряда элементов в шахтных отвалах Кизеловского угольного бассейна, одна из главных трудностей их переработки состоит в разнообразии и неоднородности состава. Это осложняет процесс их комплексной переработки и предполагает тщательные предварительные исследования их вещественного состава с оценкой форм нахождения ценных элементов [53, 54], различные экспериментальные исследования вещества с целью моделирования реальных процессов изменения свойств [55, 56]. Расчет экономических показателей процесса использования для разных участков одного отвала может приводить к разным результатам. Тем не менее, даже следовые количества ценных и редких металлов обычно оправдывают трудоемкие процессы их извлечения, могут дать импульс для развития высокотехнологичных отраслей и снизить зависимость России от импорта.

В настоящее время в Российской Федерации научные разработки в области использования отходов различных отраслей осуществляются на региональном уровне, на отдельных предприятиях, в созданных в последние годы ассоциациях. При этом разрабатываемые проекты направлены на экономически обоснованную переработку отходов, а значительная часть выполненных разработок остается нереализованной из-за отсутствия материальных и финансовых средств на развитие перерабатывающих производственных мощностей.

По опыту зарубежных стран толчком в развитии этого направления должны стать государственные меры экономического стимулирования и экономического воздействия – платежи за загрязнение окружающей среды, штрафы и санкции за нарушение экологического законодательства и т.п. Решение проблемы переработки многотоннажных и многокомпонентных отходов, а также отходов, требующих создания специализированных предприятий по их переработке, возможно в рамках региональных и федеральных программ.

2.2. Технологии очистки сточных вод при разработке россыпных месторождений

Россыпные месторождения являются важным источником многих видов минерального сырья. В мире из россыпей добывается: титана – более 70 %, циркония – более 95 %, золота – около 50 %, алмазов – около 90 %. Общее количество минералов, способных накапливаться в россыпях, превышает 50. Ос-

новными промышленно ценными минералами россыпей являются золото, алмазы, касситерит, вольфрамит, шеелит, циркон, рутил, ильменит, киноварь, минералы металлов платиновой группы, хромит, редкометалльные (лопарит, колумбит, танталит и др.), редкоземельные (монацит и др.) минералы, магнетит, титаномагнетит, корунд, киноварь, гранаты, янтарь, берилл (аквамарин, изумруд, воробьевит, гелиодор), аметист, горный хрусталь, силлиманит и др. [57].

Разработки россыпей в России ведутся на территории Дальнего Востока, Якутии, Забайкалья, Восточной Сибири, Алтая, Западной Сибири и на Урале [58]. По объемам добычи золота из россыпей, которые превышают 30 % всех объемов добычи золота в стране, Россия занимает лидирующую позицию в мире [59]. Большая часть разведанных запасов россыпных месторождений располагается в прирусловых поймах и непосредственно в руслах рек [60].

Разработка россыпных месторождений осуществляется преимущественно дражным способом, который обладает наиболее высокими технико-экономическими показателями и имеет ряд значительных преимуществ перед другими способами [61–63]. Дражный способ разработки широко распространен не только в Российской Федерации, но и активно используется в США, Канаде, Монголии, Китае, Таиланде, Индонезии, Малайзии, Боливии [64–66]. Тем не менее с конца XX в. наблюдается снижение объемов добычи и переработки песков драгами, связанное с реорганизацией отрасли, сокращением разведанных запасов, отработкой крупных перспективных месторождений, незначительными перспективами прироста запасов за счёт открытия новых россыпей, усложнением горнотехнических условий отработки, отсутствием существенной модернизации драг и новых технологий разработки россыпей и др. [67–68]. В сложившейся ситуации перспективным представляется вовлечение в разработку техногенных россыпей [64, 69–71] – техногенных рыхлых образований, оставшихся в долинах рек после отработки россыпных месторождений, содержащих остаточное количество полезного компонента [72]. Достаточно высокий потенциал для повторной отработки подтвержден, например, для золотороссыпных месторождений Тувы [72]. Отработка техногенных россыпей имеет ряд экономических, экологических и социальных преимуществ: благоприятные горно-геологические условия техногенных месторождений для их освоения и развитая инфраструктура снижают затраты на извлечение полезного компонента; отсутствие недопустимых экологических последствий повторной разработки месторождений, с учетом малой глинистости песков и многолетнего опыта их эксплуатации предшественниками; создание новых рабочих мест и обеспечение самозанятости населения [72].

Разработка россыпных месторождений характеризуется большими объемами водопотребления и водоотведения. В целом по регионам, которые тради-

ционно считаются флагманами в россыпной золотодобыче, на долю горных предприятий приходится около 30 % от общехозяйственного водопотребления [73,74]. В большей степени это относится к разработке месторождений дражным и гидравлическим способами, где вода используется как при обогащении, так и непосредственно при добыче песков. В среднем для разработки и обогащения 1 м³ песков такими способами расходуется порядка 15–20 м³ технологической воды [74, 75]. При этом фактический расход воды в 3–4 раза превышает потребность горных работ в свежем притоке [74, 76, 77]. Наиболее негативным аспектом разработки месторождений в долинах рек является влияние на водный компонент природной среды. Отработка месторождения основывается на использовании поверхностного стока протекающей по месторождению реки. Процесс разработки сопровождается значительными объемами сброса загрязненных сточных вод. Экологические последствия разработки таких месторождений проявляются в изменении гидрологического режима водотоков, загрязнении поверхностных вод; трансформации условий обитания водных организмов, приводящей к уничтожению кормовой базы рыб и собственно ихтиофауны; снижении ресурсного значения водотока с целью водоснабжения и рекреационного значения территории. Наиболее распространенной и проблемной причиной загрязнения водотоков являются взвешенные вещества [74, 78]. Кроме загрязнения водотоков, недостаточная очистка технологических вод, используемых в оборотном водоснабжении, снижает размываемость породы и степень извлечения полезного компонента [79]. Для россыпных месторождений алмазов Красновишерского района Пермского края установлено предельное содержание взвешенных веществ в технологической воде. При концентрации взвешенных веществ более 5 г/дм³ значительно увеличиваются потери алмазов при промывке песков [80].

Среди существующих способов очистки сточных вод от взвешенных веществ выделяются традиционные и наиболее широко используемые при разработке россыпных месторождений в долинах рек методы отстаивания в водоемах-отстойниках, иногда с дополнительной противofильтрационной защитой [59], а также реагентные методы очистки [81]; методы электрохимической очистки [82]; методы фильтрования через различные фильтры: сложенные грунтовыми материалами [83, 84], отходами лесозаготовительной отрасли [85], геотекстильные материалы [86]. Используются и различные комбинации методов [87]. Анализ существующих в горнодобывающей промышленности способов очистки сточных вод от взвешенных веществ показал, что применяемые при разработке россыпных месторождений в долинах рек системы очистки не позволяют соблюдать нормы допустимых концентраций взвешенных веществ в водотоках либо являются экологически опасными или экономически неэффе-

тивными. Традиционный метод отстаивания не обеспечивает достаточную степень очистки воды. Существенными недостатками также являются необходимость отчуждения значительных площадей и затраты, связанные со строительством и эксплуатацией отстойных водоемов. В весенний период происходит интенсивный вынос донных отложений отстойников в реки, что существенно ухудшает экологическую обстановку. Практика недропользования показывает низкую эффективность очистки воды отстоем на полигонах работ. Опасность химического загрязнения не позволяет использовать методы флокуляции и коагуляции на водоемах рыбохозяйственного назначения. Электрохимические методы очистки требуют значительного расхода электроэнергии. Большие объемы водопотребления и водоотведения при разработке месторождений в долинах рек ($0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ или $17\,280 \text{ м}^3/\text{сутки}$ для 250-литровой драги) исключают возможность использования промышленных серийных фильтров. В соответствии с Пособием по проектированию сооружений для очистки и подготовки воды [88] производительность фильтров с зернистой загрузкой составляет $100\text{--}800 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Стоимость станций очистки воды составляет десятки миллионов рублей. Эксплуатационные затраты сопоставимы с капитальными вложениями. Минимальный штат обслуживающего персонала станций 6–8 человек.

Альтернативой существующим способам очистки сточных вод от взвешенных веществ может быть использование особенностей состава и строения аллювиальных отложений, измененных в процессе извлечения полезного ископаемого, что позволяет создать эффективную технологию очистки [89–92]. Исследования проведены авторами в долине р. Бол. Колчим в Красновишерском районе Пермского края в пределах Больше-Колчимского россыпного месторождения алмазов, разрабатываемого дражным способом.

В петрографическом составе обломочного материала русла, поймы, I и II надпойменных террас, к которым приурочена продуктивная толща месторождения, доминируют песчаники. Кварцсодержащие породы в составе речных террас составляют от 77 до 88,4%. Из них песчаники составляют от 52,8 до 84,1 %. Кварцито-песчаники, кварциты и кварц содержатся в пределах 4,3–16,6 % в составе обломочных отложений. Все эти породы при разрушении дают наиболее устойчивые к процессам выветривания кварцевые пески, которые длительное время сохраняются в аллювиальных отложениях. Песчаники являются основным источником поступления в аллювий кварцевых песков. Проведенные исследования минерального состава песчаников [93] показали, что они на 50 % и более состоят из кварца.

В аллювиальных отложениях в размерностях песчаных фракций 0,25–2,0 мм содержание окатанного кварца изменяется в пределах от 34 до 68 %, а кварцевого цемента в разрушенных до этого размера песчаниках – от 16 до

47 %. В делювиальных отложениях в обломках песчаников, разрушенных до той же песчаной фракции, содержание кварцевого цемента изменяется от 32 до 40 %, а окатанного кварца – от 46 до 62 % [94]. Прослеживается отчетливая закономерность увеличения в аллювии содержания кварца по мере уменьшения размера фракции. Во фракции 1–2 мм кварца содержится 34 %, а во фракции 0,25–0,5 мм – 68 %.

Таким образом, геологические особенности формирования отложений речных террас способствовали преобладанию в минеральном составе окатанного кварца. В петрографическом составе обломочных отложений доминируют (до 84 %) кварцевые песчаники с содержанием кварцевых зерен до 68 %, что создает предпосылки для образования и доминирования кварцевых песков. Кварцсодержащие породы речных террас относятся к сопутствующим источникам образования кварцевых песков. Делювиальные глинистые отложения относятся к торфам и подлежат вскрыше, за исключением нижнего слоя, который включается в разрабатываемую продуктивную толщу. В формировании состава аллювиально-техногенных отложений после работы драги суглинки и глины практически не участвуют, поскольку выносятся водой из дражного водоема во взвешенном состоянии и не разубоживают пески. Плотик продуктивных отложений, представленный выветрелыми песчаниками, при «задирке» черпаками драги является дополнительным источником кварцевого песка.

Формирование аллювиально-техногенных отложений при дражном способе разработки месторождений

Процесс разработки месторождения заключается в переработке рыхлых отложений драгой и извлечении полезного ископаемого (алмазов), со складированием переработанных пород непосредственно в выработанное пространство. Для вскрытия россыпи создается система водоподъемных технологических плотин, обеспечивающих возможность размещения драги в рабочем (плавучем) состоянии на горизонте залежи и доступа к эксплуатационным пескам.

Технология разработки россыпей драгами состоит из нескольких технологических процессов: подводного черпания, дезинтеграции, грохочения, гравитационного осаждения полезного ископаемого в водном потоке и отдельного складирования горных пород в отвалы по классам крупности [95, 96].

Отвалы промывки слагаются фракциями, которые условно можно сгруппировать в две фракционные группы: галечниковую и эфельную. Галечниковая фракция сбрасывается с промывочного барабана на начальных этапах драгирования, выносится стакером и отсыпается поверх уже сформировавшихся отвалов эфельной фракции. В ее составе доминируют фракции крупнее 16 мм. Эфельным материалом называют часть горной массы, прошедшей через сею-

щие отверстия барабанного грохота и поступившей в дражный разрез по хвостовым колодам. В результате обогащения эфельные отложения представлены фракциями меньше 16 мм и содержат более мелкий материал: мелкозем, песок, древесу и мелкую гальку. В силу технологической дезинтеграции материала, различий в скоростях оседания частиц различной крупности в водной среде, происходит естественная сортировка отвального субстрата и отвал промывки имеет характерное слоистое строение (рисунок 2.4).

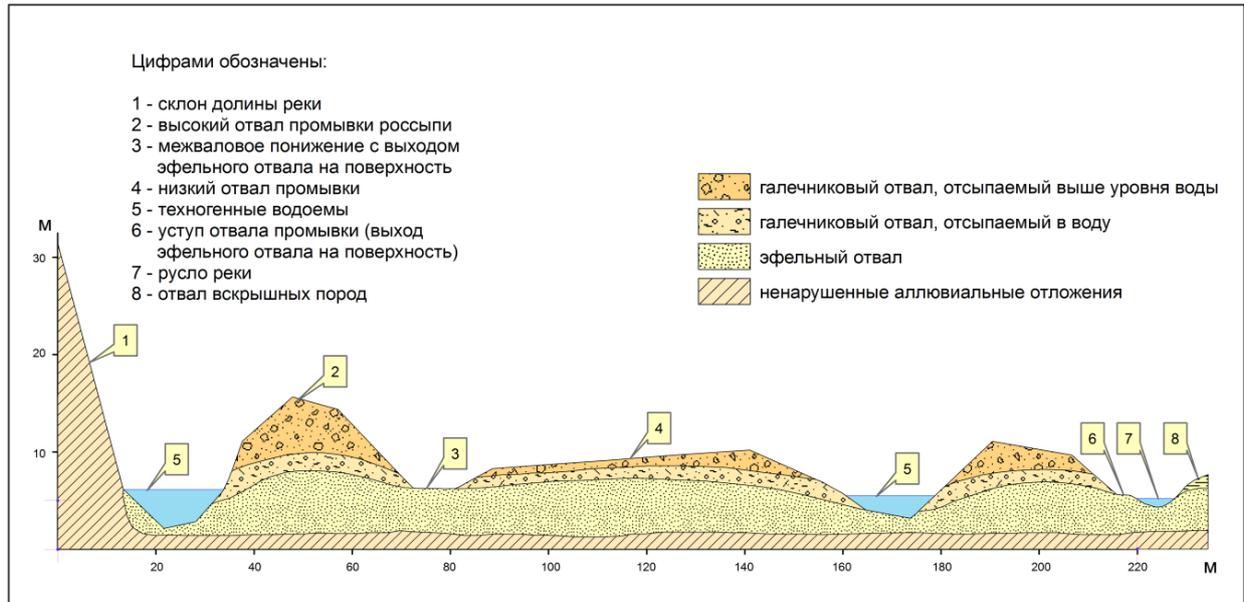


Рисунок 2.4 – Строение типичных дражных отвалов [97]

В нижней части разреза залегают в основном эфельные песчано-гравийные фракции с небольшим количеством глинистых частиц. Эфельный отвал образуется в результате оседания полидисперсной суспензии на дно дражного разреза, обладает низкой плотностью сложения и высокой пористостью. Частицы разного размера осаждаются в воде с различной скоростью. Крупные элементы песка, гравия и мелкой гальки оседают на дно дражного разреза непосредственно под дугой движения хвостовых колод. Эти частицы вследствие большой скорости оседания не успевают переместиться на существенные расстояния в горизонтальной плоскости. Мелкие частицы и микроагрегаты, осаждаясь очень медленно, успевают перемещаться на значительное расстояние. Они разносятся по всему дражному карьеру, так как вода в нем довольно интенсивно перемещается работающей драгой. Значительная часть глинистых частиц и микроагрегатов уносится из дражного разреза водным потоком.

Формирование дражных отвалов завершается отсыпкой со стакера галечниковой фракции. В идеальном случае галечниковый отвал содержит только механические отдельности размером крупнее 16 мм.

Таким образом, после отработки Больше-Колчимского месторождения драгой естественные геологические условия существенно изменились. Породы вскрыши, так называемые «торфа», представленные делювиальными суглинками и глинами, и озерно-болотными отложениями, были предварительно сняты и складированы во внешние и внутренние отвалы полигона работ. Переработке драгой подвергались продуктивные аллювиальные и частично делювиальные отложения. Производилась «задирка» плотика черпаками драги в связи с наличием мезопонижений на его поверхности. В результате отработки участка аллювиальные и делювиальные отложения долины реки оказались перераспределенными на крупные стачерные отвалы, сформированные частично над поверхностью воды дражного водоема, и мелкие эфельные отложения, образованные в дражном водоеме после обогащения.

Перераспределение отложений произошло и по генетическим признакам. Аллювиальные отложения русла, поймы, I и II надпойменных террас оказались перемешанными с делювиальными отложениями, частично входящими в продуктивный слой. Соответственно изменилось ранее существовавшее соотношение минерального состава структурных элементов речной долины. Произошло осреднение вещества и принудительная стратификация по крупности. Техногенные изменения происходили на фоне естественных геологических особенностей речной долины, которые в любом случае являются базовыми, определяющими основные свойства техногенно-измененных отложений.

Фильтрационные свойства песчаных отложений

Большинство исследователей в настоящее время под песчаными частицами понимают минеральные частицы, имеющие размер от 0,05 до 2,0 мм [98, 99]. В гранулометрической классификации грунтов В.В. Охотина [100], наиболее обоснованной и удовлетворяющей современным требованиям, за песчаные принимаются частицы размером от 2,0 до 0,05 мм. Частицы этого размера обладают особыми свойствами, отличными от свойств гравелистых и пылеватых частиц. Песчаные частицы лишены связности, отличаются большой водопроницаемостью. Капиллярное поднятие воды в них обычно не превышает 50–60 см. Частицы крупнее 2 мм (гравийные) не обладают молекулярной влагоемкостью, капиллярное поднятие воды в них не происходит, водопроницаемость их очень велика. Пылеватые частицы (0,05–0,001 мм), подобно глинистым (<0,001 мм), практически водонепроницаемы и с трудом отдают воду. Капиллярное поднятие происходит в них с большой скоростью и на значительную высоту (до 2–3 м) [100].

И.В. Попов [101] приводит следующие доводы, доказывающие, что частицы размером 0,05 мм являются границей между песчаной и пылеватой фракци-

ями. Частицы 0,25–0,05 мм легко обнаруживаются при полевых исследованиях песчано-глинистых пород визуальным методом, и это квалифицируется как песчаность породы, а не ее пылеватость. Прибавление к песку частиц размером 0,25–0,05 мм мало влияет на изменение его свойств, в то время как прибавление к песку пылеватых частиц значительно уменьшает его пористость, фильтрационную способность, увеличивает капиллярное поднятие и приводит к появлению некоторой липкости. Фракция 0,25–0,05 мм практически оказывается водопроницаемой.

Гранулометрический состав песков является одним из основных факторов, определяющих фильтрационные свойства отложений и степень очистки воды от взвешенных веществ. Состав и характер строения песчаной толщи определяют величину коэффициента фильтрации песков, которая может изменяться от нескольких сантиметров до десятков метров в сутки. Главными факторами, влияющими на коэффициент фильтрации, являются размер и форма пор. Чем меньше поперечное сечение пор и больше их искривленность, тем меньше водопроницаемость песков. При уменьшении диаметра частиц в 2 раза, указывает В.В. Охотин [102], проницаемость уменьшается в 2–4 раза. Поскольку размер и форма пор определяются гранулометрическим и минеральным составом песка, водопроницаемость песков зависит от последних. Песок с раздельнозернистой рыхлой микроструктурой имеет максимальный коэффициент пористости.

Исследования аллювиальных песков [103] показывают, что хорошо сортированные песчаные осадки обычно имеют незаполненное поровое пространство. Мелкозернистые пески, состоящие из почти сферических зерен среднего размера 0,24 мм, при использовании модели плотнейшей упаковки в структуре осадка будут содержать $2/3$ пустот диаметра 0,053 мм (тетраэдрические) и $1/3$ пустот 0,098 мм (октаэдрические). В полной мере это относится и к хорошо сортированным песчаным аллювиально-техногенным отложениям, образовавшимся в дражном водоеме. Коэффициент пористости песчаных отложений участка исследований достигает 0,951–1,454.

Водопроницаемость песков определяется содержанием разных размерных фракций. Е.М. Сергеев [104] приводит данные В.А. Мощанского о величине коэффициента фильтрации отдельных гранулометрических фракций песка (таблица 2.10).

Анализ таблицы позволяет сделать вывод, что преобладание в песках изучаемого участка фракции 1,0–0,1 мм обеспечивает достаточно высокую водопроницаемость и, следовательно, возможность пропускать через песчаный массив значительный эксплуатационный расход очищаемой воды. Коэффициент фильтрации изучаемых песков изменялся от 7,46 до 22,1 м/сутки.

Таблица 2.10 – Значение коэффициента фильтрации отдельных гранулометрических фракций песка [104]

Размер частиц, мм	>2,0	2,0–1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01
Коэффициент фильтрации, м/сут	388,5	310,9	228,6	56,8	8,9	0,6	0,2

Водопроницаемость песка снижается с уменьшением диаметра песчаных зерен. Снижение коэффициента фильтрации происходит неравномерно, резкое его изменение наблюдается при переходе от фракции 0,25–0,1 мм к фракции 0,1–0,05 мм. Снижение коэффициента фильтрации по мере уменьшения размера частиц связано с уменьшением пор песка. Особенно сильно уменьшается размер пор у песков, состоящих из частиц различной крупности. Поэтому чем менее однороден песок, тем меньше величина его коэффициента фильтрации. Отсортированные пески имеют большую водопроницаемость, чем неотсортированные. Наибольшая степень сортировки песков по крупности достигается в мелкозернистых и средне-мелкозернистых песках. Песчаные осадки характеризуются наименьшей степенью гетерогенности среди аллювиальных отложений [103].

Влияние минерального состава на водопроницаемость песков выражается в следующем. Различные минералы, входящие в состав песков, в зависимости от свойств (спайности, твердости и др.) обуславливают разную форму зерен. Последняя, определяя размер и форму пор песка, определяет и его фильтрационную способность. Пески, зерна которых состоят из минералов с хорошо выраженной спайностью, образуют поры меньших размеров и поэтому имеют меньшую водопроницаемость. Окатанность частиц увеличивает водопроницаемость песка.

В.В. Охотин [102] исследовал фильтрационную способность отдельных песчаных фракций кварца, полевого шпата и слюды. В таблице 2.11 приведены значения коэффициента фильтрации исследованных им минералов, которые даны в целых относительных единицах. Коэффициент фильтрации слюды в каждой фракции принят за единицу.

В.В. Охотин пришел к выводу, что если расположить все минералы по величине их коэффициента фильтрации в возрастающий ряд, то он по совокупности всех изученных фракций будет таков: слюда < полевой шпат < остроугольный кварц < окатанный кварц.

Таблица 2.11 – Водопроницаемость гранулометрических фракций различного минерального состава [102]

Диаметр частиц, мм	Относительные значения коэффициента фильтрации		
	Полевой шпат	Остроугольный кварц	Окатанный кварц
2,0–1,0	15	не определялся	20
1,0–0,5	17	12	35
0,5–0,25	5	6	12
0,25–0,1	5	7	11
0,1–0,06	7	5	15
0,06–0,01	не определялся	3	5
<0,01	2	3	не определялся

По результатам анализа пески, отобранные с исследуемого участка, являются кварцевыми, хорошо окатанными, со значениями коэффициентов фильтрации от 7,46 до 22,10 м/сутки. Следовательно, кварцевый песок участка обладает высокими фильтрационными свойствами.

В.А. Клячко [105] исследовал влияние формы зерен фильтрующего слоя на скорость фильтрации. Полученные им данные представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Зависимость скорости фильтрации от формы зерен [105]

Материал	Плотность, г/см ³	Средняя масса зерна, мг	Пористость слоя, %	Скорость фильтрации, м/ч
Шары	2,61	0,962	42,6	14,07
Окатанный песок	2,64	0,968	43,8	12,72
Дробленый кварц	2,64	0,937	44,5	10,73
Дробленый мрамор	2,60	0,983	43,2	9,97

Из таблицы видно, что скорость фильтрации в шарообразных и окатанных частицах больше, чем в угловатых. Исследуемые пески опытного участка представлены хорошо окатанным кварцем и имеют более высокую пористость по сравнению с табличными данными, в связи с рыхлым сложением. Пористость изменяется от 48,75 до 59,25 %, преобладают значения пористости выше 5 %. Соответственно, скорость фильтрации в песках выше табличных значений. В процессе исследований на участке была определена действительная скорость фильтрации воды в песчаных отложениях. Скорость фильтрации определялась по изменению прозрачности воды – появлению максимальной мутности в отводящем водоеме при повышении уровня в напорном. При эксплуатационном режиме работы системы очистки действительная скорость фильтрации изменя-

лась от 19 до 22 м/ч, что хорошо согласуется с данными других исследователей и подтверждает высокие фильтрационные свойства отложений участка исследований, представленных в основном песчаными фракциями.

Водопроницаемость песков, кроме того, резко изменяется в зависимости от их плотности. Коэффициент фильтрации при наиболее рыхлом сложении песка может быть в 1,5–2 раза больше, чем при наиболее плотном его сложении [106]. Плотность песчаных отложений участка по результатам анализа изменяется от 1,11 до 1,40 г/см³, что говорит о достаточно рыхлом сложении песчаного массива. Действительно, после процесса обогащения на драге и формирования эфельных отвалов в воде дражного водоема пески приобретают рыхлое сложение. Начальный этап консолидации осадков продолжается длительное время и составляет не менее нескольких десятков лет после проведения рекультивации нарушенных земель. Рыхлое сложение песчаного массива подтверждает высокие фильтрационные свойства.

Наличие в песке пылеватых прослоек, горизонтов, сцементированных кальцитом, гипсом, оксидами железа и т.д., приводит к резкому уменьшению фильтрационной способности. По гранулометрической классификации Е.М. Сергеева [104] песок участка исследований является полидисперсным и относится к классу чистых песков. В песках пылеватых и глинистых частиц практически нет, поскольку они хорошо отмыты в технологическом процессе обогащения.

В целом исследуемые песчаные отложения обладают хорошо выраженной фильтрационной способностью. Этому способствует рыхлое сложение песка с пористостью до 59 %, окатанность зерен и преобладание фракций 0,1–1,0 мм, обеспечивающих высокую водопроницаемость. Коэффициент фильтрации кварцевых песков достигает 22 м/сут. Действительная скорость фильтрации изменяется от 19 до 22 м/ч, что вполне обеспечивает очистку расхода воды, необходимого для технологического водоснабжения драги.

Использование аллювиально-техногенных отложений в качестве фильтра

Наибольший научный и практический интерес для очистки воды от взвешенных веществ среди аллювиально-техногенных отложений представляют песчаные отложения, которые являются сложным сочетанием минеральных частиц различной величины и генезиса. Фильтрационные характеристики песков, изложенные выше, убедительно доказывают возможность фильтрации через песчаные отложения практически значимых расходов воды, требующих очистки. Не менее важным является также степень очистки воды от взвешенных веществ в песчаных отложениях. Количество очищаемой воды и возможность по-

лучения нормируемой концентрации взвешенных веществ на выходе являются основными принципами работы любого фильтра.

Теорией взаимодействия глинистых суспензий с песчаным грунтом занимались в различных целях многие исследователи. Изучались особенности фильтрации суспензий, коагуляции песчаных отложений, физико-химических взаимодействий. Теоретические основы очистки воды от взвешенных веществ в песчаных отложениях позволяют максимально использовать природные особенности этих отложений и выбрать наиболее эффективную технологию очистки при недропользовании.

Твердые глинистые частицы суспензии могут механически задерживаться в порах песчаных отложений, а также вступать в физико-химическое взаимодействие со скелетом фильтрующих отложений и друг с другом с образованием коагуляционных связей. В процессе взаимодействия глинистых частиц суспензии с песчаными частицами проявляется сумма различных сил притяжения и отталкивания. Возникает определенное молекулярное ван-дер-ваальсовое притяжение, ионное электростатическое притяжение и отталкивание как непосредственно между самими частицами, так и между частицами и молекулами воды.

Проявление физического и механического поглощения глинистых частиц песком убедительно было доказано исследованиями Е.М. Сергеева [107–108]. Продвижение взвешенных глинистых частиц через поры песчаного грунта и поглощение их этим грунтом определяется соотношением размеров глинистых частиц с размерами песчаных зерен и размерами пор песчаного грунта, а также условиями поверхностного взаимодействия глинистых частиц между собой и с песчаными частицами. По Т.А. Неговской и Ф.И. Пикалову [109–112], глинистые частицы вмываются в песчаный грунт тогда, когда диаметр этих частиц в 10–50 раз меньше диаметра частиц песка. Размер частиц, способных вмываться в поры песка и задерживаться там, зависит от состава и физико-механических свойств этих частиц и песка. В результате в порах песка задерживаются частицы глинистой суспензии во много раз более мелкие, чем поры. Наиболее дисперсные частицы вследствие малой массы, попадая в поле молекулярных сил и имея большую поверхностную энергию, легче адсорбируются на поверхности песчаных зерен и поэтому задерживаются в песке скорее, чем более крупные, которые проникают в песок на значительную глубину. Накопление более крупных частиц суспензии в порах песка носит характер простого механического задержания.

Н.В. Орнатский [113] пришел к заключению, что наибольшая эффективность поглощения достигается при продвижении мелких глинистых частиц в сравнительно мощном фильтрационном потоке. Увеличение гидродинамического давления способствует отрыву адсорбированных песком отдельных гли-

нистых частиц и их агрегатов и выносу их водой в более глубокие слои песка. По пути фильтрации гидродинамическое давление постепенно уменьшается, и создаются условия для механического поглощения частиц и агрегатов.

Сложный характер зависимости поглощения кварцевым песком глинистых частиц из устойчивых суспензий свидетельствует о том, что это процесс, при котором наряду с механическим задержанием частиц в порах песка имеет место адсорбционное взаимодействие глинистых и песчаных частиц. Наибольшей сорбируемостью обладает гидрослюдистая глина, затем монтмориллонитовая и наименьшей – каолинитовая глина. Показатель адсорбционной способности говорит о том, что сорбируемость гидрослюдистой глины на кварцевых зернах более чем в 2 раза выше каолинитовой [107]. Данные Л.К. Танкаевой [114] подтверждают установленную ранее Е.М. Сергеевым и Г.А. Куприной [107] повышенную способность гидрослюдов к поверхностному взаимодействию с песком по сравнению с другими группами глинистых минералов. Лабораторные исследования взвешенных частиц опытного участка показывают, что они являются гидрослюдистыми и, соответственно, обладают высокой способностью к поверхностному взаимодействию с песком и активно задерживаются массивом песка.

Роль адсорбционного поглощения глинистых частиц возрастает с увеличением дисперсности песков, в связи с тем, что мелкозернистые пески обладают повышенной удельной поверхностью, закономерно возрастающей по мере измельчения песков [115], и значительно большей поверхностной энергией по сравнению с крупнозернистыми песками.

Основными процессами, обуславливающими очищающую способность крупнозернистых песков, являются процессы коагуляции и механического поглощения глинистых агрегатов. Соответственно, пески средней крупности имеют промежуточные характеристики – им свойственно и механическое поглощение глинистых частиц, и адсорбционное. Следовательно, они обладают наиболее оптимальными характеристиками фильтрующей загрузки, что позволяет наиболее эффективно очищать воду от взвешенных веществ.

В соответствии с ГОСТ 12536–2014 [116] в изучаемом массиве преобладает песок средней крупности и до глубины 0,5–1,0 м в единичных пробах встречается гравелистый и крупный.

Гранулометрический состав и физические свойства аллювиально-техногенных отложений участка исследований приведены в таблицах 2.13, 2.14.

Таблица 2.13 – Гранулометрический состав аллювиально-техногенных отложений участка исследований

Диаметр частиц, мм	Содержание, %		
	минимальное	максимальное	среднее
>10	0	5,02	1,45
10–5	2,19	11,66	4,85
5–2	3,08	17,89	6,24
2–1	2,42	18,42	11,11
1–0,5	4,88	31,48	20,90
0,5–0,25	21,02	44,36	33,03
0,25–0,1	10,67	40,48	20,16
0,1–0,05	0,09	2,84	1,12
0,05–0,005	0,25	1,62	0,63
<0,005	0,19	0,93	0,50

По минеральному составу легкой фракции песок весьма однообразен и примерно на 99 % представлен кварцевыми зернами различной формы и состояния. Преобладает кварц молочно-белый 84,84 %. Кварц прозрачный и кварц ожелезненный составляют 6,91 и 6,69 % соответственно.

Таблица 2.14 – Физические характеристики аллювиально-техногенных отложений участка исследований

Показатель	Значение		
	минимальное	максимальное	среднее
Плотность грунта, г/см ³	1,11	1,40	1,21
Плотность частиц грунта, г/см ³	2,64	2,66	2,65
Плотность сухого грунта, г/см ³	1,08	1,36	1,18
Пористость, %	48,75	59,25	55,45
Коэффициент пористости	0,95	1,45	1,26
Коэффициент водонасыщения, д.е.	0,04	0,08	0,05
Коэффициент фильтрации, м/сутки	7,47	22,10	9,96

Таким образом, преобладание среднего по крупности песка на участке исследований способствует процессу механической и адсорбционной погложительной способности по отношению к взвешенным частицам. Песок обладает способностью одновременно задерживать крупные и мелкие глинистые и пылеватые частицы, что позволяет с высокой эффективностью использовать аллювиально-техногенные отложения для очистки сточных вод. Специальным образом обустроенный массив аллювиально-техногенных отложений в долинах рек

может быть использован в качестве фильтра для очистки воды от взвешенных веществ в целях экологически безопасного недропользования.

Критерии выбора участка для очистки поверхностных вод от взвешенных веществ

Принципиальное положение о возможности использования песчаных фракций аллювиально-техногенных отложений долины реки для очистки сточных вод драги от взвешенных веществ не вызывает сомнений. На этой основе разработана технологическая схема очистки поверхностных вод от взвешенных веществ в фильтрационном поле, полевые испытания которой успешно проведены на дражном полигоне Больше-Колчимского месторождения. Эффективность применения технологии очистки в фильтрационном поле определяется геологическими условиями формирования долины реки, составом и строением аллювиальных отложений.

Геологическое обоснование выбора участка, потенциально пригодного для сооружения системы очистки поверхностных вод от взвешенных веществ, производится по материалам разведки месторождения. Анализ строения и состава аллювия, его мощности, площади развития в долине реки, состава подстилающих коренных пород позволяет выбрать такой участок. Основные требования к системе очистки поверхностных вод заключаются в достижении норматива допустимого сброса взвешенных веществ и очистке максимально возможного расхода загрязненных вод. Авторами определены геологические критерии ответственности участка эксплуатационным требованиям к системе очистки воды от взвешенных веществ:

- 1) преобладание в разрезе аллювиальных песчано-гравийных отложений;
- 2) в пределах контура продуктивных отложений содержание песчаных фракций 0,5–2,0 мм должно составлять не менее 25 %;
- 3) плотик представлен терригенными породами.

С учетом этих критериев по имеющейся геологической информации выбираются перспективные участки для организации системы очистки воды от взвешенных веществ.

На выбранных для проведения исследований участках преобладает песчано-гравийный тип разреза в соответствии с первым критерием. Отложения представлены песком с гравием и галькой. Содержание песчаных фракций 0,5–2,0 мм в продуктивной толще отложений составляет от 27,3 до 32,0 %, что соответствует второму критерию. На всех трех участках плотик представлен терригенными породами – песчаниками, которые являются источником поступления песка в аллювий – соблюдается третий критерий.

В целях проверки достоверности предложенных критериев на отработанном участке месторождения были проведены опытно-промышленные испытания по очистке воды от взвешенных веществ. Участок был отработан в 2008–2009 гг. Границы участка установлены в результате проведения опытных работ.

Отложения исследуемого участка после переработки продуктивных отложений драгой представлены в основном кварцевыми песками средней крупности и обеспечивают эффективную очистку сточных вод от взвешенных веществ. Доминирование песков на участке подтверждает действенность первого критерия.

Содержание в продуктивной толще фракций 0,5–2,0 мм в количестве 27,3 % по массе, определенное по материалам разведки, обеспечивает содержание песков на исследуемом участке, после его отработки драгой, равное 90 %. Такое содержание песчаных фракций в аллювиально-техногенных отложениях вполне достаточно для использования их в качестве фильтра. Высокое содержание песков на участке обусловлено неполным определением всего гранулометрического спектра песков на стадии разведки, концентрированием песков при обогащении на драге и вторичной переработкой продуктивных отложений. Следовательно, условия выбранного участка подтверждают достоверность второго геологического критерия.

Выбранный в соответствии с критериями перспективный участок долины реки включается в состав проекта разработки месторождения полезных ископаемых. Проектные решения по составу и структуре системы очистки, технологическому режиму эксплуатации для достижения нормативной степени очистки сточных вод от взвешенных веществ обеспечивают экологическую безопасность недропользования. Геологическое обоснование выбора участка по материалам разведочных работ позволяет без дополнительных затрат выбрать оптимальные проектные решения по охране окружающей среды и является эффективным способом повышения рентабельности разработки месторождений.

Структура и технология сооружения системы очистки при дражном способе разработки месторождений

Для проведения исследований выбран участок долины реки, наиболее близко расположенный к работающей драге. Участок представлен отвалами гравийно-галечных, песчаных и суглинистых отложений с оставшимися дражными выемками различной конфигурации и глубины (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Общий вид участка исследований

Система очистки сточных вод от взвешенных веществ в фильтрационных полях представляет собой участок долины реки, сложенный переработанными драгой аллювиальными отложениями, расположенными между напорными и отводящими водоемами (рисунок 2.6). Напорная фильтрация загрязненных взвешенными веществами вод осуществляется из напорного водоема в расположенный напротив отводящий водоем за счет разницы напоров (рисунок 2.7).

Для организации системы очистки часть сбрасываемой воды из дражного водоема, находящегося выше по течению, была направлена в пазуху, проходящую вдоль всего участка работ по левому борту долины реки. В результате сток загрязненных вод оказался на более высоких абсолютных отметках по сравнению с существующим руслом, расположенным по правому борту долины. Таким образом, были созданы условия для фильтрации воды через песчано-гравийные отложения перпендикулярно долине в сторону существующего русла реки, на более низкие отметки.

Создание напора и его регулирование было обеспечено строительством подпорных фильтрующих перемычек в русле пазухи. В результате по левому борту долины образовался каскад искусственных напорных водоемов (рисунок 2.8, а), зарегулировавших расход части р. Бол. Колчим и обеспечивших фильтрацию загрязненной взвешенными веществами воды в сторону существующего русла реки.

Для отведения профильтрованной очищенной воды были использованы оставшиеся после дражной разработки понижения – отводящие водоемы, представленные вытянутыми цепочкой вдоль участка котлованами различной формы (рисунок 2.8, б).

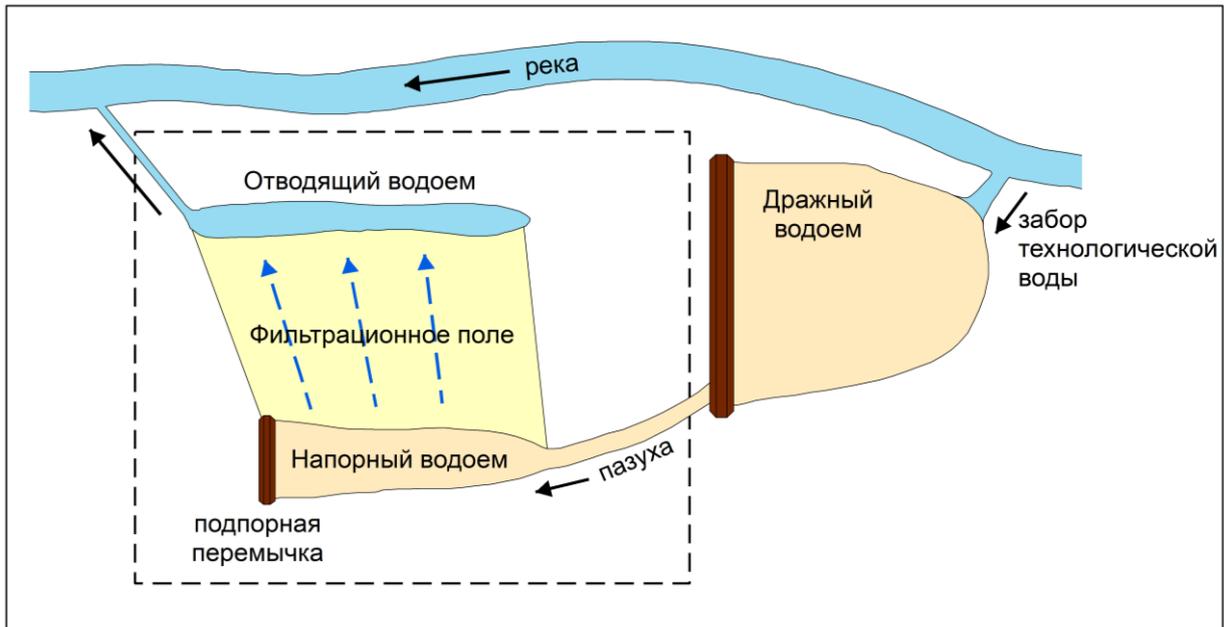


Рисунок 2.6 – Схема очистки воды в фильтрационных полях.
Пунктиром обозначен фрагмент системы очистки

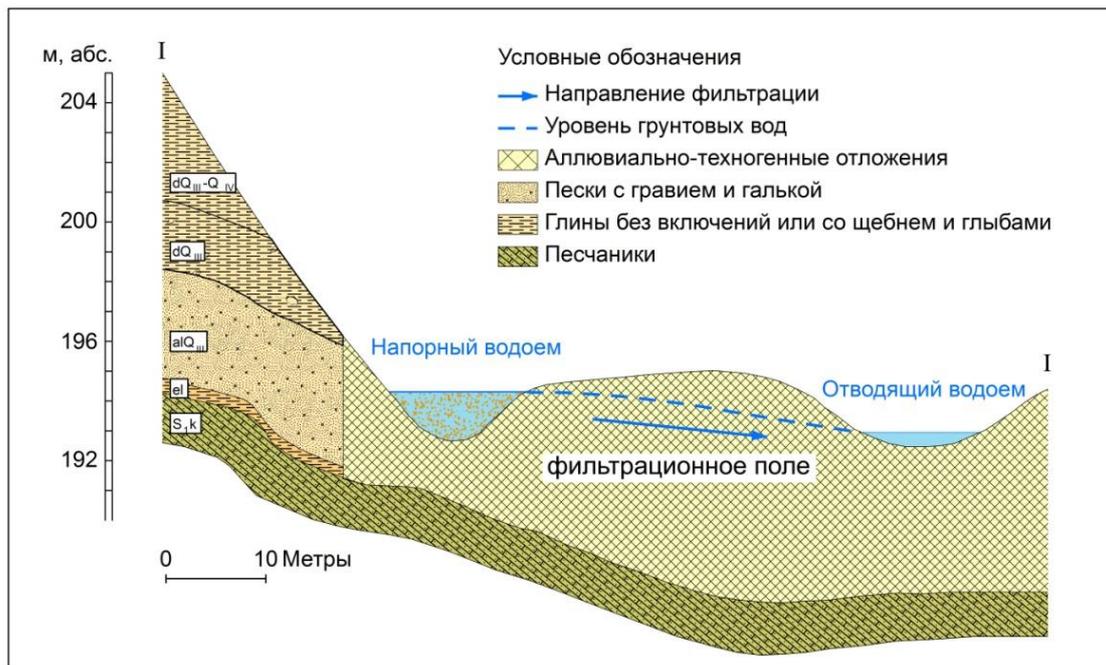


Рисунок 2.7 – Профиль фильтрационного поля

Котлованы, дренирующие фильтрующуюся воду, расположены напротив напорных водоемов. Отвод воды из котлованов производился по прорытым каналам в сторону русла реки, а в некоторых случаях – путем фильтрации через аллювиальные перемычки в расположенные ниже по уклону долины котлованы или понижения рельефа.

*а**б*

Рисунок 2.8 – Напорные и отводящие водоемы системы очистки сточных вод от взвешенных веществ в фильтрационных полях: *а* – напорный; *б* – отводящий

Система очистки сточных вод от взвешенных веществ в фильтрационных полях включает 3 напорных и 3 отводящих водоема, разделенных кварцевыми песками средней крупности. Длина участка составляет 310 м, ширина 50–70 м.

Результаты очистки вод в фильтрационных полях

Основной задачей эффективной системы очистки сточных вод является обеспечение требуемой степени очистки воды от взвешенных веществ и объема очищаемой воды. Нормами технологического водоснабжения для дражных работ предусматривается подпитка свежей водой водоема 250-литровой драги в объеме $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$ ($720 \text{ м}^3/\text{ч}$) [117]. Это количество воды является лимитирующим показателем минимально необходимого объема чистой воды, постоянно подаваемой в дражный водоем. Соответственно, такое же количество воды, но загрязненной взвешенными веществами, постоянно сбрасывается из рабочего водоема драги в речную сеть и требует очистки до нормативных значений. Допустимая концентрация взвешенных веществ в очищенных водах, установленная контролирующими организациями для р. Бол. Колчим, составляет $46,41 \text{ мг}/\text{дм}^3$.

В процессе очистки к постоянным величинам относятся длина пути фильтрации, гранулометрический и минеральный состав. Переменная независимая величина – концентрация взвешенных веществ в сточных водах, переменная зависящая величина – гидродинамический напор фильтрационного потока, поступающего на очистку. Управлять процессом очистки при этих условиях можно, изменяя напор загрязненных вод на входе в фильтрующие аллювиально-техногенные отложения.

Регулирование напора подаваемых на очистку загрязненных вод производится с помощью каскада напорных водоемов. Уровень воды в каждом из них можно изменять, регулируя высоту водослива подпорной фильтрующей плотины. Задача исследований заключалась в выборе напоров, которые обеспечивают осаждение взвешенных веществ в поровом пространстве, с одной стороны, и в очистке максимально возможного расхода воды – с другой. Оптимальное соотношение этих условий является критерием эффективности предлагаемой системы очистки.

По результатам проведенных исследований определены характеристики системы очистки сточных вод в фильтрационных полях, позволяющие обеспечить очистку необходимого количества воды до допустимых значений содержания взвешенных веществ. В таблице 2.15 приведены характеристики, разработанной авторами системы очистки сточных вод от взвешенных веществ при эксплуатационном режиме работы.

Таблица 2.15 – Характеристики системы очистки при эксплуатационном режиме работы

Показатель	Значение		
	минимальное	максимальное	среднее
Длина пути фильтрации, м	27	39	31,67
Напорный градиент	0,040	0,047	0,044
Действительная скорость фильтрации, м/час	19	22	20,33
Концентрация взвешенных веществ после очистки, мг/дм ³	7	54	26,67

Эксплуатационный режим работы системы очистки заключается в соблюдении рекомендованных уровней воды в напорных водоемах, превышение которых создает опасность уменьшения степени очистки и несоблюдения допустимых концентраций взвешенных веществ для р. Бол. Колчим, равных 46,41 мг/дм³. Напор контролируется по мерным рейкам, установленным в каждом напорном водоеме, и регулируется высотой порога водослива фильтрующей подпорной дамбы. За время проведения исследований расход очищаемой в фильтрационном поле воды изменялся от 0,323 до 0,368 м³/с, что связано с изменением расхода р. Бол. Колчим и точностью измерения. Полученный расход очищенных вод превышает необходимый расход воды для технологического водоснабжения 250-литровой драги, равный 0,2 м³/с. При работе драги в условиях оборотного водоснабжения или на прямотоке части расхода реки, равной объему технологического водоснабжения, система очистки полностью обеспечивает экологически безопасное недропользование.



Рисунок 2.9 – Концентрации взвешенных веществ в водах до и после очистки в фильтрационном поле: 1 – на сливе из дражного водоема; 2–4 – из отводящих водоемов

Концентрация взвешенных веществ в воде после очистки в фильтрационных полях (таблица 2.15), представленных аллювиально-техногенными отложениями, не превышает допустимых значений ($46,41 \text{ мг/дм}^3$), установленных для р. Бол. Колчим. Степень очистки сточных вод изменялась от 89,9 до 99,3 % (рисунок 2.9).

Высокая технологичность создания системы очистки поверхностных вод от взвешенных веществ определяется тем, что в качестве фильтра можно использовать весь песчаный массив, представленный аллювиально-техногенными отложениями, образовавшимися в долине реки после работы драги. По всей длине выбранного участка обеспечивается фронтальная напорная фильтрация загрязненной взвешенными веществами воды в направлении противоположного борта долины реки, через всю ширину участка песчаных отложений. Затраты заключаются в сооружении бульдозером подпорных фильтрующих плотин, создающих напор фильтрующихся вод, и отводящих каналов для сброса в русло реки очищенных вод.

Результаты проведения опытных испытаний системы очистки подтвердили возможность использования аллювиально-техногенных отложений в качестве фильтра для очистки сточных вод от взвешенных веществ. Эфельный горизонт

аллювиально-техногенных отложений представлен кварцевыми песками, в основном средней крупности. Степень очистки воды при фильтрации через песчаные аллювиально-техногенные отложения достигла 99,3 %, что позволяет соблюдать допустимые концентрации взвешенных веществ в поверхностных водах. Расход очищаемых вод (0,32–0,36 м³/с) превысил необходимый расход технологической воды (0,2 м³/с). Опытные-промышленные исследования, проведенные на рекомендованном участке, подтвердили достоверность предложенных критериев выбора геологических условий участка для создания системы очистки. Использовать систему очистки возможно практически в любых долинах равнинных и предгорных рек, где в достаточном количестве присутствуют песчаные фракции аллювиальных отложений.

Результаты проведенных исследований были внедрены в ЗАО «Уралалмаз» на полигоне работы драги № 141 на р. Бол. Колчим в Красновишерском районе Пермского края и показали высокую эффективность технологии очистки поверхностных вод от взвешенных веществ.

Система очистки вод от взвешенных веществ при гидравлическом способе разработки месторождения

На основе анализа теоретических положений и практики создания системы очистки воды на дражных полигонах проведены испытания по очистке оборотной воды в фильтрационных полях из намывных песков на полигоне работ обогатительной установки в долине р. Еловки в Свердловской области. Опытные-промышленные испытания проводились в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Созданная на полигоне система очистки состоит из подводящего канала, напорной траншеи, фильтрационного поля из отложений гидроотвала и отводящей очищенную воду траншеи (рисунок 2.10).

Характеристики структурных элементов системы очистки оборотной воды приведены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Характеристика основных элементов системы очистки оборотной воды

Параметр, м	Наименование элемента системы очистки воды		
	напорная траншея	фильтрационное поле	отводящая траншея
Длина	33,2	30	50
Ширина	5,2	60	6
Глубина	2,4	–	3,3



Рисунок 2.10 – Фильтрационное поле системы очистки оборотной воды (справа – напорная траншея; на заднем плане – отводящая траншея)

По результатам выполненного гранулометрического анализа отложений гидроотвала, используемых в качестве фильтрационного поля, установлено, что отложения относятся к гравийным грунтам (таблица 2.17).

Анализ таблицы показывает, что песчаной фракции (2,0–0,05 мм) в отложениях гидроотвала содержится 41,2 %. Существенно преобладает фракция крупнее 2,0 мм. В связи с этим при наполнении напорной траншеи создается крутой уклон поверхности купола растекания воды (аналог налива) при преобладающей вертикальной фильтрации. С течением времени купол растекания выполаживается, поскольку фильтрующаяся вода достигает поверхности потока грунтовых вод в долине реки. Фильтрующаяся вода заполняет массив отложений гидроотвала, уменьшая мощность зоны аэрации.

Таблица 2.17 – Гранулометрический состав отложений гидроотвала в центре фильтрационного поля (глубина отбора пробы 2,5 м)

Класс отложений, мм	Вес пробы, г	Весовая доля, %
>2,0	668,81	58,3
2,0–1,0	96,4	8,4
1,0–0,5	103,45	9,0
0,5–0,25	93,14	8,1
0,25–0,1	136,01	11,8
0,1–0,05	45,59	3,9
0,05–0,01	7,12	0,5
Всего	1149,19	100 %

Концентрации взвешенных веществ в очищенной воде из отводящей траншеи практически одновременно с формированием постоянного стока воды достигла оптимальных значений, характерных для геологических условий системы очистки и незначительно изменялась с течением времени проведения эксперимента. Диапазон изменений концентраций взвешенных веществ в очищенной воде составил от 3,0 до 19,6 мг/дм³. Концентрация взвешенных веществ в оборотной воде отстойного водоема изменялась в пределах 23166,7–96670,0 мг/дм³. Степень очистки воды от взвешенных веществ составила более 99,9 %. Эксплуатационный режим характеризуется следующими параметрами (таблица 2.18).

Таблица 2.18 – Эксплуатационные характеристики системы очистки оборотной воды в фильтрационном поле из отложений гидроотвала

Длина пути фильтрации, м	Напорный градиент	Действительная скорость фильтрации, м/сутки	Концентрация взвешенных веществ после очистки, мг/дм ³	Степень очистки при эксплуатационном режиме работы, %
30	0,128	508	3,0–19,6	более 99,9

Достигнутая степень очистки воды (рисунок 2.11) при эксплуатационном режиме работы системы доказывает принципиальную возможность получения воды нормативного качества при использовании отложений гидроотвала в качестве фильтрационного поля.



Рисунок 2.11 – Степень очистки воды, достигнутая в фильтрационном поле, из отложений гидроотвала обогатительной установки

Высокая степень очистки воды от взвешенных веществ свидетельствует о значительной емкости порового пространства системы, наличии механического осаждения взвешенных веществ в песчаной фракции отложений гидроотвала и создании эффективного напора фильтрующейся воды для данных геологических условий месторождения.

В основе методики проведения экспериментальных исследований эффективности отложений, используемых в качестве фильтрационного поля для очистки воды от взвешенных веществ, находится выбор оптимального напора фильтрации воды, позволяющего очищать требуемый по технологическим нормам водоснабжения расход воды и достигать заданной степени очистки от взвешенных веществ [118].

Система очистки воды представлена определенной структурой, позволяющей наиболее эффективно использовать свойства отложений для очистки воды от взвешенных веществ (рисунок 2.12). В основе структуры находится собственно фильтрационное поле, на границах которого создаются условия для наиболее эффективного проявления механического осаждения взвешенных частиц из оборотной воды в поровом пространстве.



Рисунок 2.12 – Схема системы очистки оборотной воды

Эффективность очистки воды зависит от равномерного распределения взвесей по всему поровому пространству фильтрационного поля. Для решения

этой задачи экспериментально подбираются напоры воды на входе в фильтрационное поле и на выходе из него. В связи с этим создаются структурные элементы системы очистки: подводящая сточную воду траншея, напорная траншея, обеспечивающая напорную фильтрацию воды через фильтрационное поле, и траншея, отводящая очищенную воду на приямок насосной установки.

Проведение экспериментальных исследований состоит из следующих последовательных действий.

1. С расположенной выше по течению обогатительной установки по подводящей траншее подается сточная вода в напорную траншею системы очистки. Напорная траншея расположена в верхней части гидроотвала, оставшегося после отработки блока месторождения.

2. Средняя часть гидроотвала, от уреза бывшего отстойного водоема, развалывается бульдозером по ширине, и создается прямоугольной формы фильтрационное поле, в верхней части прилегающее к напорной траншее. Мощность отложений гидроотвала после разравнивания по всей площади фильтрационного поля должна быть примерно одинаковой.

3. В нижней части фильтрационного поля, в районе уреза бывшего отстойного водоема, сооружается траншея, отводящая очищенную воду на приямок насосной установки.

4. В напорной и отводящей траншеях устанавливаются мерные рейки для измерения уровня (напоров) воды. Оголовки реек привязываются по высоте в относительной системе высот.

5. По мере наполнения водой напорной траншеи производятся наблюдения за мутностью профильтровавшейся через фильтрационное поле воды. Время появления максимального значения мутности, определенной по прозрачности столба воды, и расстояние между траншеями позволяют определить действительную скорость фильтрации воды во всем массиве фильтрационного поля.

6. Изменением напора фильтрации достигаются оптимальные экологические и технологические показатели очищаемой воды.

7. Выход системы очистки воды на стационарный эксплуатационный режим работы подтверждается относительной стабильностью уровня воды в траншеях и концентрацией взвешенных веществ в очищенной воде.

В общем случае структура зернистых сред чрезвычайно сложная и разнообразная. Формализация этой среды в целях использования для очистки воды фильтрованием показывает, что отложения гидроотвала принципиально соответствуют требованиям к зернистой загрузке фильтров, что позволяет рассматривать их как фильтрационно-сорбционную систему, перспективную для детального изучения и практического использования в целях оборотного водоснабжения при разработке россыпных месторождений. Эффективность работы

систем очистки можно существенно повысить, используя теоретические основы искусственного формирования сорбционных свойств природно-техногенных отложений.

Рекомендации по использованию фильтрационных полей при разработке месторождений полезных ископаемых

Разработка месторождений полезных ископаемых относится к одному из сложнейших видов хозяйственной деятельности, приводит к нарушениям целостности лито- и гидросферы, изменению социальных и экономических условий на территории. Воздействия разработки на окружающую среду являются комплексными, часто необратимыми, связанными с изъятием вещества и приводят к значительным негативным последствиям. Проблема рационального использования и охраны водных ресурсов при разработке месторождений относится к наиболее значимым, особенно при освоении месторождений в долинах рек, при использовании поверхностного стока в технологическом процессе. Дрaжный и гидромеханизированный способы разработки широко распространены в практике недропользования и оказывают наиболее существенное влияние на качество водных ресурсов, загрязняя поверхностные воды взвешенными веществами.

Система очистки поверхностных вод от взвешенных веществ в фильтрационных полях из аллювиально-техногенных отложений позволяет значительно снизить негативные последствия разработки месторождений в долинах рек. Область практического применения системы очистки определяется следующими основными условиями: использованием поверхностных вод в технологическом цикле и наличием в долине реки участков с преобладанием песчаных фракций в аллювиальных отложениях. Других ограничений практически нет. Этим условиям соответствует большинство месторождений, разрабатываемых в долинах рек, независимо от вида полезного ископаемого.

Практическая задача по использованию свойств песчаных фракций аллювиально-техногенных отложений для очистки воды заключается в следующем:

1) по результатам анализа материалов разведочных работ выбираются участки с преобладанием песчано-гравийного типа разреза, расположенные в нижней по течению реки части полигона планируемых работ;

2) на выбранном участке в составе проекта разработки месторождения проектируется система очистки поверхностных вод, которая содержит следующие основные элементы:

– на более высоких отметках по сравнению с руслом реки у противоположного борта долины сооружается канал-траншея по всей длине выбранного

участка, при этом максимально используются оставшиеся дражные выемки и пазухи;

– в канале сооружается каскад фильтрующих перемычек, для создания напорных водоемов по всей длине участка;

– на более низких отметках поверхности долины, вблизи русла реки, сооружается аналогичный канал для отвода профильтровавшихся очищенных вод, проходящий параллельно первому каналу. Максимально используются оставшиеся дражные выемки и понижения рельефа, которые соединяются между собой. В нижней части канала производится сброс очищенных вод в русло реки. При небольшом расстоянии до реки (менее 40–50 м) отводящий канал можно не сооружать, и вода будет разгружаться в приустьевой части реки;

– часть загрязненной воды из дражного водоема, равная объему технологической воды, необходимой для осветления, через водослив направляется в канал с подпорными перемычками, из которого происходит боковая низконапорная фильтрация через фильтрационное поле из аллювиально-техногенных отложений в сторону русла реки;

3) для эффективной работы системы очистки создаются и поддерживаются оптимальные напоры фильтрации: длина пути фильтрации в песках средней крупности не менее 30 м; величина напора (разница в уровнях между напорным и отводящим водоемом) 1,3–1,7 м.

В случае, когда месторождение находится в разработке, последовательность действий не изменяется. Минуя стадию проекта, структура системы очистки в фильтрационных полях создается одновременно с проведением работ по добыче полезных ископаемых.

Опытно-промышленные испытания разработанной авторами системы очистки показали, что при выполнении этих условий гарантированно достигается допустимая концентрация взвешенных веществ в очищенных водах.

Фильтрационные поля могут создаваться искусственно практически для любого объекта, когда на месте песчаная фракция в аллювиальных отложениях присутствует в недостаточном количестве. Исходным сырьем может быть песок любого происхождения и минерального состава. В настоящее время на практике применяется установка МЦМ (мелкие ценные минералы), разработанная в Пермской ЛОПИ (Лаборатория осадочных полезных ископаемых ПГНИУ). В установке разделение вещества происходит в результате продольно-поперечной циркуляции водного потока. Установка позволяет получить пески заданного гранулометрического состава для создания фильтрационных полей. Полученный песок отсыпается высотой 2,0 м на относительно ровную площадку. С двух противоположных сторон производится обваловка фильтрационного поля глинистым материалом. С нагорной стороны обваловка соору-

жается и выше по рельефу. На обвалованную территорию подается загрязненная взвешенными веществами вода для напорной фильтрации через песок. Ниже фильтрационного поля создается приемный водоем очищенной воды, которая может использоваться в технологических целях или сбрасываться в реки.

Простота сооружения фильтрационных полей очевидна и при наличии на месторождении горнодобывающей техники не вызывает проблем, что существенно повышает рентабельность использования предлагаемой технологии. Технологические трудности могут заключаться в выборе оптимальных эксплуатационных напоров. В случае, когда требуется очистить значительные расходы воды с меньшей степенью очистки, например, достаточной для организации оборотного водоснабжения, напоры должны быть больше. В случае приоритета степени очистки воды над расходом выбираются более низкие напоры.

Экологическая эффективность разработанной авторами системы очистки заключается в отсутствии воздействий на водные экосистемы рек и исключении загрязнения взвешенными веществами. В системе очистки не используются азональные химические вещества и реагенты. Вода как ресурс сохраняет свои органолептические свойства и химический состав.

Список литературы к главе 2

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 году: Государственный доклад. М.: Минприроды России; НИА-Природа. 2016. 639 с.
2. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году: Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020. 1000 с.
3. Мякишева А.В., Ташкинова И.Н. Теоретические основы оценки отложенного ресурсного потенциала промышленных объектов на урбанизированных территориях // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы науч.-техн. конф. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. Т.1.С. 201–204.
4. Park J.K., Mahoney J., Clark T., Krueger N., Park J. K. A Review of Urban Mining in the Past, Present and Future // *Advances in Recycling & Waste Management*. 2017. Vol. 2. 127. DOI:10.4172/2475-7675.1000127
5. Schiller G., Muller F., Ortlepp R. Mapping the anthropogenic stock in Germany: Metabolic evidence for a circular economy // *Resources Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 123. P. 93–107. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.08.007
6. Илимбетов А.Ф., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Разработка технологии формирования и комплексного освоения техногенных месторождений на

основе отходов переработки руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 4. С. 247–256.

7. Селезнев С.Г., Степанов Н.А. Отвалы Аллареченского сульфидного медно-никелевого месторождения как новый геолого-промышленный тип техногенных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 5. С. 32–40.

8. Bian Z., Lei S., Chen S., Miao X., Wang W. The Challenges of Reusing Mining and Mineral-Processing Wastes // Science. 2012. 337(6095):702-3. DOI: 10.1126/science.1224757

9. Усманова Т. В. Техногенные минеральные ресурсы юга Центральной Сибири: причины формирования, классификации и воздействия на компоненты природной среды: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск, 2014. 226 с.

10. Ежов А.И. Оценка техногенного сырья в Российской Федерации (твердые полезные ископаемые) // Горные науки и технологии. 2016. № 4. С. 62–75.

11. Макаров А.Б., Талалай А.Г., Хасанова Г.Г. Геолого-промышленные типы техногенных месторождений // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 8. С. 39–45. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-8-39-45

12. Квятковский С.А., Кожухметов С.М., Оспанов Е.А., Семенова А.С. Техногенные материалы на предприятиях Казахстана, перерабатывающих медные, полиметаллические руды и перспективы их комплексного использования // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды конгресса с междунар. участием. Екатеринбург: УрО РАН, 2017. С. 25–28.

13. Каминский Ю.Д. Вовлечение в переработку техногенных отходов механохимия для экологии). Новосибирск, 2018. 295 с.

14. Меньшикова Е.А., Блинов С.М. Экологические аспекты переработки минерального сырья Качканарского ГОКа // Роль технологической минералогии в рациональном недропользовании: материалы Рос. совещ. с междунар. участием. Москва, 15–16 мая 2018 г. М.: ВИМС, 2018. С.125–129.

15. Меньшикова Е.А., Осовецкий Б.М., Казымов К.П., Блинов С.М. Отходы как сырье для производства базальтового волокна // Базальтовые технологии. 2012. № 1. С. 21–23.

16. Шиляев А.И., Беляев Е.В., Калабеков У.К., Меньшикова Е.А. Диабазы Дагестана – источник сырья для производства базальтового волокна // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2018. № 11–12 (238-239). С. 37–41.

17. Игнатова А.М. Алгоритм исследования техногенного сырья для производства волокна и литых заготовок петруггическим рециклингом // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 4. С. 160–165.

18. Мелконян Р.Г., Суворова О.В., Макаров Д.В. Опыт и перспективы использования отходов горно-металлургического комплекса для получения стекол и стеклокристаллических материалов // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 1 (24). С. 81–88.

19. Худякова Л.И. Использование отходов горнодобывающей промышленности в производстве строительных материалов // XXI век. Техносферная безопасность. 2017. Т. 2, № 2 (6). С. 45–56.

20. Меньшикова Е.А., Осовецкий Б.М., Казымов К.П., Блинов С.М. Отходы как сырье для производства базальтового волокна // Базальтовые технологии. 2012. № 1. С. 21–23.

21. Пермская деловая газета «Бизнес класс» [Электронный ресурс]. № 39 (643). 23.10.2017. URL: <http://www.business-class.su>.

22. Чаньвинское месторождение известняков / под ред. А.И. Кудряшова, В.И. Фомина, В.П. Колесникова. Пермь: Типография купца Тарасова, 1999. 82 с.

23. Блинов С.М., Потапов С.С., Найданова Н.Ф. Формирование техногенного месторождения тонкодисперсного карбоната кальция в пределах шламо-накопителя Березниковского содового завода // Минералогия техногенеза: доклады IV семинара. Миасс, 2004. С. 80–92.

24. Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2016 году». Пермь, 2017. 222 с.

25. Блинов С.М. Основы применения геохимических барьеров для охраны окружающей среды: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Пермь, 2000. 23 с.

26. Блинов С.М., Максимович Н.Г. Методологические основы применения геохимических барьеров для охраны окружающей среды // География и окружающая среда. СПб., 2003. С. 294–304.

27. Блинов С.М., Швалев В.Н. Метод улучшения экологической ситуации в районах складирования отвалов угольных шахт // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: материалы IV Всерос. науч. чтений памяти ильменского минеролога В.О. Полякова. Миасс, 2003. С. 89–92.

28. Доможирова С.А. Разработка метода улучшения экологической ситуации на участках прежнего сброса кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна с использованием в качестве реагентов промышленных отходов // Школа экологической геологии и рационального недропользования материалы VI межвуз. молодежн. науч. конф. СПб., 2005. С. 224–226.

29. Патент RU 2336684 С2. Способ рекультивации нарушенных земель / С.М. Блинов, А. И. Хозяйкин, С. П. Усольцева, С. А. Доможирова; заявитель и патентообладатель ПГУ. 2006142543/12; заявл. 30.11.2006; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 30.

30. Шапошников Я.Б., Белкин А.В., Кошев Г.Я. Рациональное природопользование, ресурсосберегающие и природоохранные технологии при освоении минерально-сырьевых ресурсов // Эколого-экономические проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов. Пермь, 2005. С.85–89.

31. Вагапов Р.Ф., Синицин Д.А., Оратовская А.А., Тэненбаум Г.В. Строительные материалы на основе промышленных отходов республики Башкортостан // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 4. С. 279–284.

32. Константинова М.С., Калинина Е.В. Исследование возможности использования дистиллерной жидкости в качестве жидкого противогололедного материала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. 2013. № 4. С.134–143.

33. Комаров Ю.А. Обоснование технологии высотного складирования пород-отходов при разработке калийных месторождений: дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2016. 162 с.

34. ИТС 16-2016. Горнодобывающая промышленность. Общие вопросы и методы: Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М.: Бюро НТД, 2016. 220 с.

35. Шкуратский Д.Н., Русаков М.И. Использование отходов производства калийных удобрений в породных смесях для закладки выработанных пространств // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. Вып. 3. С.87–97.

36. Батулин Е.Н., Меньшикова Е.А., Блинов С.М., Наумов Д.Ю., Белкин П.А. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_23220948_93498513.pdf.

37. Сметанников А.Ф., Оносов Д.В. О возможности концентрирования скандия из отходов калийного производства // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении, науч. чтения памяти П.Н.Чирвинского: сб. науч. ст. / Перм. ун-т. Пермь, 2019. Вып. 22. С. 353–358.

38. Talens Peiro L., Villalba M., Ayres R.U.G. Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook // Journal of the Minerals, Metals & Materials Society. 2013. Vol. 65, iss. 986. P. 986–996. DOI: 10.1007/s11837-013-0666-4

39. Zhou B., Li Z., Chen C. Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies // Minerals. 2017. Vol. 7(11). P. 203. DOI: 10.3390/min7110203

40. Nomenclature of Inorganic Chemistry. IUPAC recommendations 2005. RSC Publishing, 2005. 377 p.

41. Gordeev V.V., Lisitzin A.P. Geochemical interaction between the freshwater and marine hydrospheres // *Russ. Geol. Geophys.* 2014. Vol. 5 (5–6). P. 562–581. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.05.004
42. Minerals Year Book – Rare Earths. U.S. Geological Survey, 2021. URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information>.
43. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium // *International Journal of Coal Geology*. 2012. Vol. 94. P. 67–93. DOI: 10.1016/j.coal.2011.11.001
44. Салихов В.А. Перспективы извлечения ценных цветных и редких металлов из золошлаковых отвалов энергетических предприятий Кемеровской области // *Вестник Томского государственного университета*. 2009. № 327. С. 163–168.
45. Черкасова Т.Г., Черкасова Е.В., Тихомирова А.В., Бобровникова А.А., Неведров А.В., Папин А.В. Угольные отходы как сырье для получения редких и рассеянных элементов // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2016. № 6 (118). С. 185–190.
46. Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Cherkasova T.G., Golovachev A.A. Concentrates of rare and rare earth elements from Kuzbass ash and slag waste // *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2021. 2(144). P. 35–39. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-2-35-39
47. Franus W., Wiatros-Motyka M.M., Wdowin M. Coal fly ash as a resource for rare earth elements // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. Vol. 22. P. 9464–9474. DOI: 10.1007/s11356-015-4111-9
48. Nowak J., Kokowska-Pawłowska M. Changes in the Concentration of Some Rare Earth Elements in Coal Waste // *Arch. Min. Sci.* 2017. Vol. 62. P. 495–507. DOI: 10.1515/amsc-2017-0037
49. Lange C.N., Camargo I. M.C., Figueiredo A.M. et al. A Brazilian coal fly ash as a potential source of rare earth elements // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2017. Vol. 311. P. 1235–1241. DOI: 10.1007/s10967-016-5026-8
50. Ketris M.P., Yudovich Ya.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals // *International Journal of Coal Geology*. 2009. Vol. 78. № 2. P. 135–148. DOI 10.1016/j.coal.2009.01.002.
51. Янин Е.П. Скандий в окружающей среде (распространенность, техногенные источники, вторичные ресурсы) // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. 2007. № 8. С. 70–90.
52. Ларичкин Ф.Д., Череповицын А.Е., Новосельцева В.Д., Гончарова Л.И. Состояние и перспективы российского и мирового рынка галлия // *Известия УГГУ*. 2017. Вып. 4(48). С. 108–114. DOI: 10.21440/2307-2091-2017-4-108-114

53. Osovetsky B. Placer tailings: «new» nanogold and technologies of development // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. Sofia, 2020. P. 93–100. DOI: 10.5593/sgem2020/6.1/s24.013

54. Наумов В.А., Наумова О.Б. Формы нахождения и перспективы освоения золота в природных и техногенно-минеральных образованиях Западного Урала // Вестник Пермского университета. Геология. 2019. Т.18, № 1. С. 55–63. DOI: 10.17072/psu.geol.18.1.55

55. Amato A., Becci I., De Michelis B., Innocenzi F.V., Ippolito N.M., Gomez P.J., Beolchini V.F. Sustainability analysis of innovative technologies for the rare earth elements recovery // Renew. Sustain. Energy Rev. 2019. Vol. 106. P. 41–53.

56. Binnemans K., Jones P.T., Blanpain B., Gerven T.V., Yang Y., Walton A., Buchert M. Recycling of rare earths: A critical review // J. Clean. Prod. 2013. Vol. 51. P. 1–22.

57. Скурский М.Д., Вейц Р.А., Возная А.А., Грибанова Г.И., Кижяева Н.Н. Осадочные континентальные механогенные терригенные формации россыпных месторождений полезных ископаемых // Техника и технология горного дела. 2021. № 4 (15). С. 4–12. DOI: 10.26730/2618-7434-2021-4-4-39

58. Костромин М.В., Панина Т.Ю. Комплексная технолого-экономическая оценка при разработке и проектировании россыпных месторождений золота // Вестник Забайкальского государственного университета. 2017. Т. 23, № 4. С.4–12. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-4-4-12

59. Субботин Ю.В., Овешников Ю.М., Авдеев П.Б. Водоснабжение драг и очистка технологической воды при разработке россыпи «Средняя Борзя» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 2. С. 58–68. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-58-68

60. Коннов В.И. Исследование основных факторов, влияющих на качество воды малых рек при добыче золота открытым способом в Читинской области //, Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2008. № 2. С. 130–134.

61. Кисляков В.Е., Нафиков Р.З. Технология дражной разработки россыпных месторождений Крайнего Севера // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2021. Вып. 1. С. 160–168.

62. Zhang T., Dong Y., Yang C., Guan Q., Gao J. Bedrock samples from the Chukchi Borderland, Arctic Ocean-First Chinese dredge in the polar regions // Acta Oceanologica Sinica. 2019. Vol. 38, № 11. P. 162–164.

63. Garnett R.H.T. Graphical representation of production results versus estimates in placer mining // Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy. Section B: Applied Earth Science. 2015. Vol. 124, № 3. P. 175–190.

64. Кисляков В.Е., Цимбалюк Н.А., Деннер В.И. Разубоживание песков в забое эфельными отвалами при дражной разработке россыпных месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. Вып. 1. С.147–160.

65. Robin Grayson, Chimed-Erdene Baatar. Large gold dredges-impacts in USA, Canada, Russia, Mongolia and China // World Placer Journal. 2010. Vol.10. P.1–20.

66. Cathcart R.B. Kra Canal (Thailand) excavation by nuclear-powered dredges // International Journal of Global Environmental Issues. 2008. Vol.8. P.248–255.

67. Тальгамер Б.Л., Рославцева Ю.Г. Оценка эффективности освоения дражных запасов открытым раздельным способом разработки // Перспективы развития горно-металлургической отрасли: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. С.109–117.

68. Батугина Н.С., Хоютанов Е.А., Ткач С.М. Оценка влияния количества горной массы на единицу металла на эффективность освоения россыпных месторождений золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12–1. С.39–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_39

69. Пятаков В.Г., Тальгамер Б.Л. Перспективы развития дражного способа разработки россыпных месторождений // Горный журнал. 2019. №12. С.35–38.

70. Bibiana Betancur-Corredor, Juan Carlos Loaiza-Usuga, Manfred Denich, Christian Borgemeister. Gold mining as a potential driver of development in Colombia: Challenges and opportunities // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 199. P. 538–553.

71. Алексеев В.С., Банщикова Т.С., Алексеева Е.В. Особенности техногенного золота отвальных комплексов Соловьевского золотоносного узла // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 7. С. 134–145. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_134

72. Прудников С.Г., Хертек Ч.М. Новые перспективные типы золотороссыпных месторождений Тувы // Природные ресурсы, среда и общество. 2022. № 2 (14). С. 21–27. DOI: 10.24412/2658-4441-2022-2-21-27

73. Позлутко С.Г. Физико-технические методы повышения эффективности горно-подготовительных работ при разработке мерзлых и глинистых россыпей: автореф. дис. ...канд. техн. наук. Чита, 2000. 20 с.

74. Мурзин Н.В., Тальгамер Б.Л. Сокращение водопотребления при дражной разработке россыпных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5–2. С. 22–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_22

75. Кисляков В.Е. Расчет отстойников оборотного водоснабжения при разработке россыпей. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1988. 176 с.

76. Тальгамер Б.Л. Обоснование технологии разработки труднодрагируемых россыпей с повышением экологической чистоты горных работ: автореф. дис. ...д-ратехн. наук. СПб., 1995. 39 с.

77. Долина Л.Ф. Сточные воды предприятий горной промышленности и методы их очистки. Днепропетровск, 2000. 61 с.

78. Schoderer M., Karthe D., Dombrowsky I., Dell'Angelo J., Hydro-social dynamics of mining scapes: Obstacles to implementing water protection legislation in Mongolia // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 292. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112767>

79. Gurman M.A., Shcherbak L.I., Bogomyakov R.V., Vylegzhanina E.V. Mineralogical test and production research of gold mine waste. // Journ. of Mining Science. 2016. Vol. 52(5). P. 974–981.

80. Караваева Т.И., Тихонов В.П. Природно-техногенные системы: экологические перспективы использования: монография / Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. 150 с.

81. Гурман М.А. Флокуляция взвесей технологической воды россыпного месторождения золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12–1. С. 76–84. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_76

82. Большакова И.В., Седых В.В. Электрохимическая очистка сточных вод // Непрерывное экологическое образование: материалы 3-й рег. науч.-метод. конф. Красноярск: Изд-во СибГТУ, 1998. С.158–159.

83. Лесин Ю.В. Фильтры для очистки воды из крупнокусковых отходов угледобычи // Уголь. 1986. № 2. С.43–44.

84. Зелинская Е.В., Тальгамер Б.А., Киселева М.А., Махнев А.Н., Черкасов Р.Г. Разработка рекомендаций по природоохранным мероприятиям при дражном способе переработки песков месторождения р. Ирелях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Т. 15, № 12. С.247–256.

85. Способ осветления воды и извлечения золота: пат. RU2284300 С1 / Мельникова Т.Н., Ятлукова Н.Г., Билевич И.Я.; заявитель и патентообладатель: Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук. № 2005116635/15; заявл. 31.05.2005; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27. 4 с.

86. Субботин Ю.В., Якимов А.А. Совершенствование технологии очистки карьерных вод на объектах россыпной золотодобычи // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: сб. ст. Чита, 2017. С.186–194.

87. Костромин М.В., Достовалов В.В. Рациональная технология водоснабжения и очистки сточных вод при дражной разработке россыпей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 1. С. 22–26.

88. Пособие по проектированию сооружений для очистки и подготовки воды (к СНиП 2.04.02–84 (СП 31.13330.2021) [Электронный ресурс]. Электрон. дан. COMPLEXDOC: Нормативные документы. URL: <http://www.complexdoc.ru>.

89. Караваева Т.И., Тихонов В.П. Методические основы использования природно-техногенных систем для очистки сточных вод // Вестник Пермского университета. Геология. 2018. Т. 17, № 2. С.187–194.

90. Караваева Т.И., Наумова О.Б., Тихонов В.П., Лунев Б.С. Использование аллювиально-техногенных отложений для очистки вод от взвешенных веществ при разработке россыпей // Известия вузов. Горный журнал. 2012. № 8–2012. С. 53–59.

91. Караваева Т.И., Наумова О.Б., Тихонов В.П., Лунев Б.С. Система очистки вод от взвешенных веществ при разработке россыпи алмазов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия «Естественные науки». 2012. № 5. С.84–87.

92. Тихонов В.П., Караваева Т.И. Особенности фильтрационных свойств техногенных образований // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. Краснодар: КубГАУ. 2011. № 74(10). Шифр Информрегистра: 0421100012/0481. URL: <http://ej.kubagro.ru/2011/10/pdf/48.pdf>.

93. Наумова О.Б. Четвертичный аллювий перигляциальной зоны Прикамья: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Пермь, 2002. 42 с.

94. О результатах разведки Больше-Колчимского месторождения алмазов в Красновишерском районе Пермской области за период 1954-1961 гг.: Отчет / ЗАО «Уралалмаз»; рук. А.П. Срывов. Пос. Набережный, 1962. Т. I. 313 с.

95. Лешков В.Г. Теория и практика разработки россыпей многочерпаковыми драгами. М.: Недра, 1980. 345 с.

96. Ялтанец И.М. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Гидромеханизированные и подводные горные работы. Кн. 2. Дрожная разработка россыпных месторождений. М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2009. 218 с.

97. Ворончихина Е.А. Экология ландшафта после разработки россыпей // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов: тез. конф. М., 1997. С. 238–239.

98. Шванов В.Н. Песчаные породы и методы их изучения: распространение, структуры, текстуры. Л.: Недра, 1969. 247 с.

99. Швецов М.С. Петрография осадочных пород. М.:Госгеолтехиздат, 1958. 412 с.

100. Охотин В.В. Гранулометрическая классификация грунтов на основе их физических и механических свойств. Л.: Ленгострансиздат, 1933. 71 с.

101. Попов И.В. Основы инженерно-геологического грунтоведения. М.; Л.: Госгеолитиздат, 1941. 223 с.
102. Охотин В.В. Физические и механические свойства грунтов в зависимости от их минералогического состава и степени дисперсности. М.: Гушосдор, 1937. 120 с.
103. Осовецкий Б.М. Дробная гранулометрия аллювия. Пермь, 1993. 342 с.
104. Сергеев Е.М. Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 1959. 334 с.
105. Клячко В.А. О влиянии формы зерен фильтрующего слоя на скорость фильтрационного потока // ДАН СССР. 1948. Т. 60, № 8. С.710–748.
106. Куприна Г.А. Кольматация песков. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968. 174 с.
107. Сергеев Е.М., Куприна Г.А. Исследование кольматации песков на опытных котлованах // Труды совещания по теоретическим основам технической мелиорации грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1961. С. 388–396.
108. Сергеев Е.М. Роль химико-минералогического состава вещества в процессе кольматации песков // Вестн. Моск. ун-та. Сер. физ.-мат. и естеств. наук. 1954. № 10. Вып. 7. С.3–18.
109. Неговская Т.А. Искусственная кольматация каналов // Тр. ВНИИГиМ. 1952. Т. 26–27.
110. Неговская Т.А. Кольматация как метод борьбы с фильтрацией из каналов // Гидротехническое строительство. 1948. №7. С.12–22.
111. Пикалов Ф.И. Глиняные одежды, кольматация и уплотнение в борьбе с фильтрацией из оросительных каналов // Гидротехника и мелиорация. 1950. №11. 67 с.
112. Способы борьбы с потерями воды на фильтрацию из оросительных каналов / [Ф.И. Пикалов и др.]; под. ред. Ф.И. Пикалова. М.: Сельхозгиз, 1952. 119 с.
113. Орнатский Н.В., Сергеев Е.М., Шехтман Ю.Н. Исследование процесса кольматации песков. М.: Изд-во МГУ, 1955. 183 с.
114. Танкаева Л.К. Исследование поверхностного взаимодействия кварцевого песка и глинистых частиц в процессе кольматации // Вестник Московского университета. Серия: Геология. 1965. № 5.
115. Бетехтин А.Г. Минералогия. М.: Изд-во геол. лит., 1950. 956 с.
116. ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.
117. Доработка россыпного месторождения алмазов среднего течения р. Большой Колчим действующей драгой № 141: Рабочий проект / ОАО «ПКЦ

Уралдрагмет». Екатеринбург, 2004. Т. 2: Технологическая и общеинженерная части. 66 с.

118. Тихонов В.П., Караваева Т.И., Наумова О.Б., Бардиж А.Ю. Методическое обоснование исследований по очистке воды в отложениях гидроотвала обогатительной установки // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL:<http://www.science-education.ru/111-10391>.

ГЛАВА 3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ. РЕКУЛЬТИВАЦИЯ ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ

Засоление почвенного покрова является актуальной и важной проблемой городских и промышленных ландшафтов. Основная масса засоленных земель в мире относится к сельскохозяйственным землям, однако процент антропогенно-нарушенных земель в результате засоления ежегодно возрастает [1–3]. Негативные последствия для окружающей среды, связанные с засолением почв, проявляются в результате неверного выбора и применения мелиоративных мероприятий [4], при разливах нефти [5,6], при добыче калийных солей [7–9], при использовании антигололёдных средств [10, 11].

В результате засоления почвенного покрова большие площади земель выходят из хозяйственного использования. Необратимые изменения ведут к снижению способности почв выполнять экологические функции, вследствие чего происходит деградация экосистем. В засоленных почвах снижаются уровень потенциального плодородия [12], доступность макро- и микроэлементов для растений [13], количество и разнообразие микроорганизмов и почвообитающих беспозвоночных [14]. При солевом стрессе в растениях подавляется образование белков и усиливается распад уже сформированных белковых комплексов [15, 16], изменяются процессы роста растений и способность к фотосинтезу [17, 18]. Снижение синтеза белка проявляется в заметном уменьшении скорости роста и темпов развития растений, нарушении метаболических процессов. Увеличение степени засоления приводит к нарушению гомеостатического водного баланса [16].

Для предприятий по добыче и производству солей характерно явление техногенного засоления, при котором происходит засоление почв даже в условиях гумидного климата [7–8]. Засоление почвы может быть следствием повышения содержания в почвенном растворе легкорастворимых солей. Токсичными для растений при этом являются: хлориды (NaCl , CaCl_2 , MgCl_2), сульфаты (Na_2SO_4 , MgSO_4), карбонаты (Na_2CO_3 , NaHCO_3) и нитраты (NaNO_3 , KNO_3).

Для восстановления благоприятного функционирования экосистем в результате неблагоприятных воздействий необходимо проводить мероприятия по рекультивации земель. Рекультивация земель – мероприятия по предотвращению деградации земель и (или) восстановлению их плодородия посредством приведения земель в состояние, пригодное для их использования в соответствии с целевым назначением и разрешенным использованием, в том числе путем устранения последствий загрязнения почвы, восстановления плодородного слоя почвы и создания защитных лесных насаждений [19]. Рекультивацию нарушенных земель для сельскохозяйственных, лесохозяйственных и других

целей осуществляют в два последовательных этапа – технический и биологический. Рекультивируемые земли и прилегающая к ним территория после завершения всего комплекса работ должны представлять собой оптимально организованный и экологически сбалансированный устойчивый ландшафт [20].

Опыт по рекультивации засоленных земель обширен. Существует множество способов восстановления экосистем, нарушенных в результате негативных воздействий, вызванных как засолением почвенного покрова, так и рассолением природных засоленных экосистем. Засоленные почвы можно рекультивировать, сводя к минимуму концентрацию соли, уменьшая значение рН, улучшая структуру и механический состав почвы. Восстановленная почва должна контролировать концентрацию солей, поддерживать пористость и обеспечивать благоприятную среду для переноса воды в почве и способствовать росту и развитию корней растений [21]. Для успешного применения любого существующего метода рекультивации важно обеспечить адекватную дренажную систему почвы [22].

Российскими учеными разработаны патенты на способы рекультивации почв, загрязненных высокоминерализованными водами, и способы рекультивации засоленных почв и земель. Одним из способов рекультивации является интенсивное рыхление, внесение сорбента, химмелиоранта, интенсивный полив методом дождевания и высадка растительных культур [23]. При этом в качестве сорбента используют сухие запрессованные брикеты избыточного ила, которые после отработки удаляют из почвы. Данный способ кроме предотвращения засоления повышает плодородие верхних почвенных слоев после обработки. Создание дренажно-коллекторной сети, с помощью которой удаляются промывные воды после дождевания засоленной почвы, мелиоративная вспашка или глубокое безотвальное рыхление, внесение химического мелиоранта и послепосадочное прикатывание, использование адаптированных к аридным условиям культур рекомендованы для мелиорации сельскохозяйственных земель [24]. В качестве мелиорации засоленных почв проводят высевание галофитов, при этом высевание ведут вместе с ксероформными растениями с последующей их уборкой [25]. Также в качестве растений мелиорантов на территориях, подверженных засолению, используют астру солончаковую [26]. Для того чтобы не допускать вторичного попадания солей в почву, по окончании периода цветения астры солончаковой производят уборку фитомассы.

Одним из способов рассоления солончаковых почв является деление засоленного участка на чередующиеся поля однолетних травянистых и полосы многолетних древесно-кустарниковых галофитов, и ежегодный подсев или подсаживание к более солестойким растениям-галофитам менее стойких растений, обработку почвы проводят только на участках с растениями-галофитами [27].

Для лесомелиорации засоленных земель предложены выращивание древесных пород и кустарников, внесение гипса, глубокая вспашка, снегозадержание, двухлетнее парование и осенняя перепашка, при этом подобран набор древесных пород и кустарников, глубина и периодичность культивирования [28].

Внесение удобрений и препаратов улучшают состояние почв при засолении. Так, комплексное органо-неорганическое удобрение биологического типа для улучшения засоленных земель может эффективно снижать содержание солей и щелочей [29]. Биоудобрение для улучшения засоленных и солонцеватых земель выполняет важные функции для улучшения состояния почвы, повышения плодородия, урожайности сельскохозяйственных культур и предотвращения вторичного засоления почвы [30]. Биоулучшающее удобрение, применяемое специально для засоленно-щелочных почв, улучшает функцию капиллярности частиц почвы, повышает проницаемость почвы, разрыхляет почву, увеличивает температуру земли, а также способствует инфильтрации и дренажной функции [31]. Микробиологический препарат для оздоровления солончаков быстро и эффективно оптимизирует микрофлору почвы, улучшает физические и химические свойства, усиливает биологическую активность почвы, увеличивает дренирование и проницаемость, устраняет затвердевание и повышает плодородие почвы, регулирует метаболизм растений, разлагает избыточную засоленность в почве, способствуя росту растений и повышая их стрессоустойчивость [32].

3.1. Объекты и методы

Данная работа реализована на одном из засоленных участков ВКМКС. Засоление произошло в результате аварийного разлива рассолов. Как следствие засоления, на исследованном участке отсутствует растительность. Участок окружает травянистое сообщество, состоящее из представителей злаковых, бобовых, астровых, осоковых и др.

Площадь исследуемого участка около 0,26 га. Согласно определителю почв России [33] на территории исследования выделено техногенное поверхностное образование (ТПО), входящее в группу натурфабрикатов – абралит глинистый.

Исследование почвенного покрова участка и проведение рекультивационных мероприятий продолжалось в течение четырехлетнего периода.

Химические анализы почвогрунтов включали: 1) определение актуальной и обменной кислотности потенциометрическим методом на рН-метре; 2) определение органического вещества методом мокрого сжигания по Тюрину, содержания гипса по В.А. Молодцову; 3) определение состава водной вытяжки: Na^+ и K^+ – методом пламенной фотометрии; Cl^- – титрованием с азотнокислым

серебром; Ca^{2+} , Mg^{2+} – трилонометрическим методом; SO_4^{2-} – турбидиметрическим методом путем осаждения хлоридом бария, сумму токсичных солей – расчетным методом. Микроэлементный состав определен методом спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на Elan 900 в центре коллективного пользования уникальным оборудованием ПГНИУ.

3.2. Результаты исследования

Абралит территории исследования характеризуется неблагоприятными физическими свойствами. На рисунке 3.1 изображен абралит и внешний вид участка исследования. Поверхность почвы сухая, набухшая, сцементированная, что указывает на воздействие натрия и магния на почвенно-поглощающий комплекс. Под влиянием избытка натрия развивается процесс пептизации почвенного слоя, вызывающий изменение структуры почвы, снижение капиллярной проводимости субстрата и закупорку почвенных пор глинистыми частицами. Это резко ухудшает водно-воздушное состояние почвы и пагубно влияет на почвенную микрофлору и наземную растительность, вследствие этого на участке отсутствует растительность.



Рисунок 3.1 – Внешний вид перед рекультивацией

Почвогрунт в первичный период исследования характеризовался слабощелочной реакцией $\text{pH}_{\text{вод}} = 7,8$, $\text{pH}_{\text{сол}} = 7,6$, содержание органического вещества составило 0,6 %. В составе водной вытяжки преобладающими ионами являлись сульфат-ионы 14-23 ммоль/100 г и ионы кальция 6–15 ммоль/100 г. Засоление не выявлено, содержание хлорид-ионов и ионов натрия и магния менее 1 ммоль/100 г. Отмечено присутствие гипса в виде бесцветных чешуек. Вероятно, гипс образовался осаждением сульфатов из высокоминерализованных раство-

ров, попавших на почву в результате аварийного сброса.

Для улучшения физико-химических свойств почвогрунта в 1-й год исследования проведен комплекс рекультивационных мероприятий, включающих отсыпку на поверхность участка опилок листовных пород, а также внесения карбамида (мочевина) для подкисления опилок и устранения дефицита азота в корнеобитаемом слое. Размещение опилок производили в осенний период, внесение мочевины произведено весной следующего года, через несколько недель после внесения мочевины на участке высажена травосмесь из донника белого и пырея ползучего.

Для изучения химического состава и распределения водорастворимых ионов по сезонам в поверхностном слое почвогрунта пробы отбирались в летний и осенний период 1-го года наблюдения. Также в лабораторных условиях проведен модельный опыт по фитотестированию: на отобранных грунтах выращивали семена донника и пырея в полистирольных контейнерах при дневном освещении в течение 8 недель, тест-контролем служит вермикулит. Фитотестирование является широко применимым, интегральным методом оценки экологического состояния почв [34–36].

После рекультивационных мероприятий 1-го года исследования содержание органического вещества варьировалось в пределах от 3,7 до 6,3 %, что можно объяснить внесением опилок и мочевины, реакция почвы слабощелочная. Состав водной вытяжки в летний период показал отсутствие засоления, преобладающими ионами являлись также сульфат-ионы 1,8 ммоль и ионы кальция 1,3 ммоль/100 г. Осенью отмечается значительное повышение сульфат-ионов и ионов кальция до 11 ммоль и 13 ммоль/100 г соответственно. Высокое содержание сульфатов и кальция привело к образованию гипса.

Фитотестирование показало отсутствие всходов донника белого в лабораторных условиях, количество растений пырея соответствовало контрольному варианту, однако высота растений на контроле оказалась в 2 раза больше, чем высота пырея на абралите. Почвогрунт не засолен, однако имеет щелочную реакцию, тяжелый механический состав и почти слитое строение, что могло повлиять на развитие травянистых растений.

В полевых условиях также ничего не выросло, помимо свойств почвы на это могли повлиять климатические условия, высокая температура воздуха и низкое количество осадков в летний период.

Рекультивация во 2-й период исследования, начатая в следующий вегетационный период, включала технический и биологический этапы.

Морфологическое строение абралита практически не изменилось по сравнению с предыдущим годом исследования. Почвогрунт также характеризовался глинистым механическим составом, отсутствием деления на слои и горизон-

ты (рисунок 3.2). Верхний слой серой окраски, с 0 до 10 см наблюдается рыхлое сложение, отмечается комковатость, присутствуют остатки опила, внесенного ранее. Улучшение структуры почвы в верхнем слое связано, вероятно, с проведенным в предыдущем году комплексом мероприятий.



Рисунок 3.2 – Внешний вид почвогрунта

Отбор проб для проведения химических анализов проводился с глубины 0–20 см, 20–40 см, 80–100 см. Анализ катионно-анионного состава водной вытяжки почвогрунтов показал отсутствие хлоридного натриевого засоления, которое обладает высокой токсичностью для растений. Преобладающими анионами являются сульфат-ионы, катионами – ионы кальция, в верхних слоях почвогрунта обнаружен гипс. Почвогрунты участка имеют нейтральную реакцию среды $pH_{\text{вод}} = 7,6$, $pH_{\text{сол}} = 7,2$; содержание гипса в верхнем слое 11,7 %, с глубиной 80–100 см снижается до 0,74 %; преобладающие ионы: SO_4^{2-} и Ca^{2+} , содержание сульфат-ионов 12 ммоль/100 г, ионов кальция 14,5 ммоль/100 г, с глубиной их количество не меняется. Количество хлорид ионов 0,3–0,8 ммоль, ионов натрия – 0,2–0,9 ммоль/100 г.

Экологическое состояние почвогрунта (поверхностный корнеобитаемый слой 0–20 см) оценили методом фитотестирования согласно [37]. Тест-культурой служил кресс-салат. Опыт проведен в двух повторностях, 1-я повторность – выращивание на грунте, 2-я повторность – выращивание на грунте с добавлением гуминового препарата «Гумакс», который способствует активизации микробиологической активности. Фитотестирование показало удовлетворительное экологическое состояние поверхностного слоя почвогрунта (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Внешний вид растений (фитотестирование)

Проведенные химические и биологические исследования в 1-й период рекультивации свидетельствуют об отсутствии токсичности антропогенного грунта.

Второй период рекультивации включал проведение технического и биологического этапов, схема работ представлена на рисунке 3.4.

Технический этап рекультивации участка исследования включал следующие работы: выравнивание участка, укладка и планировка органоминерального грунта (торфяной смеси), культивация органоминерального грунта с верхним 15-сантиметровым слоем исходного почвогрунта нарушенного участка ручным мотокультиватором. Органоминеральный грунт, использованный для внесения в поверхностный слой исходного почвогрунта, представляет собой торфосмесь со слабокислой реакцией и наличием удобрений NPK-комплекса.

Биологический этап проведен сразу после технического. В рамках биологического этапа рекультивации осуществлен посев травосмеси и полив ее гуминовым препаратом. Ассортимент многолетних трав подобран для климатических условий южной тайги. Ассортимент многолетних трав, использованных для биологической рекультивации, представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Ассортимент многолетних трав для биологического этапа рекультивации (осенний этап)

№ п/п	Вид растения	Долевое участие	
		кг	%
1	Овсяница луговая	10,5	46,7
2	Овсяница красная	4,5	20
3	Тимофеевка луговая	3,75	16,7
4	Клевер красный	3,75	16,7

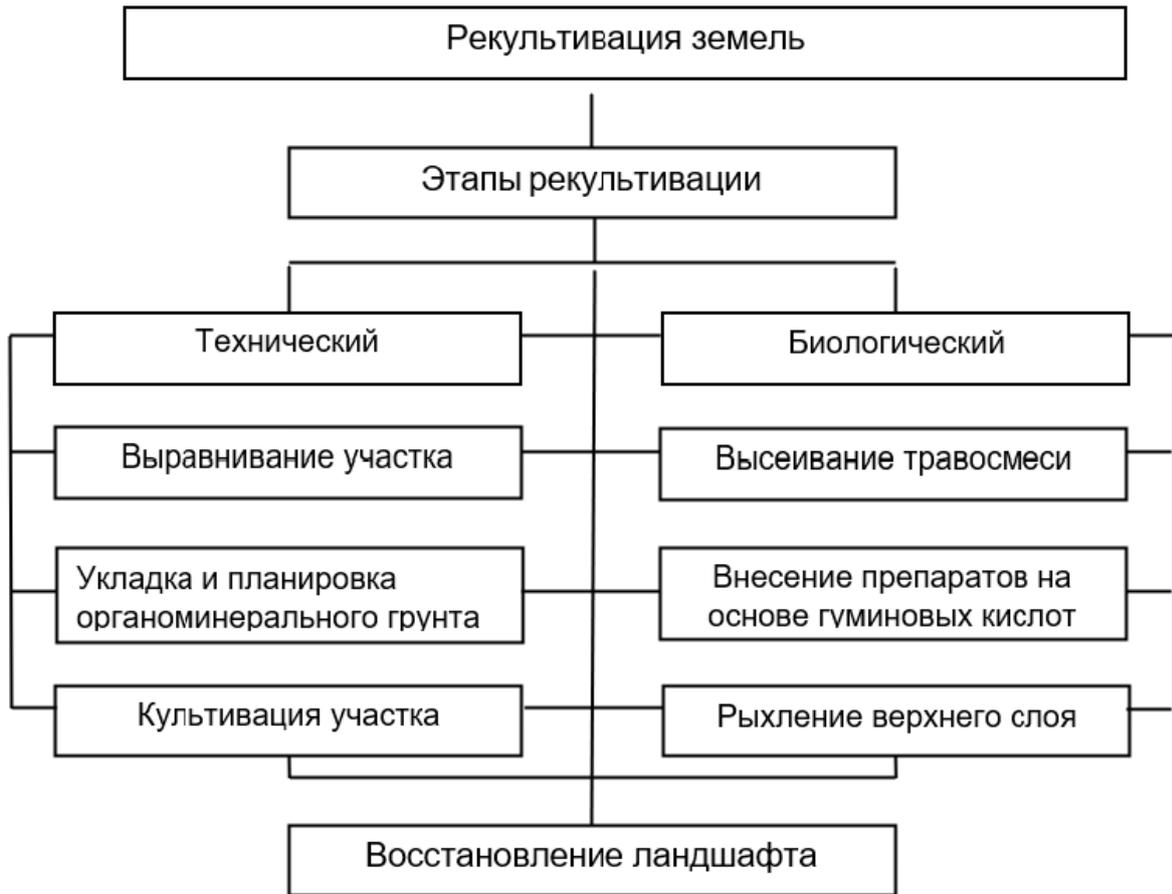


Рисунок 3.4 – Схема видов и этапов рекультивации

Посев трав производился равномерным распределением семян по поверхности почвогрунта методом разброса, после внесения семян на участок проведено перемешивание поверхностного слоя почвогрунта граблями.

Через 3 недели после биологического этапа рекультивации отобраны образцы почвогрунта с глубины 80 см с шагом 10 см на определение катионно-анионного состава (натрий, калий, кальций, магний, хлорид-ионы, сульфат-ионы, карбонат-ион, гидрокарбонат-ион), содержания тяжелых металлов (мышьяк, ртуть, свинец, кадмий, цинк, медь, никель), $pH_{\text{вод}}$, $pH_{\text{сол}}$, органического вещества.

Поверхностные слои абралита во 2-й период рекультивации характеризовались слабощелочной реакцией $pH_{\text{вод}} = 7,5 \dots 7,7$, высокой обеспеченностью органическим веществом (5–7 %) в верхнем слое, что может быть обусловлено добавлением органоминеральной смеси при выполнении рекультивационных работ. В составе водной вытяжки почвогрунтов преобладают ионы кальция 10–14 ммоль/100 г и сульфат-ионы 9,4–11,6 ммоль/100 г. Сумма токсичных солей менее 0,05 %, что указывает на отсутствие засоления. Количество хлорид-ионов и ионов натрия менее 1 ммоль/100 г. Содержание гипса варьируется от 19,8 до

8% по всему профилю абралита, имея максимальные значения в верхней части профиля.

Исследование почвогрунтов по содержанию тяжелых металлов показало отсутствие превышения ОДК и ПДК для нейтральных глинистых и суглинистых почв по СанПин 1.2.3685–21 (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Содержание валовых форм металлов, мг/кг

Номер пробы	Глубина, см	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
		мг/кг						
ОДК*	–	80,0	132,0	220,0	10,0	2,0	–	130,0
ПДК**	–	–	–	–	2,0	–	2,1	32,0
1Б-1	0–10	55,53	53,58	42,59	7,41	0,59	0,13	4,58
1Б-2	10–20	49,31	46,86	32,27	6,63	0,35	0,11	3,51

Примечание: *ОДК для суглинистых и глинистых почв по СанПин 1.2.3685–21 с рН > 5,5.

**ПДК по СанПин 1.2.3685–21.

В 3-й период рекультивации, который начался на следующий вегетационный период, было произведено досевание участка травянистыми культурами. Ассортимент многолетних трав для посадки представлен теми же видами, что и в предыдущий период, однако снижено количество вносимых семян. После посадки также осуществлялся полив семян активатором микробиологических процессов на основе гуминовых кислот.

Проведена оценка устойчивости развития растительности на исследуемом участке, замерено проективное покрытие, дана оценка наличия/отсутствия угнетения роста и развития растительности в естественных условиях, что указывает на способность к самовоспроизводству растительного покрова и зарастанию рекультивированного участка без дальнейшего вмешательства.

Пробы на определение состава водорастворимых катионов отобраны до глубины 80 см послойно с шагом 10 см в связи с отсутствием генетических горизонтов. Через 8 недель после весенней посадки растений отобран растительный материал на определение содержания тяжелых металлов.

Поверхностные слои абралита характеризовались слабощелочной реакцией $pH_{\text{вод}} = 7,6 \dots 7,7$, высокой обеспеченностью органическим веществом (около 6 %). В составе водной вытяжки почвогрунта преобладают ионы кальция и сульфат-ионы. Количество сульфат-ионов с глубиной увеличивается с 11,6 до 16,4 ммоль/100 г, для ионов кальция характерна такая же тенденция, содержание Ca^+ составило от 9,75 до 15,5 ммоль/100 г, количество хлорид-ионов и ионов натрия – менее 1 ммоль/100 г.

Данная тенденция наблюдается на протяжении всех периодов исследования наблюдения. Так, в весенний время 2-го периода исследования содержание сульфат-ионов в верхнем слое почвы составило 11,1–13,2 ммоль/100 г, ионов кальция – 13,8–15,6 ммоль/100 г, что на 17–18 % выше, чем в осеннее время.

Количество обменного натрия в 3-й период исследования составило около 5 ммоль/100 г, обменного кальция – 25 ммоль/100 г., количество обменного магния колеблется от 1,1 до 2,5 ммоль/100 г. Обеспеченность верхнего 20-сантиметрового слоя почвы подвижными соединениями калия и фосфатов очень высокое, что может быть обусловлено внесением торфяной смеси, в составе которой присутствовал NPK-комплекс.

Содержание гипса в верхнем 20-сантиметровом слое – 8,8 %, с глубиной содержание гипса увеличивается до 14,5 %. Наличие гипса в почвах может приводить к существенному снижению их водопроницаемости и изменению других физических свойств.

Источником гипса в исследованной почве послужили высокоминерализованные воды шламохранилища, обогащенные Ca^{2+} и SO_4^{2-} . Легкорастворимые хлориды натрия мигрировали, поэтому засоление отсутствует. Сульфаты и ионы кальция при упаривании привели к осаждению гипса. Данный путь образования гипса подтверждается в работах [38].

Накопление кристаллов гипса в тяжелых почвах и породах сопровождается их уплотнением, деформацией за счет сдвига и уплотнения частиц растущими кристаллами [39, 40]. Если гипс образован крупнокристаллической фракцией, а почвенный мелкозем имеет тяжелый гранулометрический состав, то в профиле формируется мощная слабоводопроницаемая толща, представляющая практически водупорный горизонт. Попытки промыть такие почвы являются малоэффективными. В гипсовых почвах наблюдается снижение количества микроэлементов, необходимых растениям.

В верхнем слое абралита и растениях, собранных с поля в 3-й период исследования, также проанализировано содержание тяжелых металлов (таблица 3.3). По сравнению с данными по содержанию тяжелых металлов осенью предыдущего года исследования (см. таблицу 3.2) содержание микроэлементов в верхнем слое почвогрунтов в наблюдаемый период снижено в 2–3 раза.

Однако согласно документу «№123-4/281 Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках» (см. таблицу 3.3) выявлено превышение содержания Co, Ni, As, Cd и Pb в травянистой растительности. Таким образом, выращенные травянистые культуры на данном этапе не могут быть использованы в качестве кормовой смеси для продуктивных животных.

Таблица 3.3 – Содержание валовых форм металлов, мг/кг

Номер пробы	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
	мг/кг						
ОДК*	–	80,0	132,0	220,0	10,0	2,0	130,0
ПДК**	–	–	–	–	2,0	–	32,0
Почвогрунт (0-20)	2,90	12,35	24,65	79,37	11,34	0,12	3,88
МДУ***	1,0	3,0	30,0	50,0	0,5	0,3	5,0
Растения	10,43	31,85	28,46	22,52	8,19	0,67	9,75

Примечание: *ОДК для суглинистых и глинистых почв по СанПин 1.2.3685–21 с pH > 5,5.

**ПДК по СанПин 1.2.3685–21.

***МДУ – N 123-4/281 Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. Утверждено Главным управлением ветеринарии Госагропрома СССР 7 августа 1987 г. (для грубых и сочных кормов).

Изучение химических свойств почвогрунта и их динамики в результате проведения рекультивационных мероприятий позволило сформировать структурную модель трансформации почвенного покрова как следствия разового поступления рассолов (рисунок 3.5). Влияние разового и долговременного поступления высокоминерализованных вод на почвы существенно отличается. Так, в местах разового поступления рассолов на почвы в условиях промывного режима засоленные почвы сульфатно-хлоридного засоления сменяются на сульфатное засоление, при этом существенная доля сульфат-ионов включается в процессы образования гипса, почвы приобретают щелочную реакцию и неблагоприятные физические свойства. Однако постепенно восстанавливается слабокислая почвенная среда, снижается сумма токсичных солей при высоком содержании $Na_{обм}$, снижается количество образовавшегося гипса. Изменение почвенно-поглощающего комплекса (ППК) почв и почвенных растворов при разовом поступлении демонстрирует структурная модель (см. рисунок 3.5), показывающая замещение H^+ и Al^+ в ППК на $Na_{обм}$ и уменьшение доли обменных ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , что обуславливает возникновение неблагоприятных физических характеристик почвы для произрастания растений. Неблагоприятные физические характеристики почвы возможно преодолеть правильно подобранным комплексом рекультивационных мероприятий.

Рекультивация исследованного участка включала разные подходы и способы. Почвы участка оказались незасоленными, однако характеризовались щелочной реакцией, низким содержанием органического вещества и питательных элементов, а также неблагоприятными физическими свойствами, что обусловило отсутствие растительности на участке.

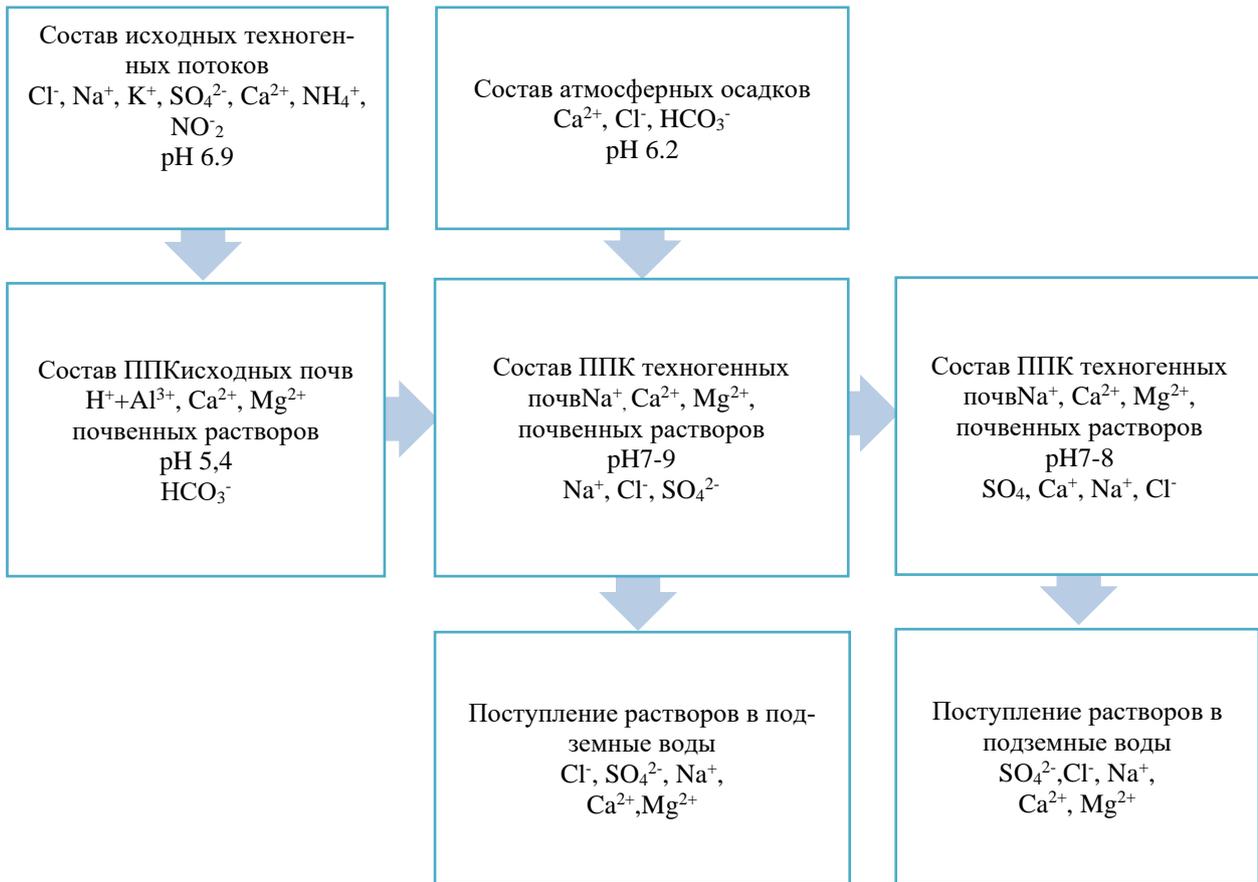


Рисунок 3.5 – Схематическая модель трансформации почвенных характеристик при разовом поступлении Na–Cl техногенных потоков

Рекультивация включала технический и биологический этапы. В результате проведенной рекультивации произошло снижение щелочности и содержания гипса. Культивация верхнего слоя и внесение торфяной смеси обеспечили более рыхлую структуру почвогрунта и насыщение верхнего почвенного слоя воздухом. В результате биологического этапа наблюдалось развитие травянистых растений, однако они выросли очагово. Одним из главных факторов формирования растительности были климатические условия. Летнее время 2-го и 3-го периодов исследования и рекультивации характеризовались наличием интервалов времени с высокой температурой воздуха и отсутствием осадков, что значительно повлияло на рост и развитие высаженных травянистых культур.

В целом верхний слой почвогрунта исследованного участка после всех проведенных мероприятий характеризовался позитивными изменениями его качеств. Обнаружено сокращение площади участка, непокрытого травянистой растительностью. В дальнейшем прогнозируется постепенное формирование на участке устойчивого травянистого покрова. Используемый способ рекультивации может быть применен при аналогичных воздействиях на почвы в условиях умеренного климата.

На основе проведенных работ построена структурная модель трансформации почвенных характеристик при разовом поступлении Na–Cl техногенных потоков.

Список литературы к главе 3

1. Засоленные почвы России / под ред. Л.Л. Шишова, Е.И. Панковой. М.: Академкнига, 2006. 854 с.
2. Руководство по управлению засоленными почвами/ под редакцией Р. Варгаса, Е.И. Панковой, С.А. Балюка, П.В. Красильникова и Г.М. Хасанхановой//Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций. М.: Изд-во МГУ, 2017. 153 с.
3. Negacz K., Malek Ž., de Vos A., Vellinga P. Saline soils worldwide: Identifying the most promising areas for saline agriculture // Journal of Arid Environments. 2022. Vol. 203. 104775. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104775>.
4. Бабичев А.Н., Бабенко А.Н. Влияние различных типов и видов мелиорации на восстановление и повышение плодородия деградированных почв // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 1. С. 157–176.
5. Щербак Г.Г., Фоминых Д.Е. Техногенное засоление и возможности рекультивации почв на территориях нефтяных месторождений Западной Сибири // Инженерные изыскания. 2012. № 9. С. 66–71.
6. Булуктаев А.А. Изменение солевого состава почв Черных земель при нефтяном загрязнении // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13, № 2. С. 184–195. DOI 10.18470/1992-1098-2018-2-184-195
7. Хайрулина Е.А. Техногенная трансформация ландшафтно-геохимических процессов в районе добычи калийно-магниевых солей // Теоретическая и прикладная экология. 2014. С. 41–45.
8. Еремченко О.З., Митракова Н.В., Шестаков И.Е. Природно-техногенная организация почвенного покрова территории воздействия солеотвалов и шламохранилищ в Соликамско-Березниковском экономическом районе // Вестник Пермского университета. Биология. 2017. Вып. 3. С. 311–320.
9. Khayrulina E., Novoselova L., Mitrakova N., Bogush A. Properties of alluvial soils of taiga forest under anthropogenic salinisation //Forests. 2021. Vol. 12, № 3. DOI: 10.3390/f12030321
10. Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С. Экологические последствия применения противогололедных реагентов для почв восточного округа Москвы // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2016. № 3. С. 40–49.

11. Азовцева Н.А., Смагин А.В. Динамика физических и физико-химических свойств городских почв при использовании солевых противогололедных средств // Почвоведение. 2018. № 1. С. 118–128.
12. Zhang W.-w, Wang C., Xue R., Wang L.-j. Effects of salinity on the soil microbial community and soil fertility // Journal of Integrative Agriculture. 2019. Vol. 18, Iss. 6. P. 1360–1368. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62077-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62077-5)
13. Азаренко Ю.А. Влияние процессов почвообразования на содержание и распределение микроэлементов в почвах лесостепной и степной зон Омской области // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2011. № 3(77). С. 26–31.
14. Haj-Amor Z., Araya T., Kim D.-G., Bouri S., Lee J., Ghiloufi W., Yang Y., Kang H., Jhariya M.K., Banerjee A., Lal R. Soil salinity and its associated effects on soil microorganisms, greenhouse gas emissions, crop yield, biodiversity and desertification: A review // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 843. 156946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156946>.
15. Петров В.Г., Ханнанов Д.А., Балицкий Я.А. Подвижность хлорид-ионов в дерново-подзолистой почве при загрязнении хлоридами щелочных металлов // Химическая физика и мезоскопия. 2019. Т. 21, № 2. С. 290–295.
16. Иваничев В.В. О механизмах солеустойчивости растений и специфике влияния засоления // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2019. Вып. 4. С. 76–88.
17. Seemann J.R., Critchley C. Effects of salt stress on the growth, ion content, stomatal behavior and photosynthetic capacity of a salt-sensitive species, *Phaseolus vulgaris* L. // Planta. 1985. Vol. 164, iss. 2. P. 151–162.
18. Chen S., Wang Z., Guo X., Rasool G., Zhang J., Xie Y., Yousef A.H., Shao G. Effects of vertically heterogeneous soil salinity on tomato photosynthesis and related physiological parameters // Scientia Horticulturae. 2019. Vol. 249. P. 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.049>
19. О проведении рекультивации и консервации земель (вместе с «Правилами проведения рекультивации и консервации земель»: Постановление Правительства РФ от 10.07.2018 № 800 (ред. от 07.03.2019).
20. ГОСТ 3 59057–2020. Охрана окружающей среды. Земли. Общие требования по рекультивации нарушенных земель. Дата введения 2021.04.01
21. Shankar V., Evelin H. Strategies for Reclamation of Saline Soils // In: Giri B., Varma A. (eds). Microorganisms in Saline Environments: Strategies and Functions. Soil Biology. 2019. Vol 56. Springer, Cham. P. 439–449. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18975-4_19
22. Qadir M., Ghafoor A., Murtaza G. Amelioration strategies for saline soils: a review // Land Degrad Devel. 2000. Vol.11. P. 501–521.

23. Патент № 2459398. Способ рекультивации почв, загрязненных минерализованными водами / Ягафарова Г.Г., Акчурина Л.Р., Федорова Ю.А., Ягафаров И.Р., Московец А.В., Лавренчук С.М. Оpubл. 27.08.2012. Бюл. № 24.

24. Патент 2649325. Способ мелиорации засоленных орошаемых земель / Бурлова В.Г., Зеленская Е.А. Опубликовано: 02.04.2018. Бюл. № 10.

25. Патент № 2108016. Способ рекультивации засоленных почв / Тазиева Э.М., Файзуллин И.Н., Шарифуллина Н.Г., Музаффаров Д.С. Оpubл. 10.04.1998.

26. Патент 2619252. Способ биоремедиации почв, загрязненных пластовыми минерализованными водами / Таратынов Д.В., Ильминских Н.Г. Оpubл. 12.05.2017. Бюл. № 14.

27. Патент № 2019943. Способ рассоления почвы / Лепехина А.А., Тутунова М.М. Оpubл. 30.09.1994.

28. Патент № 2689537. Способ лесомелиорации засоленных земель / Зеленская Е.А., Бурлова В.Г., Файзиев Р.М. Оpubл. 28.05.2019. Бюл. № 16.

29. Патент № CN 106316571A. Biological type organic-inorganic compound fertilizer for improvement in saline land and preparation method thereof (Комплексное органо-неорганическое удобрение биологического типа для улучшения засоленных земель и способ его приготовления) / Ван Шэн. Китай. Оpubл. 01.11.2017.

30. Патент № CN105152811A. Biofertilizer for improving saline and alkaline lands and preparation method and application of biofertilizer (Биоудобрение для улучшения засоленных и солонцеватых земель и способ приготовления и внесения биоудобрения) / Ван Лихуа, Сунь Лей, Лю Баоде, Лю Юн. Китай. Оpubл. 21.08.2018.

31. Патент № CN102219614B. Biological improving fertilizer special for saline-alkalisoil and preparation method thereof (Биоулучшающее удобрение специальное для засоленно-щелочных почв и способ его приготовления) / Лю Хунцин, Лю Тайсян, Лю Хунфа. Китай. Оpubл. 03.04.2013.

32. Патент № CN102344812B. Microbiological preparation for improving alkaline land, its preparation method and its application (Микробиологический препарат для оздоровления солончаков, способ его приготовления и применение) / Инь Руксин, Юэ Шоусонг, Ван Ин. Китай. Оpubл. 08.02.2011.

33. Классификация и диагностика почв России / под. ред. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.

34. Багдасарян А.С. Биотестирование почв техногенных зон городских территорий с использованием растительных организмов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ставрополь, 2005. 24 с.
35. Николаева О.В., Терехова В.А. Совершенствование лабораторного фитотестирования для экотоксикологической оценки почв // Почвоведение. 2017. № 9. С. 1141–1152. DOI: 10.7868/S0032180X17090052
36. Еремченко О.З., Москвина Н.В., Митракова Н.В., Колбик А.Е., Пахоруков И.В. Оценка экологического состояния засоленных, кислых и щелочных почв методом фитотестирования // Вестник Пермского университета. Биология. 2019. Вып. 1. С. 63–71.
37. Патент РФ № 2620555. Способ оценки биологической активности и токсичности почв и техногенных почвогрунтов/ Еремченко О.З., Митракова Н.В. 2016.
38. Ямнова И.А., Панкова Е.И. Гипсовые новообразования и формирующие их элементарные почвообразовательные процессы // Почвоведение. 2013. № 12. С. 1423–1436. DOI: 10.7868/S0032180X13120125
39. Зайдельман Ф.Р. Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов. М.: КДУ, 2009. 720 с.
40. Фазели С., Абтахи А., Поч Р.М., Аббаслоу Х. Процессы гипсонакопления и изменения порозности почв в южной части Ирана (провинция Фарс) // Аридные экосистемы. 2017. Т. 23, № 2 (71). С. 12–23.

ГЛАВА 4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ НА ОСНОВЕ СОЛЕЙ КАЛЬЦИЯ

Одним из перспективных методов защиты и очистки природных водоемов и стоков от загрязнений является применение геохимических барьеров. Геохимические барьеры – это такие участки земной коры, в которых на коротком расстоянии происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрации [1, 2]. Сущность метода заключается в переводе загрязняющих компонентов в малоподвижные формы (рисунок 4.1). Геохимические барьеры выполняют функцию своеобразных «фильтров». При этом возможно использование существующих природных и создание искусственных геохимических барьеров.



Рисунок 4.1 – Схема создания искусственных геохимических барьеров
для охраны окружающей среды
(на примере разработки месторождений полезных ископаемых)

Месторождения полезных ископаемых представляют собой природные геохимические барьеры, на которых формируются участки с повышенной концентрацией элементов. Разработка месторождений приводит к разрушению этих барьеров.

Из огромного количества вещества, изымаемого из природной среды, в конечный продукт превращается не более чем 2 %. Горная масса, находящаяся в стационарных условиях природного месторождения, при попадании в условия

земной поверхности начинает окисляться, восстанавливаться, выщелачиваться и т.д. В результате происходит растворение минералов горных пород отвально-го массива, миграция металлоносных вод за его пределы и, как следствие, значительное загрязнение поверхностных вод.

А.И. Перельманом и А.Е. Воробьевым впервые предложено использование геохимических барьеров для решения экологических задач, связанных с деятельностью горной промышленности [3]. Рассмотрены основные типы геохимических барьеров: механические, физико-химические и биогеохимические, которые могут быть как природными, так и техногенными. Выделены три аспекта практического значения геохимических барьеров:

- ✓ на барьерах происходит усиление сигнала, т.е. опробование участков барьеров может быть более информативным и более экономичным;
- ✓ используя геохимический барьер, можно локализовать техногенное загрязнение;
- ✓ для создания техногенных барьеров предлагается использовать местные строительные материалы, в том числе отходы производства, что позволяет удешевить борьбу с загрязнениями.

Как показано в работах отечественных и зарубежных исследователей [4–7], в качестве материалов для искусственных геохимических барьеров могут использоваться:

- ✓ отходы горнопромышленного комплекса (вскрышные породы, хвосты обогащения), содержащие химически активные минералы;
- ✓ смеси химически активных или модифицированных различным образом минералов;
- ✓ продукты и отходы глубокой химико-металлургической переработки руд и концентратов.

В этих исследованиях рассмотрены различные способы применения геохимических барьеров:

- ✓ устройство антифильтрационных экранов;
- ✓ фильтрация растворов через барьер с осаждением загрязняющих веществ;
- ✓ добавление вещества барьеров в раствор (в природные водоемы, хвостохранилища, отстойники и т.д.).

Среди направлений использования искусственных геохимических барьеров, кроме очистки природных и сточных вод от тяжелых металлов, радиоактивных элементов, нефтепродуктов, могут быть выделены:

- ✓ доизвлечение ценных компонентов из природного и техногенного сырья методами физико-химической геотехнологии;

- ✓ гидроизоляция хвосто- и шламохранилищ, накопителей, отстойников и т.д.;
- ✓ закрепление грунтов в строительстве.

Для предотвращения распространения токсичных элементов с природными водами и защиты окружающей среды в районах расположения наземных хранилищ отходов применяют барьеры различного типа, обладающие противомембранными и противомиграционными свойствами.

Европейский проект CRYSTECHSALIN [8] направлен на разработку уникальной технологии для уплотнения грунтов в прибрежных водоносных горизонтах. Непроницаемые барьеры формируются в процессе кристаллизации водонерастворимых солей для предотвращения проникновения морской воды в прибрежные пресные воды. Разработанная технология перспективна:

- ✓ для снижения уровня грунтовых вод при строительстве фундаментов, туннелей, при разработке карьеров и т.д.;
- ✓ строительства резервуаров для грунтовых вод;
- ✓ восстановления загрязненных территорий путем иммобилизации или инкапсуляции растворенных загрязняющих веществ.

В широком масштабе в качестве защитной завесы возможно применение алюмосиликатных гелей, для получения которых используют продукты кислотного разложения бесполевошпатовых нефелиновых пород группы ийолит-уртита. Нефелин способен легко разлагаться в слабых кислотах с последующим образованием вначале золь и гелей, а затем кристаллогидратов. Коэффициент фильтрации песков зоны аэрации и безнапорного водоносного горизонта в результате использования алюмосиликатных гелей может быть понижен ~ в 200 раз [9].

В работах [10–12] описаны гидроизоляционные составы на основе нефелиновых продуктов, которые характеризуются рядом благоприятных свойств и параметров, определяющих их широкое использование на различных инженерно-геологических объектах:

- ✓ высокая проницаемость;
- ✓ относительная стабильность образования гелей на основе нефелина в различных условиях и средах (минерализованные жидкие среды и различные по составу твердые материалы);
- ✓ доступность и низкая стоимость исходных материалов и получаемых композиций;
- ✓ возможность использования имеющегося стандартного оборудования для приготовления и закачивания гелеобразующего состава.

Авторами обоснованы следующие приоритетные направления использования гидроизоляционных составов на основе нефелина:

- ✓ строительство, ремонт и эксплуатация скважин в нефтегазодобывающей отрасли;
- ✓ отверждение жидких отходов, в том числе содержащих различные токсичные и радиоактивные вещества;
- ✓ создание противofильтрационных завес в рыхлых и трещиноватых породах в карьерах, дамбах, плотинах, в кровле различных хранилищ газа, нефти, отходов;
- ✓ изоляция песчано-гравийных оснований и трещиноватости пород с поверхности под складирование отходов, создание искусственных водоёмов;
- ✓ нейтрализация и обезвоживание кислых стоков химических предприятий.

Из природных минералов наиболее широкое применение для геохимических барьеров нашли карбонаты. Примеры успешного использования кальцита, доломита и магнезита рассмотрены в ряде исследований [6, 13, 14]. Показано также, что очистка воды может эффективно осуществляться с помощью карбонатсодержащих трепелов. Карбонатные трепела с содержанием 20–30 % кальцита и выше являются высокоэффективными сорбентами ионов тяжелых и цветных металлов, радионуклидов Sr, Cs [15].

К распространенным материалам для сорбционных геохимических барьеров, стоимость которых в десятки раз меньше искусственных, относятся цеолиты, кремни (аморфная разновидность кремнезема), диатомит, трепел, опока, активные глины, торф, асбест, вспученные вермикулит и перлит [6]. Несмотря на недостатки этих материалов – дефекты структуры, непостоянство химического состава, меньшая по сравнению с искусственными сорбентами сорбционная емкость, – их применение часто экономически более целесообразно вследствие низкой стоимости.

В ряде публикаций представлены примеры успешного использования продуктов и отходов химико-металлургической переработки руд и концентратов. Так, аморфный кремнезем может рассматриваться как крупнотоннажный побочный продукт кислотной переработки многих руд и концентратов (например, нефелинового) [4]. Карбонатит в составе барьера играет роль регулятора среды, нейтрализуя образующуюся при синтезе гидросиликатов серную кислоту и обеспечивая устойчивую щелочную реакцию растворов. Эффективен данный барьер и в технологиях очистки природных и сточных вод [16].

Перспективным материалом для создания геохимических барьеров являются термоактивированные хвосты обогащения медно-никелевых руд Печенгского рудного поля, на 60 % состоящие из серпентинов [17].

Для нейтрализации кислых ($\text{pH} = 2 \dots 4$) высокоминерализованных сульфатных шахтных вод Кизеловского угольного бассейна (Пермская область),

имеющих в составе повышенные содержания железа, алюминия, тяжелых металлов, предложено использовать щелочные отходы ПО «Сода» (г. Березники). Водородный показатель шахтных вод может быть повышен с 2,5–2,7 до 6,0–6,5. При этом содержание общего железа снижается с 240 до 0,5 мг/л. Содержание алюминия после нейтрализации ниже пределов чувствительности анализа, при исходной концентрации 98 мг/л. Содержание сульфатов снижается на 300 мг/л. Реагент может добавляться непосредственно в водоотлив без строительства классических очистных сооружений [18].

Рудные месторождения чрезвычайно разнообразны по горно-геологическим условиям. Наряду с практически сухими рудами встречаются и значительно обводненные. Обводненность – наличие подземных и поверхностных вод в условиях ведения горных работ при вскрытии и разработке месторождения. Она характеризуется совокупностью факторов, определяющих сложность ведения горных работ: величина притока и напора воды, находящейся над выработками; водоотдача пород; устойчивость пород по отношению к размывающему и растворяющему действию воды [19].

В истории разработки калийных солей шахтным способом известны десятки случаев, когда проникновение в горные выработки даже небольшого количества воды из водоносных горизонтов заканчивается гибелью рудника. В Германии погибло от затопления более 35 калийных рудников, некоторые из них были затоплены за несколько часов, на других с водопритоками боролись в течение десятков лет. В Канаде на руднике «Пейшно Лейк» незначительный приток воды наблюдался десять лет. В 1986 г. её объем резко возрос. Исследование выявило наличие водопроводящих каналов, связывающих все водоносные породы вплоть до поверхности. Через год было объявлено о закрытии рудника. В России в 1986 г. затоплен наиболее производительный, оснащенный самым современным и мощным оборудованием рудник третьего Березниковского рудоуправления.

Как показывает многолетний опыт, путями проникновения воды и рассолов в выработанное пространство могут являться: геологоразведочные скважины, тектонические или другие геологические нарушения соляных залежей, нарушения сплошности пород под влиянием горных работ. Для предотвращения угрозы затопления рудников до начала эксплуатации тщательно изучают гидрогеологические условия калийных месторождений и в первую очередь выясняется степень водоносности покровной толщи и ее контактов с соляным массивом. При обнаружении проникновения в рудник рассолов применяют специальные меры для ликвидации их притока: цементацию или битумизацию окружающих выработку пород, установку на отдельных участках выработок водонепроницаемой крепи, перемычек и тампонаж скважин [20, 21].

При проведении тампонажа участков водопроявлений для снижения проницаемости пород и предотвращения дальнейшего развития карстовых явлений на солерудниках применяется широкий арсенал тампонажных составов. К ним относятся растворы на основе портландцемента, глиноземистого и магнезиального цемента, глин, глиноцементных смесей [22]. Для этих целей также применяются синтетические смолы КМ-3, разбавленные насыщенным раствором хлористого калия [23], карбамидно-лигнинные составы, меламиноформальдегидные смолы [24], а также растворы (суспензии, аналогичные глиноцементным), приготовляемые из порошков хлорида натрия или хлорида калия [25].

Разработаны высокоэффективные глиноцементные растворы и успешно внедрены в процессе тампонажа подземных выработок и карстовых пустот, обводненных высокоминерализованными рассолами солей магния, что позволило ликвидировать аварию на руднике № 2 Стебниковского завода калийных солей [26].

С целью повышения надежности предотвращения затопления путем гидродинамической изоляции тампонируемого участка водозащитной толщи предложен следующий способ [27]. В районе нарушения водозащитной толщи бурят с поверхности две скважины и в ту из них, которая находится выше по потоку, осуществляют закачку тампонажного раствора, а из другой – откачку рассола. Гидродинамическая изоляция нарушения осуществляется превышением дебита откачки над дебитом закачки. В качестве тампонажного раствора используют смесь, не агрессивную к соляным породам и близкую по вязкости к насыщенным рассолам, циркулирующим в микропустотах этих пород. Такая смесь состоит из насыщенного раствора соли и синтетического вяжущего, представленного винильными мономерами: акриламидом, соли акриловой кислотой, гидроксидом кальция и полиакриламидом [57]. Через определенное время фронт движения тампонажного раствора достигает зоны нарушения и его часть начинает проникать в трещины и пустоты водозащитной толщи, постепенно заполняя их и изолируя от вышележащего рассольного горизонта. Тампонирование завершают после полного прекращения притока рассола в горные выработки.

В сложных геологических и гидрогеологических условиях горных выработок некоторых шахт, рудников и подземных сооружений по условиям их эксплуатации предъявляются жесткие требования в части водонепроницаемости крепи. С целью исключения проникновения через крепь подземных вод предложен следующий способ [58]. Закрепленное пространство между наружной и внутренней обделками заполняют незатвердевающей вязкой жидкостью, находящейся под давлением, превышающим давление подземных вод. Кроме того, промежуток между внешней и внутренней обделками может быть разделен на герметичные отсеки посредством диафрагм. Таким образом, между наружным

и внутренним слоями крепи образуется своего рода кольцевой гидрозатвор, позволяющий обеспечить полную водонепроницаемость.

Предложен способ техногенного эпигенеза тампонирования водопроницаемых участков или зон в соляных горных породах [28], включающий вскрытие зон повышенной водопроницаемости тампонажными скважинами, подготовку на поверхности соляных растворов, при необходимости их подогрев и закачку в зону тампонирования. В качестве тампонажного состава используют насыщенные истинные растворы солей или естественные рассолы, из которых при снижении температуры кристаллизуется избыток соли, тампонирующий водопроницающие трещины.

Важным результатом тампонажных работ является восстановление над фильтрующей зоной слоя рассолов, который препятствует поступлению пресных слабоминерализованных вод и не допускает возобновления процесса растворения соляного пласта. Способ особенно эффективен на начальной стадии водопроявления в горной выработке, когда процесс интенсивного карстования соляного массива еще не получил развития. Омоноличивание трещиноватого массива соленасыщенными растворами по существу является процессом техногенного эпигенеза, представляющего собой вторичный процесс осаждения полезного ископаемого в трещинах соляного массива и их цементацию.

К настоящему времени установлены преимущества использования комплексных геохимических барьеров, состоящих из искусственных смесей химически активных пород и минералов: серпентина и карбонатита, а также применения продуктов и отходов химико-металлургической переработки руд и концентратов: активного кремнезема и продукта солянокислотной переработки хвостов обогащения вермикулитовых руд. Развитие данного направления позволит снизить нагрузки на окружающую среду в районах разработки месторождений и переработки природных минералов. Однако в каждом конкретном случае выбор метода зависит от условий эксплуатации рудника.

4.1. Физико-химический анализ систем с целью оптимизации состава растворов для тампонирования горных пород

В природе происходят процессы, приводящие к герметизации пористых горных пород, трещин и стыков грунтовых образований, что позволяет приостановить приток рассолов в шахты или изолировать особо загрязненные участки. Кристаллизация или осаждение играют главную роль в этих процессах. Образование карбоната и сульфата кальция (гипса), сульфата бария во многих случаях приводит к полной остановке притока воды и рассола. Процессы минераллообразования в природе протекают очень медленно, и лишь незначи-

тельная часть вещества проникает в пористую среду грунтовых пород. Имеющиеся в литературе данные убедительно доказывают, что копирование природных процессов может быть успешно использовано при решении экологических проблем.

Высаливание хлорида натрия из водных растворов с помощью органических растворителей

Тампонирование пород можно проводить водорастворимыми солями, например хлоридом натрия. Однако растворимость этой соли мало зависит от температуры, поэтому политермическая кристаллизация в данном случае будет неэффективна. Нами рассмотрена возможность высаливания хлорида натрия с помощью органических растворителей.

Высаливание – выделение вещества из его раствора прибавлением другого вещества, обладающего большей растворимостью. Высаливание применяют в технологии при гетерогенных процессах извлечения и разделения в системах жидкость – жидкость и жидкость – твердое вещество для перевода ценного компонента в осадок или другую жидкую фазу.

Метод высаливания может быть использован при перекристаллизации веществ, нестойких к нагреванию, а также веществ, растворимость которых мало изменяется с повышением температуры. Например, растворимость хлорида натрия при росте температуры от 0 до 100 °С меняется всего на 1,8 %. Выделять эту соль из насыщенного раствора можно добавлением хлороводородной кислоты или газообразного HCl. Снижение растворимости соли происходит за счет действия одноименного иона Cl⁻. Выделить хлорид натрия в твердую фазу можно путем добавления к насыщенному раствору органического растворителя, который хорошо смешивается с водой, но соль в нем практически не растворяется. В качестве органических растворителей можно использовать кетоны (ацетон, метилэтилкетон) и предельные одноатомные спирты (метиловый, этиловый, пропиловый и т.д.).

Количественно процессы высаливания можно рассчитать по фазовым диаграммам тройных систем соль – органический растворитель – вода. В качестве примера на рисунках 4.2–4.11 представлены диаграммы растворимости систем с хлоридом натрия и органическими растворителями [29]. Отличительной особенностью приведенных диаграмм является наличие области расслаивания, где в равновесии находятся две жидкие фазы, и области монотектического равновесия (две жидкие и одна твердая фаза). Исключением являются системы с метиловым, этиловым и третичным бутиловым спиртом.

Анализ диаграмм растворимости позволяет сделать следующие выводы:

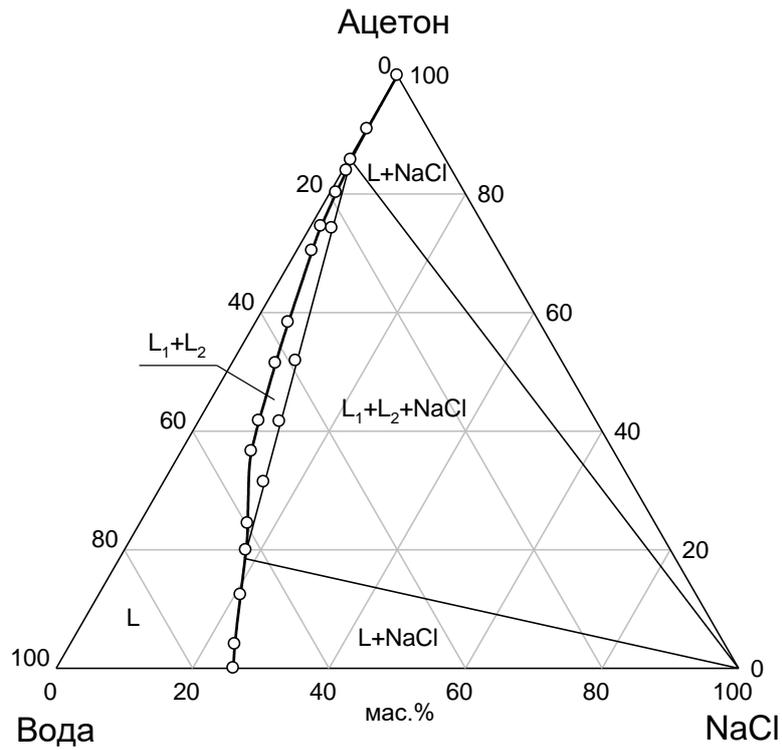


Рисунок 4.2 – Фазовая диаграмма системы NaCl – ацетон – вода при 25 °C

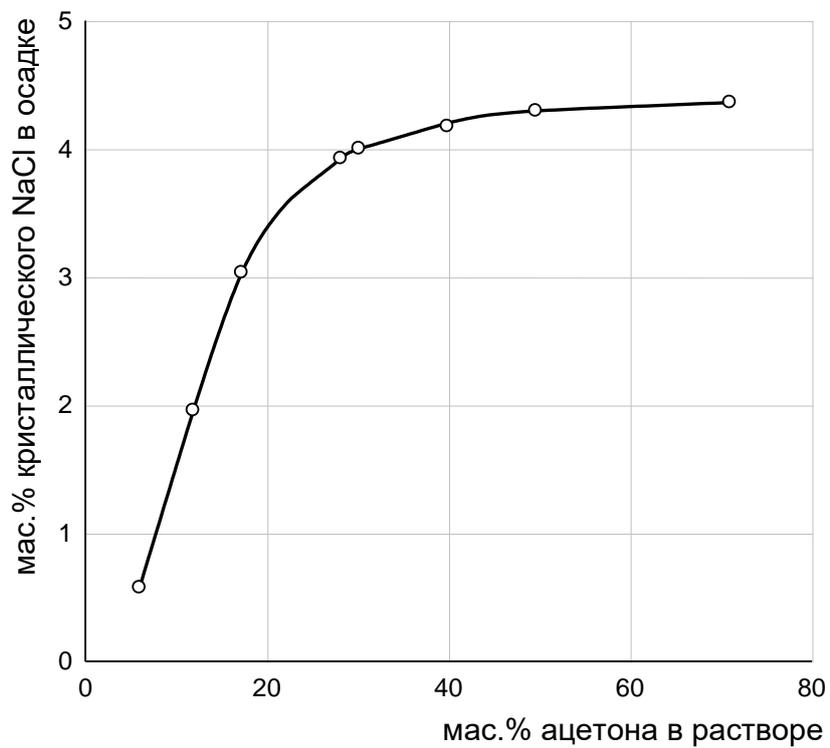


Рисунок 4.3 – Зависимость количества кристаллического хлорида натрия от концентрации ацетона в водном растворе

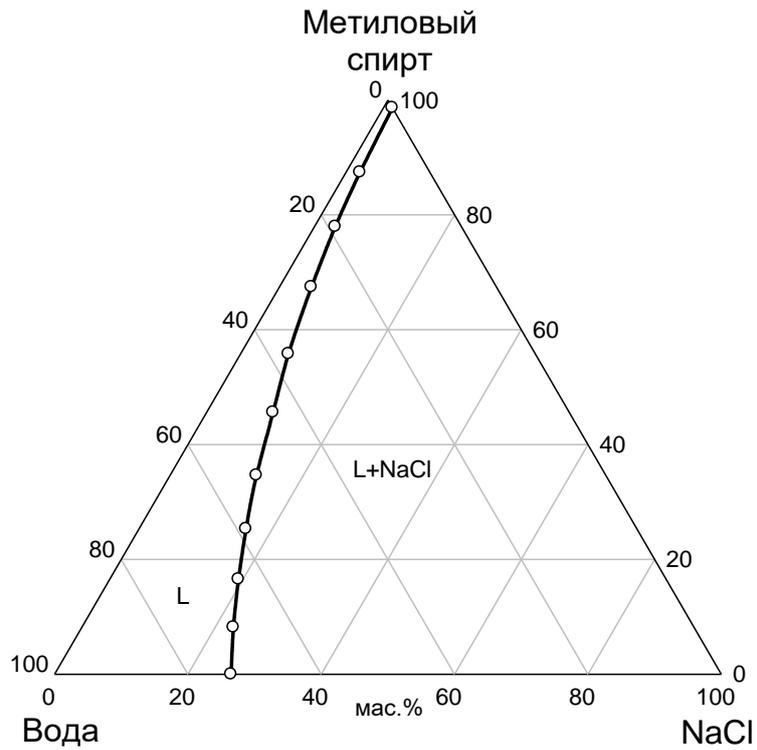


Рисунок 4.4 – Фазовая диаграмма системы NaCl – метилвый спирт – вода при 25 °С

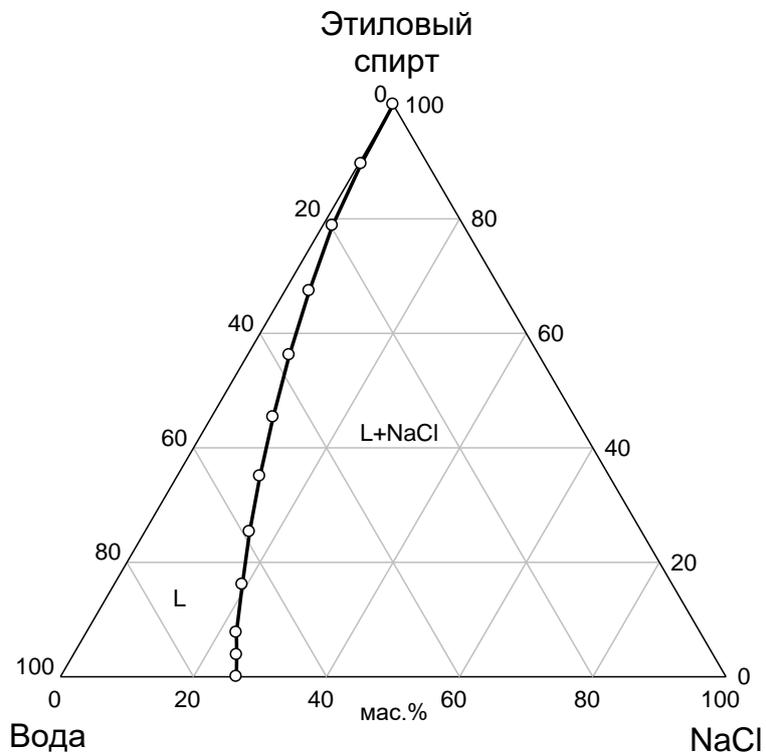


Рисунок 4.5 – Фазовая диаграмма системы NaCl – этиловый спирт – вода при 28 °С



Рисунок 4.6 – Фазовая диаграмма системы NaCl – изопропиловый спирт – вода при 25 °С

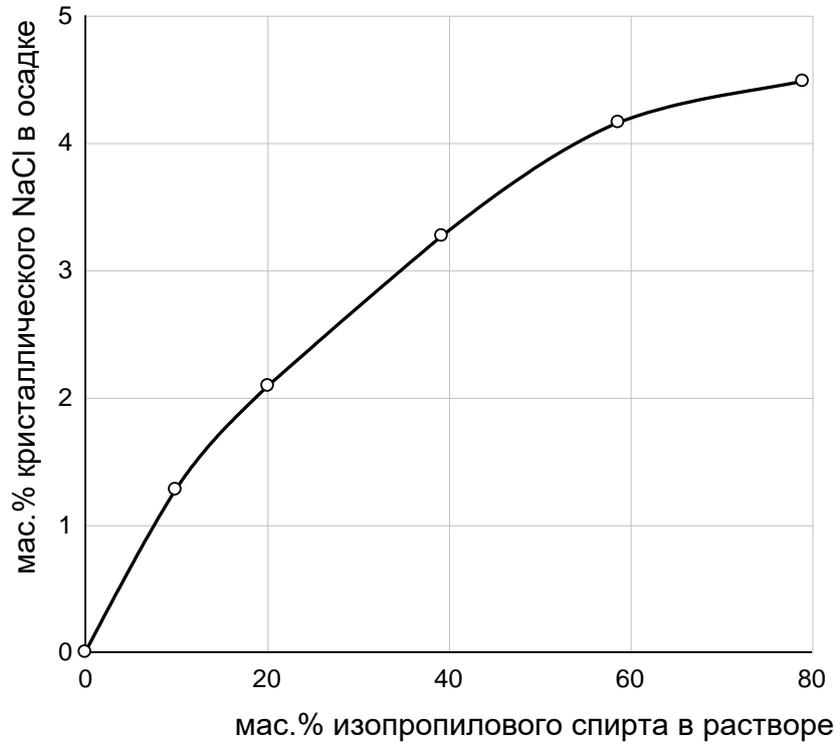


Рисунок 4.7 – Зависимость количества кристаллического хлорида натрия от концентрации изопропилового спирта в водном растворе

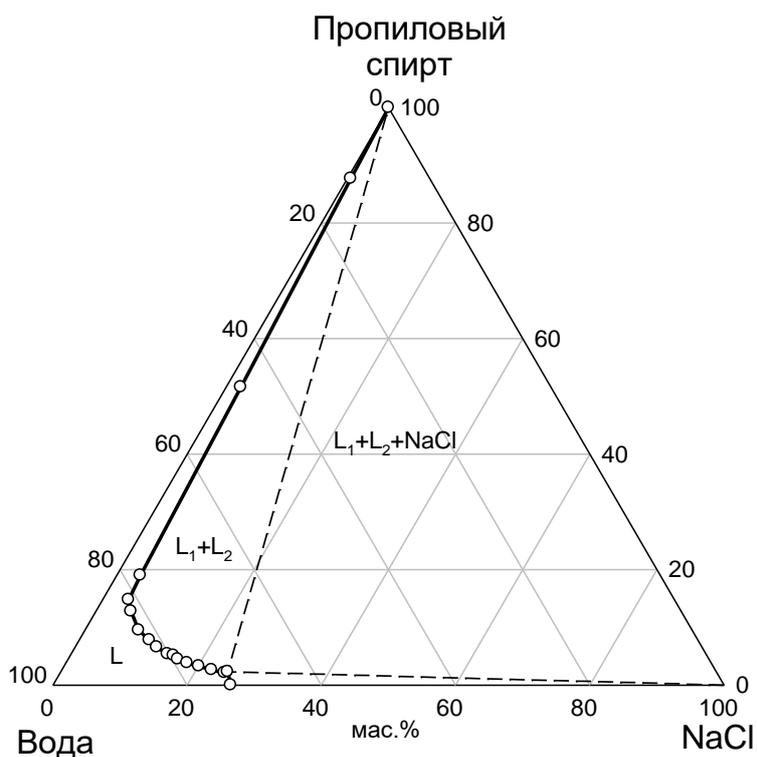


Рисунок 4.8 – Фазовая диаграмма системы NaCl – пропиловый спирт – вода при 23–25 °С

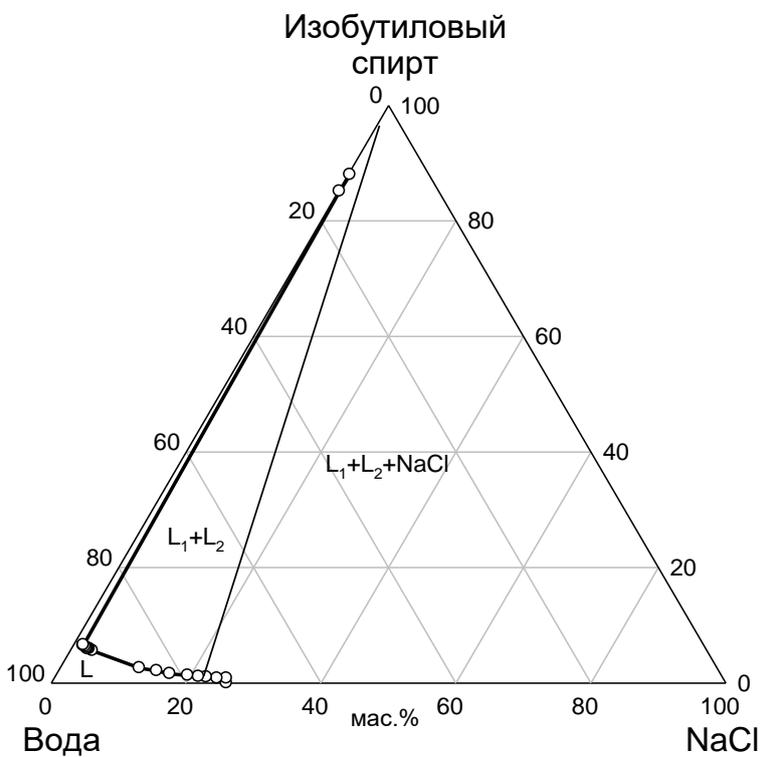


Рисунок 4.9 – Фазовая диаграмма системы NaCl – изобутиловый спирт – вода при 25 °С

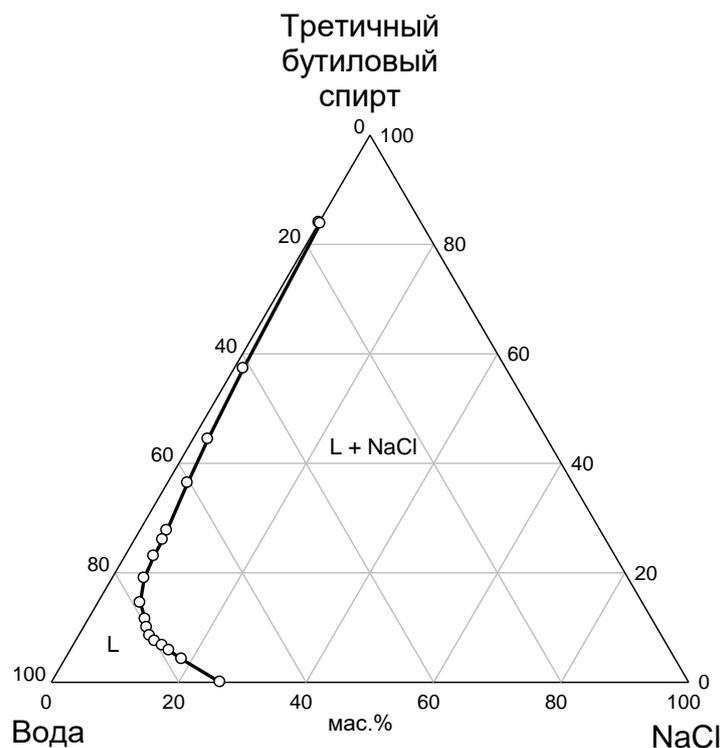


Рисунок 4.10 – Фазовая диаграмма системы
NaCl – третичный бутиловый спирт – вода при 30 °С

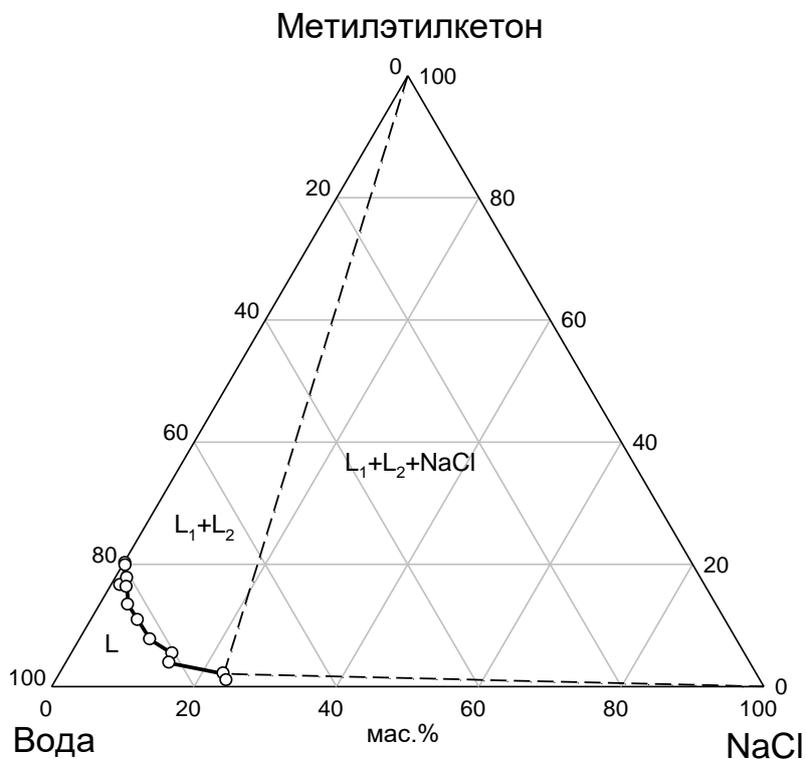


Рисунок 4.11 – Фазовая диаграмма системы
NaCl – метилэтилкетон – вода при 25 °С

1. Высаливающая способность органических растворителей возрастает при увеличении длины углеводородного радикала. Одновременно с этим происходит увеличение области расслаивания.

2. Высаливание хлорида натрия возможно только из насыщенного раствора соли. Прибавление органического растворителя к разбавленным растворам может не привести к высаливанию, так как фигуративная точка смеси может оказаться в гомогенной области или в области расслаивания. В каждом конкретном случае можно рассчитать минимальную концентрацию раствора, из которого высаливание хлорида еще возможно.

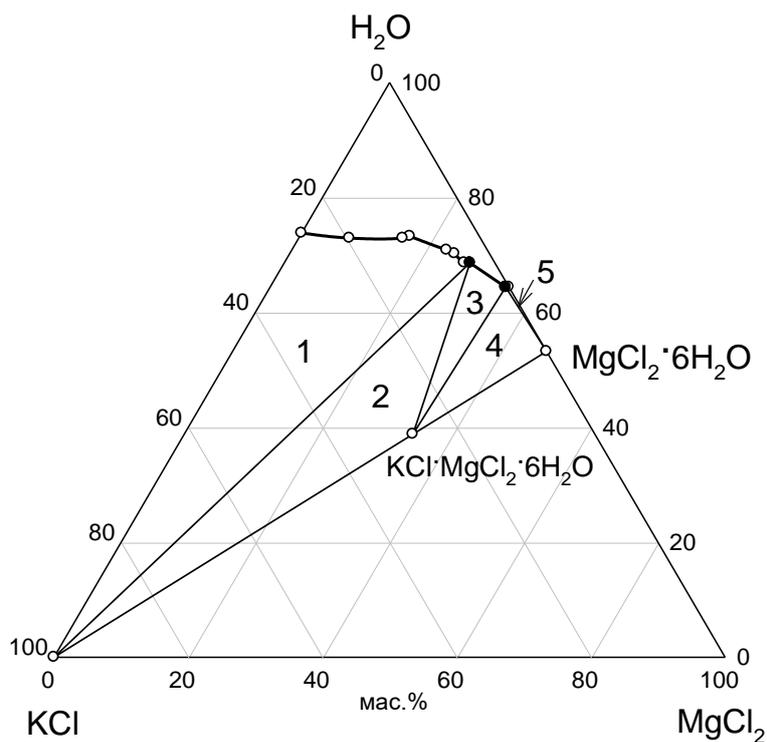
3. Наличие области расслаивания отрицательно сказывается на эффективности процесса высаливания, значительно снижая количество кристаллизующейся соли.

На основании диаграмм растворимости теоретически рассчитаны и апробированы в лабораторных условиях процессы высаливания хлорида натрия уксусной кислотой и изопропиловым спиртом. На рисунках 4.3 и 4.7 представлена зависимость количества кристаллической соли от концентрации органического растворителя в растворе. Даже при введении значительных количеств органического растворителя количество выпавшего осадка хлорида натрия не превышает 4,5 г из 100 г раствора.

Возможность использования органических растворителей в природных объектах должна быть оценена прежде всего с точки зрения экологической безопасности. Рассмотренные органические растворители относятся к 3-му и 4-му классу опасности, являются легковоспламеняющимися жидкостями и требуют специальной защиты при работе с ними.

Кристаллизация сульфата и карбоната кальция

В случае неминуемого затопления калийного рудника для предотвращения дальнейшего растворения хлорида натрия и карналлита могут использоваться насыщенные растворы природного минерала бишофита ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), которые закачиваются в подземные выработки [21]. Недостатком этого способа является использование хорошо растворимой соли магния, которая может образовывать карналлит ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) с хлоридом калия. Анализ справочных данных по растворимости в четырехкомпонентной системе $\text{KCl} - \text{NaCl} - \text{MgCl}_2 - \text{H}_2\text{O}$ показал, что в ней существуют две эвтонические точки, в каждой из которых в качестве одной из твердых равновесных фаз присутствует карналлит (рисунки 4.12, 4.13) [29]. Эта двойная соль наиболее уязвима в процессе растворения. В отличие от каменной соли карналлит начинает растворяться уже через пару часов после соприкосновения с насыщенным раствором хлорида натрия. В связи с этим представляется нецелесообразным использование



Поля кристаллизации: 1 – KCl; 2 – KCl + KCl · MgCl₂ · 6H₂O;
 3 – KCl · MgCl₂ · 6H₂O; 4 – KCl · MgCl₂ · 6H₂O + MgCl₂ · 6H₂O; 5 – MgCl₂ · 6H₂O
 Рисунок 4.12 – Фазовая диаграмма системы KCl – MgCl₂ – H₂O при 25 °C

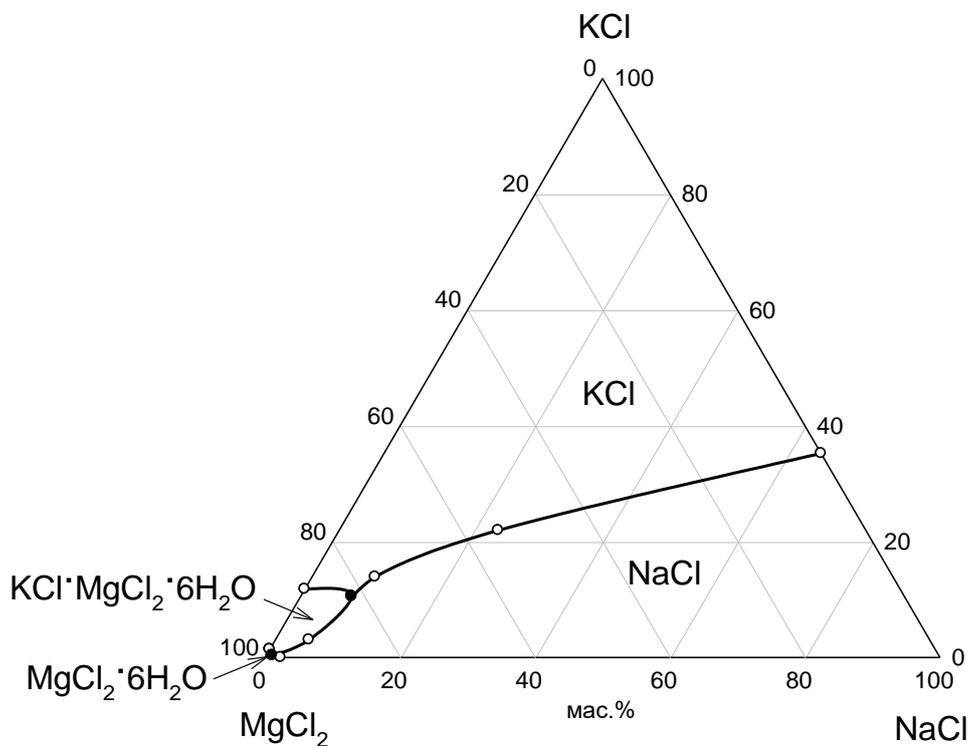


Рисунок 4.13 – Фазовая диаграмма системы
 KCl – NaCl – MgCl₂ – H₂O при 25 °C

растворов бишофита в породах с высоким содержанием хлорида калия. Взаимодействие бишофита с сильвинитом может привести к образованию хорошо растворимого карналлита, что усугубит процессы растворения породы.

Существенным недостатком тампонирувания пород водорастворимыми солями [28] является то, что при изменении состава или разбавлении раствора, контактирующего с осадками солей, может произойти их растворение аналогично природным минералам. Минимизировать процесс вторичного растворения позволит осаждение солей кальция (сульфат, карбонат, силикат), которые практически не растворяются в воде и малорастворимы в растворах хлорида натрия. Так растворимость гипса в 1 моль-экв./л растворе хлорида натрия составляет 7 г/л, карбоната кальция – 0,05 г/л.

В качестве раствора, содержащего соль кальция, предложен эвтонический раствор четырехкомпонентной системы $KCl - NaCl - CaCl_2 - H_2O$ (рисунок 4.14, таблица 4.1) [29]. Выбор этого раствора обусловлен тем, что он насыщен не только относительно хлорида кальция, но и относительно хлоридов натрия и калия, поэтому он не будет растворять сильвинит и галит. Присутствие в породе карналлита нежелательно, так как этот минерал будет растворяться в растворе хлоридов, что подтверждено экспериментально. Даже длительное нахождение сильвинита и галита в эвтоническом растворе не приводит к их заметному растворению. Карналлит же растворяется в течение нескольких суток. Соотношение солей в эвтоническом растворе (таблица 4.2) практически не зависит от температуры, изменяется только концентрация воды и хлорида кальция, что связано с увеличением растворимости этой соли при повышении температуры.

Таблица 4.1 – Состав эвтонических растворов системы $KCl - NaCl - CaCl_2 - H_2O$

Температура, °С	Состав эвтонического раствора, мас. %				ρ_4^t , г/см ³	Вязкость, сПз
	NaCl	KCl	CaCl ₂	H ₂ O		
25	0,62	3,22	44,82	51,34	1,469	4,20
50	0,50	4,19	55,28	40,03	1,805	-

Таблица 4.2 – Состав растворов осадителей

Осадитель	Концентрация, мас. %	ρ^{20} , г/см ³	η^{25} , сПз
Na ₂ SO ₄	21,9	1,1886	1,41
Na ₂ CO ₃	22,5	1,2482	1,95
H ₂ SO ₄	40,0	1,3028	1,65

Таблица 4.3 – Скорость фильтрации растворов до и после кристаллизации соли кальция

Вид породы	Первоначальная скорость фильтрации, л/ч	Скорость фильтрации после кристаллизации соли кальция, л/ч			Скорость фильтрации, % от первоначальной		
		CaSO ₄		CaCO ₃	CaSO ₄		CaCO ₃
		Раствор Na ₂ SO ₄	40%-ный раствор H ₂ SO ₄		Раствор Na ₂ SO ₄	40%-ный раствор H ₂ SO ₄	
Песок	1,440	0,470	0,220	0,490	32,6	15,3	34,0
Галит	0,320	0,156	0,023	0,186	48,8	7,2	58,1
Сильвинит	0,450	0,360	0,024	0,082	80,0	5,3	18,3

Таблица 4.4 – Оптимальные объемы эвтонического раствора и раствора осадителя

Вид породы	Оптимальный объем эвтонического раствора, л на 1 кг грунта	Объем H ₂ SO ₄ , л на 1 кг грунта	
		40%-ный водный раствор	95%-ный водный раствор*
Песок	0,290	0,210	0,060
Галит	0,140	0,100	0,028
Сильвинит	0,142	0,087	0,015

*Величина получена путем пересчета концентрации.

В лабораторных условиях эффективность тампонирувания путем осаждения солей кальция исследована на трех видах пород: речной песок, галит и сильвинит. Оптимизацию процесса кристаллизации солей кальция проводили по следующим параметрам:

1. Снижение фильтрующей способности грунта.
2. Состав, концентрация и объем раствора осадителя.
3. Соотношение объема эвтонического раствора и раствора осадителя.

Полученные данные представлены в таблице 4.3. Установлено, что скорость фильтрации максимально снизилась при использовании в качестве осадителя 40%-ного раствора серной кислоты. Это объясняется повышенной концентрацией сульфат-иона, которая не может быть получена при использовании насыщенного раствора сульфата натрия из-за ограниченной растворимости этой соли и, как следствие, большего количества осажденного сульфата кальция. Оптимальные объемы эвтонического раствора и раствора серной кислоты на единицу массы породы определены экспериментально (таблица 4.4).

Исследования показали, что процесс осаждения сульфата кальция в большей степени отвечает задаче тампонирувания водопроницаемых участков породы. Растворимость карбоната кальция в растворах хлорида натрия значительно ниже, чем у сульфата кальция, однако карбонат менее эффективно снижает водопроницаемость грунтов.

Теоретический расчет материального баланса процесса кристаллизации сульфата кальция

Ниже приведены формулы, по которым можно рассчитать теоретическое количество раствора сульфата натрия и серной кислоты, необходимое для полного осаждения соли кальция из эвтонического раствора.

Количество хлорида кальция в эвтоническом растворе рассчитывают по формуле

$$M_{CaCl_2} = \frac{V_{ЭР} * \rho_{ЭР} * C_{CaCl_2}}{100},$$

где M_{CaCl_2} – масса хлорида кальция в эвтоническом растворе (ЭР); $V_{ЭР}$ – объем эвтонического раствора; $\rho_{ЭР}$ – плотность эвтонического раствора; C_{CaCl_2} – концентрация хлорида кальция в эвтоническом растворе, мас.% (при 25 °С равна 44,82 мас. %).

Количество сульфата натрия, необходимого для полного осаждения сульфата кальция, можно рассчитать на основании уравнения реакции (1):

$$M_{Na_2SO_4} = \frac{M_{CaCl_2} * 142}{111},$$

где $M_{Na_2SO_4}$ – масса сульфата натрия; 142 – молекулярная масса сульфата натрия; 111 – молекулярная масса хлорида кальция.

Количество насыщенного раствора сульфата натрия рассчитывают по формуле

$$M_{HP} = \frac{M_{Na_2SO_4} * 100}{C_{Na_2SO_4}},$$

где M_{HP} – масса насыщенного раствора сульфата натрия; $C_{Na_2SO_4}$ – концентрация сульфата натрия в насыщенном растворе, мас. % (при 25 °С равна 21,9 мас. %).

Объем насыщенного раствора сульфата натрия:

$$V_{HP} = \frac{M_{HP}}{\rho_{HP}},$$

где V_{HP} – объем насыщенного раствора сульфата натрия; ρ_{HP} – плотность насыщенного раствора сульфата натрия.

Согласно теоретическим расчетам для полного осаждения сульфата кальция на 1 м³эвтонического раствора необходимо 2,4 м³ насыщенного раствора сульфата натрия. Расход солей на 1 м³ воды приведен в таблице 4.5.

Количество серной кислоты, необходимой для полного осаждения сульфата кальция, можно рассчитать на основании уравнения реакции (2):

$$M_{H_2SO_4} = \frac{M_{CaCl_2} * 98}{111},$$

где $M_{H_2SO_4}$ – масса серной кислоты; 98 – молекулярная масса серной кислоты; 111 – молекулярная масса хлорида кальция.

Таблица 4.5 – Расход солей и серной кислоты на 1 м³ воды (25°С)

Раствор	Масса, кг
Эвтонический раствор	хлорид натрия – 6,5, хлорид калия – 58,8, хлорид кальция – 847,6
Раствор сульфата натрия	сульфат натрия – 279,6
40%-ный раствор серной кислоты	95%-ная серная кислота – 710

Количество раствора серной кислоты заданной концентрации рассчитывают по формуле

$$M_{PK} = \frac{M_{H_2SO_4} * 100}{C_{H_2SO_4}},$$

где M_{PK} – масса раствора серной кислоты; $C_{H_2SO_4}$ – концентрация серной кислоты в растворе, мас. %.

Объем раствора серной кислоты

$$V_{PK} = \frac{M_{PK}}{\rho_{PK}},$$

где V_{PK} – объем раствора серной кислоты; ρ_{PK} – плотность раствора серной кислоты.

Согласно теоретическим расчетам для полного осаждения сульфата кальция на 1 м³ эвтонического раствора необходимо 1,4 м³ 40%-ного раствора серной кислоты. Расход 95%-ной серной кислоты на 1 м³ воды приведен в таблице 4.5. При растворении безводного хлорида кальция и концентрированной серной кислоты в воде выделяется большое количество тепла, и температура раствора значительно повышается. Это надо учитывать при приготовлении растворов, чтобы избежать ожогов. При приготовлении растворов серной кислоты необходимо кислоту добавлять в воду.

Реальное соотношение эвтонического раствора и раствора осадителя будет зависеть от свойств тампонируемой породы. Данные, полученные в лабораторных условиях для трех видов пород: песок, галит и сильвинит приведены в таблице 4.5.

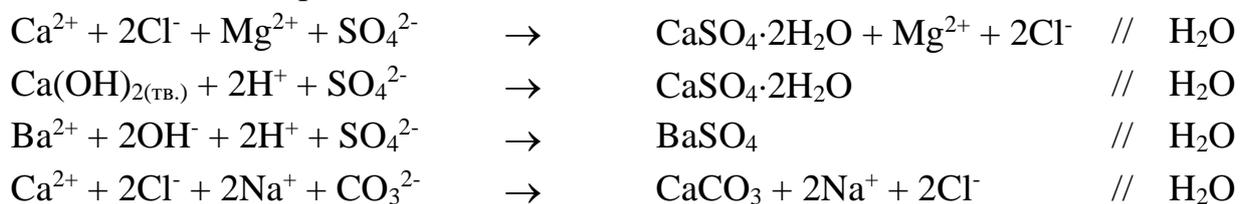
4.2 Обоснование и подбор состава ингибитора кристаллизации водонерастворимых солей кальция из водных растворов

При использовании двух растворов, один из которых содержит соли кальция, а другой – сульфаты, карбонаты или силикаты натрия, образование водонерастворимых солей будет происходить в основном на границе раздела фаз. Кристаллизация солей в объеме возможна только при перемешивании этих двух растворов, что практически недостижимо в природных условиях. Если в качестве тампонажных составов использовать пересыщенные растворы сульфата или карбоната кальция с добавлением ингибитора кристаллизации, то кристаллизация солей будет происходить в объеме раствора в пласте породы, подлежащей уплотнению.

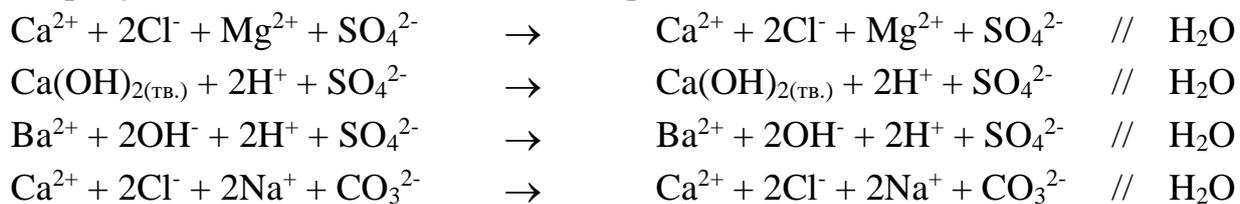
Образование осадка соли происходит в том случае, когда произведение концентрации образующих ее ионов превышает значение произведения растворимости (K_{sp}). Кинетика кристаллизации зависит как от природы соли, так и от

степени пресыщения раствора. Например, осаждение сульфата бария протекает очень быстро, если превышено значение $K_{sp} = 10^{-10}$ моль²/л² при 25 °С. Из-за низкой растворимости сульфата бария даже следовые количества иона бария в растворах, содержащих сульфат-ионы, вызывают осаждение соли. Напротив, пересыщенные растворы сульфата кальция стабильны длительное время. При достижении критической концентрации сульфата кальция в растворе происходит спонтанная кристаллизация. Растворы сульфата кальция обычно имеют тенденцию к перенасыщению, что указывает на низкую скорость зародышеобразования. В пересыщенных водных растворах 9,6 г CaSO₄/л раствора (16 °С) кристаллизация начинается не позднее, чем через 25 мин. Скорость кристаллизации увеличивается с повышением температуры.

Без ингибитора осаждения:



В присутствии подходящего ингибитора осаждения:



Прозрачные, временно стабильные
растворы

↓

Деактивация ингибитора

↓

BaSO₄; CaCO₃ ; CaSO₄·2H₂O

Образование слоев или монокристаллов
в зависимости от состава раствора

Рисунок 4.15 – Схема приготовления пересыщенных растворов
BaSO₄, CaCO₃ и CaSO₄

В присутствии ингибиторов кристаллизации образуются временно стабильные пересыщенные растворы [30]. Так, например, растворимость сульфата бария в воде при 25 С составляет 2 мг/л. При добавлении соответствующего ингибитора возможно образование пересыщенного раствора, с содержанием соли

до 400 мг/л [31]. Таким же образом можно приготовить стабильные пересыщенные растворы сульфата и карбоната кальция (рисунок 4.15).

Ингибитор оказывает влияние на процесс зародышеобразование и на рост кристаллов. Он предотвращает спонтанную кристаллизацию, адсорбируясь на зародышах кристаллов и блокируя центры кристаллизации. Ингибиторы не увеличивают растворимость соли, они влияют на кинетику кристаллизации. При закачивании в скважину пересыщенный раствор взаимодействует с породой, что приводит к дезактивации ингибитора и спонтанной кристаллизации соли. Дезактивации ингибитора возможна в результате реакции гидролиза, а также при его адсорбции на поверхности окружающих минералов.

Ингибиторы осаждения сульфата кальция

На процесс кристаллизации сульфата кальция из растворов существенное влияние оказывает степень пересыщения [32–34], температура [35–37], ионная сила раствора [38–42], а также природа и концентрация ингибитора [43–48].

Ингибиторы осаждения сульфата кальция можно разделить на три группы [49–55]:

- ✓ низкомолекулярные соединения (декагидраттетрабората натрия, лимонная, янтарная и винная кислоты);
- ✓ белки (желатин, гидролизованный кератин);
- ✓ длинноцепочечные полимеры с карбоксильными группами (альгиновая кислота, карбоксиметилцеллюлоза, полиакриловая кислота, полиметакриловая кислота).

Кроме того, показано, что присутствие ионов магния, кадмия, железа, хрома способствует торможению реакции осаждения сульфата кальция [56–59].

Установлено, что наиболее эффективными ингибиторами кристаллизации дигидрата сульфата кальция (гипса) являются полимерные молекулы [60–62], содержащие карбоксильные группы, и фосфорсодержащие полиэфиры.

Влияние минеральных кислот на процессы ингибирования исследовано наиболее полно в случае полиакриловой кислоты. Ингибирующая активность полиакриловой кислоты зависит от ее концентрации и типа добавляемой кислоты. Доказано, что даже в отсутствие других добавок серная и хлороводородная кислоты оказывают ингибирующее действие на кристаллизацию солей. В случае хлороводородной кислоты это связано с увеличением растворимости сульфата кальция. Хотя серная кислота тоже повышает растворимость сульфата кальция, эффект будет незначительным при используемых концентрациях кислоты, поэтому его следует отнести к изменению активности сульфата кальция. Добавление хлоруксусной кислоты к полиакриловой кислоте приводит к

уменьшению ингибирующей способности, пропорционально уменьшению степени ионизации полиакриловой кислоты.

Влияние pH на ингибирующую способность добавок связано со степенью ионизации полиакриловой кислоты и карбоксиметилцеллюлозы. В интервале pH = 3...11 степень ионизации увеличивается от 10 до 90 %. Добавление щелочи усиливает ингибирующее действие полиакриловой кислоты и карбоксиметилцеллюлозы пропорционально росту степени ионизации.

Таким образом, когда сильную кислоту добавляют к раствору поликарбонных соединений, ионизация последних подавляется и их ингибирующая активность в значительной степени снижается. В случае хлороводородной и серной кислот скорость кристаллизации уменьшается из-за специфического действия этих кислот. Если концентрация полиакриловой кислоты такова, что ее ингибирующая способность ниже, чем у минеральных кислот с определенной концентрацией, то добавление кислот вызывает увеличение ингибирования.

При низких концентрациях щелочи карбоксильные группы практически полностью ионизированы, и группы, имеющие отрицательные заряды, отталкиваются друг от друга, делая молекулу полимера в целом более жесткой. С повышением концентрации щелочи возрастающая ионная сила растворов нейтрализует эффект электростатического отталкивания, что приводит к увеличению подвижности молекулы. Этот процесс влияет на адсорбционную способность молекул ингибиторов на поверхности кристаллов сульфата кальция.

Изменения скорости кристаллизации сульфата кальция могут быть объяснены двумя процессами:

- ✓ взаимодействие ингибитора с ионами кальция в растворе, приводящее к изменению активности ионов;
- ✓ адсорбция ингибитора на поверхности кристалла.

Ниже представлены результаты исследования процессов ингибирования кристаллизации сульфата кальция из водных растворов в присутствии ряда органических соединений и хлорида натрия.

Исследовано влияние водорастворимых полимеров, натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы со степенью полимеризации 600 (КМЦ-600), 800 (КМЦ-800) и 1000 (КМЦ-1000) и полиакриламида (ПАА) с молекулярной массой $14 \cdot 10^6$ на осаждение сульфата кальция из пересыщенных растворов. Полиакриламид не содержит в своей структуре карбоксильных групп, в то же время его высоковязкие растворы могут способствовать ингибированию роста зародышей кристаллизации соли [61].

Исходные растворы хлорида кальция и сульфата натрия готовили из соответствующих безводных кристаллических солей марки хч. Пересыщенные растворы готовили при комнатной температуре 23–25 °С смешиванием равных

объемов исходных растворов, в раствор сульфата натрия добавляли ингибитор. При средних и высоких пересыщениях растворов момент появления первых кристаллов практически совпадает с началом массовой кристаллизации. Результаты экспериментов сведены в таблицу 4.6. Установлено, что с ростом концентрации ингибитора увеличивается продолжительность индукционного периода кристаллизации. Учитывая, что концентрация ингибиторов, в большинстве случаев, не превышает 1 г/л, а время, необходимое для приготовления и закачивания тампонажного раствора, составляет от 2 до 8 часов, исследование ингибирования кристаллизации сульфата кальция проводили из пересыщенных растворов с концентрацией 0,14 моль/л, содержащих 0,5 и 0,1 г/л КМЦ.

Таблица 4.6 – Влияние КМЦ на устойчивость пересыщенных растворов CaSO_4

$C(\text{Ca}^{2+}) = 0,11 \text{ М}$ $C(\text{SO}_4^{2-}) = 0,11 \text{ М}$	Концентрация КМЦ*, г/л Индукционный период, ч	0,1 <1	0,5 <5	1,0 >12		
$C(\text{Ca}^{2+}) = 0,14 \text{ М}$ $C(\text{SO}_4^{2-}) = 0,14 \text{ М}$	Концентрация КМЦ*, г/л Индукционный период, ч	0,1 <0,5	0,5 <2	1,0 <5	1,5 >7,5	
$C(\text{Ca}^{2+}) = 0,15 \text{ М}$ $C(\text{SO}_4^{2-}) = 0,15 \text{ М}$	Концентрация КМЦ*, г/л Индукционный период, ч		0,5 <1	1,0 <3,5	1,5 <5,5	2,0 >7
$C(\text{Ca}^{2+}) = 0,17 \text{ М}$ $C(\text{SO}_4^{2-}) = 0,17 \text{ М}$	Концентрация КМЦ*, г/л Индукционный период, ч		0,5 <0,5	1,0 <1	1,5 <1	2,0 <2

*Использовали обойный клей «КМЦ» (ТУ 2231-034-07507908–2001).

Установлено, что ингибирующая способность КМЦ увеличивается с ростом степени полимеризации. Для растворов, содержащих 0,5 г/л КМЦ, индукционный период с увеличением молекулярной массы полимера повышается в 2,5 раза – с 80 мин для КМЦ-600 до 200 мин для КМЦ-1000 (рисунок 4.16, *а*). При концентрации 1,0 г/л КМЦ индукционный период возрастает с 120 мин для КМЦ-600 до 600 мин для КМЦ-1000 (рисунок 4.16, *б*). В первом приближении зависимость концентрации ионов кальция в растворе от времени осаждения в изученном временном интервале описывается линейным законом.

ПАА не проявил себя эффективным ингибитором кристаллизации сульфата кальция, несмотря на большую молекулярную массу. Увеличение концентрации полимера в два раза привело к возрастанию индукционного периода кристаллизации только в полтора раза (рисунок 4.17, таблица 4.7).

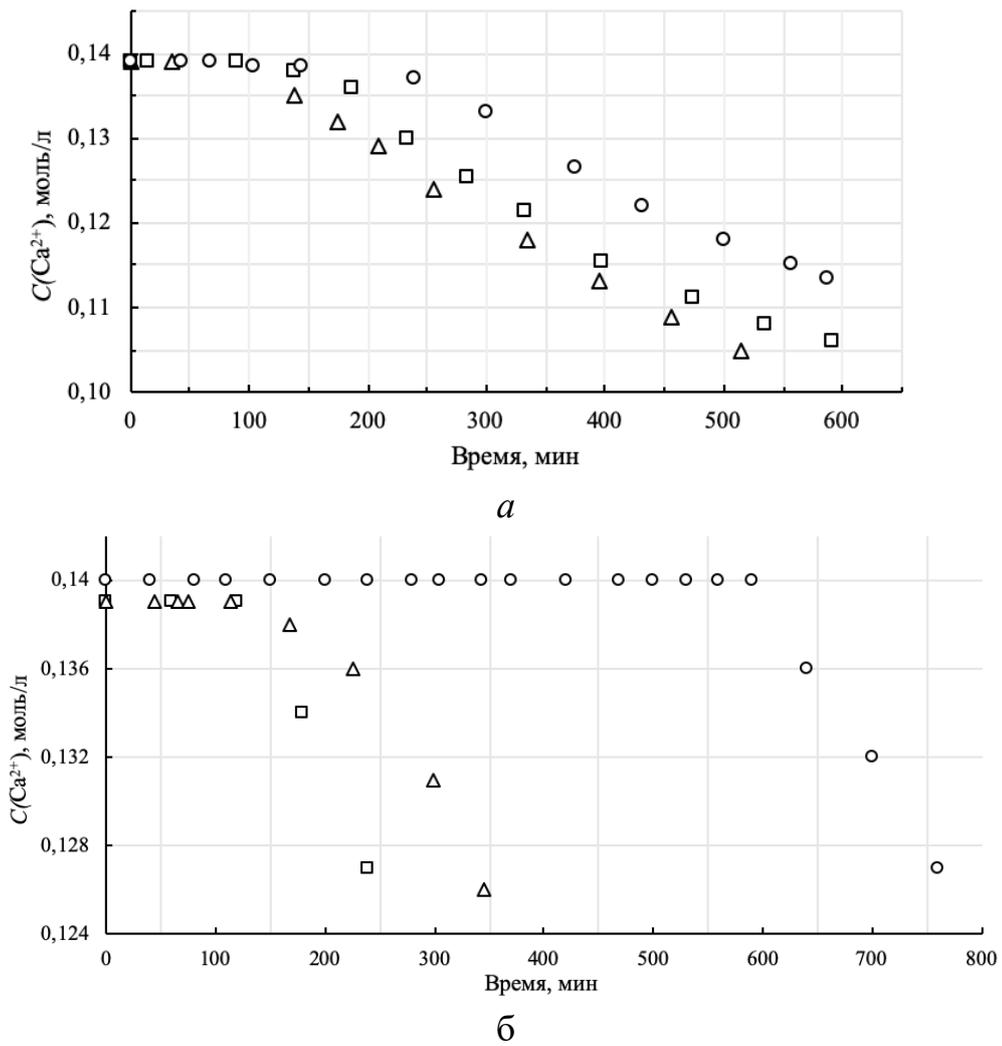


Рисунок 4.16 – Спонтанная кристаллизация CaSO_4 при концентрации раствора 0,5 г/л (а) и 1,0 г/л (б): (○) КМЦ-1000, (□) КМЦ-800, (△) КМЦ-600

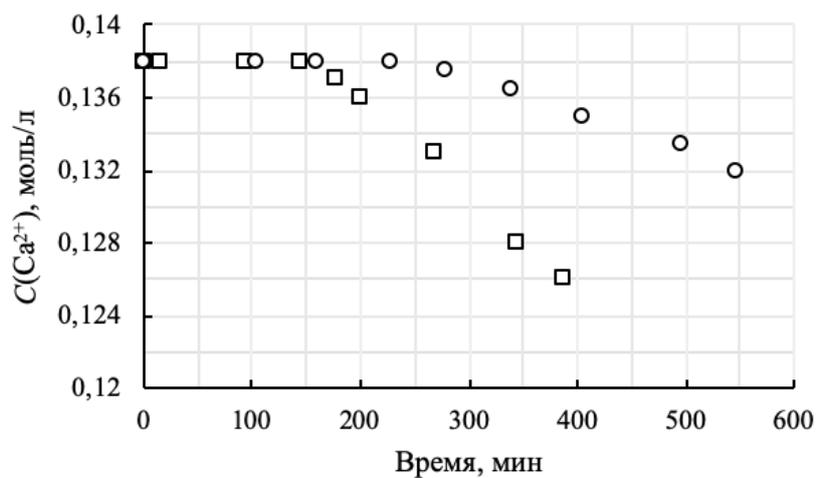


Рисунок 4.17 – Спонтанная кристаллизация CaSO_4 в присутствии ПАА: (○) 1,0 г/л, (□) 0,5 г/л

Таблица 4.7 – Влияние КМЦ и ПАА на устойчивость пересыщенных растворов CaSO_4 *

КМЦ-600	Концентрация (г/л)	0,5	1,0
	Индукционный период (мин)	80	120
КМЦ-800	Концентрация (г/л)	0,5	1,0
	Индукционный период (мин)	115	140
КМЦ-1000	Концентрация (г/л)	0,5	1,0
	Индукционный период (мин)	200	600
ПАА ($M_r = 14 \cdot 10^6$)	Концентрация (г/л)	0,5	1,0
	Индукционный период (мин)	163	245

*Содержание CaSO_4 в пересыщенном растворе 0,14 моль/л.

Рентгенофазовым анализом установлено, что в осадке присутствуют гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (93,0 мас. %) и бассанит $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (2,0 мас. %), кристаллизующиеся в моноклинной сингонии, а также орторомбический ангидрит CaSO_4 (5,0 мас. %).

Более высокую эффективность КМЦ-1000 в сравнении с КМЦ-600 и КМЦ-800 можно объяснить присутствием в полимерной цепи большего числа карбоксильных групп, способных создавать многомерные каркасы на поверхности зародышей кристаллов, блокирующих их рост. Значительное увеличение молекулярной массы полимера, в случае с ПАА, при тех же концентрациях не приводит к существенному росту эффективности ингибирования. Увеличение длины молекулы полимера, вероятно, благоприятствует возникновению петель и цепочек на поверхности зародыша кристалла в процессе адсорбции, что приводит к появлению большего количества разблокированных центров кристаллизации.

Установлено, что присутствие хлорида натрия в растворах усиливает ингибирующее действие неорганических и органических добавок. Хлорид натрия увеличивает до некоторого предельного значения растворимость сульфата кальция за счет снижения активности ионов кальция и сульфат-ионов в растворе [63, 64].

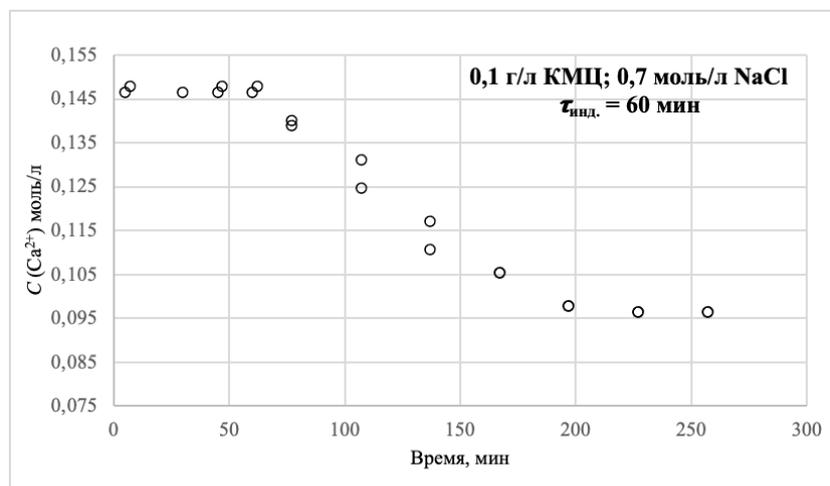
Подробно исследовано влияние хлорида натрия на ингибирование процесса кристаллизации сульфата кальция КМЦ-1000 из 0,15 М растворов. При концентрации КМЦ-1000 0,5 г/л введение хлорида натрия приводит к увеличению индукционного периода кристаллизации гипса со 100 до 630 минут (таблица 4.8). При концентрации хлорида натрия 1,5 моль/л время удерживания ионов кальция превышает 12 ч. При концентрации КМЦ-1000 0,1 г/л зависимость ин-

дукционного периода кристаллизации от содержания хлорида натрия выражена слабо.

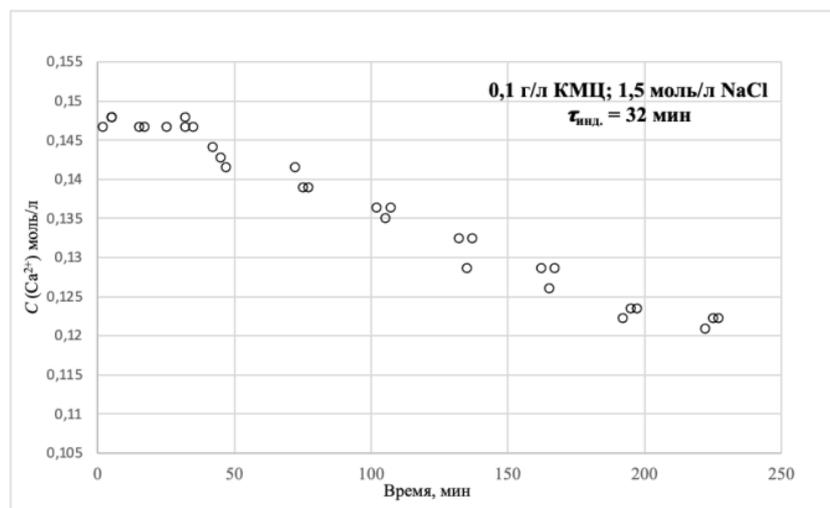
Таблица 4.8 – Влияние NaCl и КМЦ-1000 на индукционный период кристаллизации $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

КМЦ-1000, г/л	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5
NaCl, моль/л	–	0,7	1,5	–	0,7	1,5
$\tau_{\text{инд.}}$, МИН	<15	60	32	100	630	>720

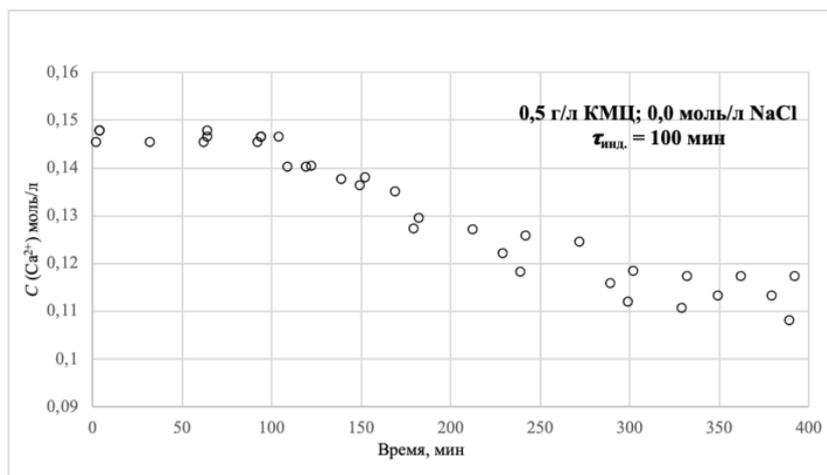
На рисунке 4.18 представлены кривые спонтанной кристаллизации гипса из пересыщенных растворов, содержащих 20,4 г/л сульфата кальция. Как видно из графиков, КМЦ-1000 замедляет не только скорость зародышеобразования (горизонтальный участок), но и скорость роста кристаллов.



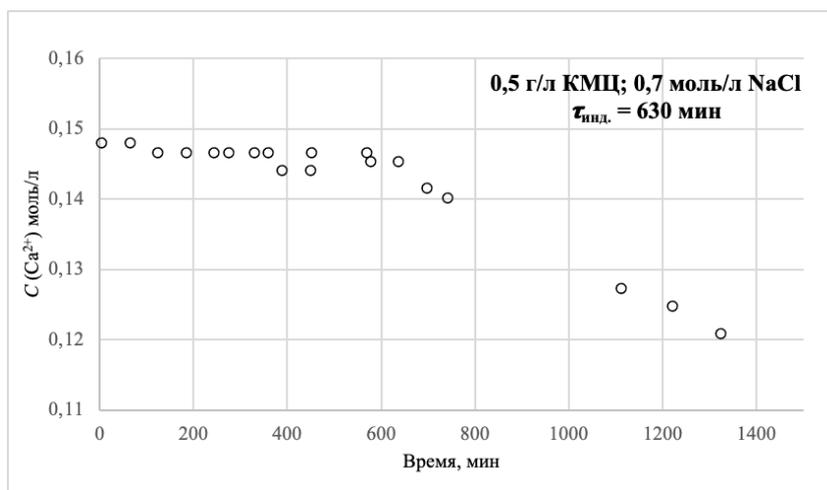
а



б



6



2

Рисунок 4.18 – Спонтанная кристаллизация дигидрата сульфата кальция в присутствии ингибитора кристаллизации КМЦ-1000 и хлорида натрия

С увеличением концентрации ингибитора в 5 раз угол наклона прямолинейного участка кривой роста кристаллов уменьшается. Обнаружен синергетический эффект, который наблюдается в растворах сульфата кальция при совместном присутствии КМЦ и хлорида натрия.

Установлено, что необходимое время удерживания CaSO_4 в растворе можно достичь, варьируя не только концентрацию добавок, но и соотношение $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$ (таблица 4.9). Из рисунка 4.19 видно, что при содержании Ca^{2+} 0,26 моль/л повышение концентрации КМЦ-1000 в два раза замедляет скорость зародышеобразования и роста кристаллов. В растворах с соотношением $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 0,26:0,15 при концентрации КМЦ-1000 1,0 г/л увеличение содержания NaCl в два раза не приводит к изменению времени удерживания CaSO_4 в растворе.

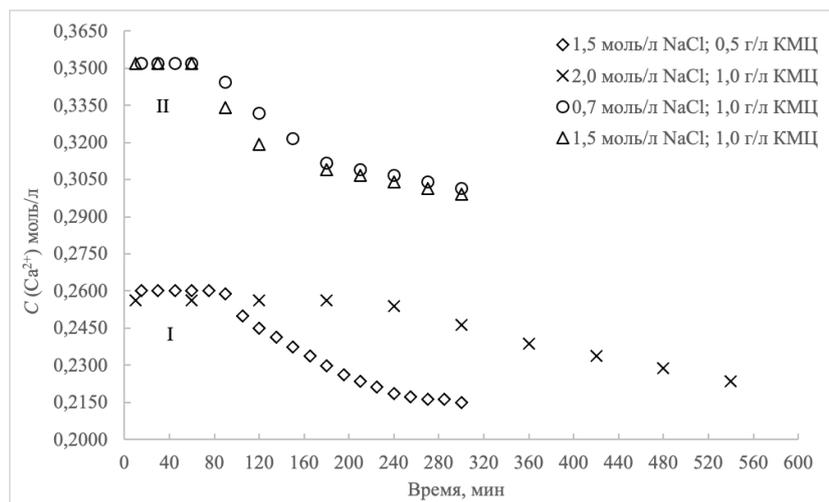


Рисунок 4.19 – Спонтанная кристаллизация $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ из пересыщенных растворов. Соотношение $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$: 0,26:0,15(I) и 0,35:0,15(II)

Таким образом, увеличение отношения $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$ нивелирует влияние NaCl на ингибирующую способность КМЦ-1000, значительный ингибирующий эффект проявляется при концентрациях КМЦ-1000 выше 0,5 г/л (см. таблицу 4.9).

Осадок, образующийся в процессе спонтанной кристаллизации, содержит $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (гипс) с примесью хлорида натрия. На рисунке 4.20 приведена дифрактограмма образца соли, осажденной при 25 °С из 0,15 М раствора CaSO_4 . Выполненные исследования показали, что КМЦ-1000 является достаточно хорошим ингибитором кристаллизации сульфата кальция. Несомненным преимуществом является то, что эффективность процесса ингибирования возрастает в растворах, содержащих хлорид натрия. Это позволяет использовать пересыщенные растворы сульфата кальция при тампонировании пород в районах калийных рудников.

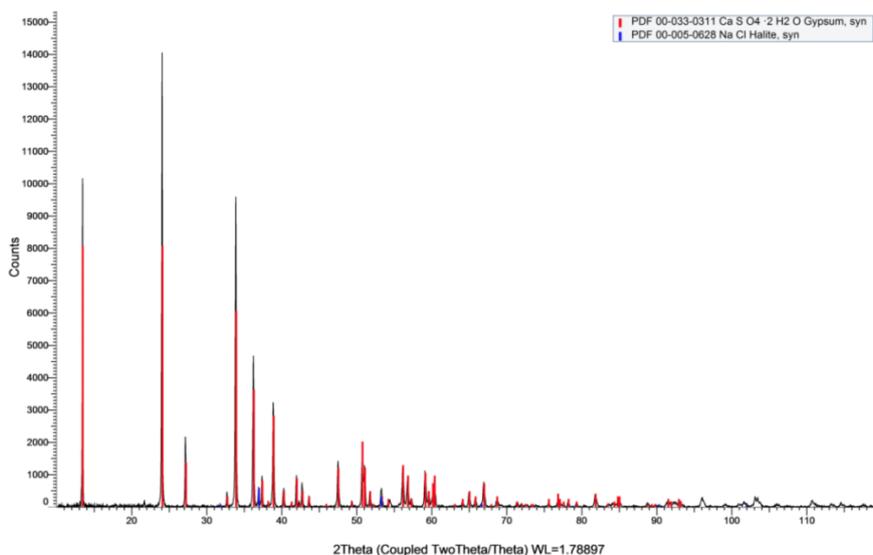


Рисунок 4.20 Дифрактограмма осадка из пересыщенного раствора CaSO_4 в присутствии 0,1 г/л КМЦ-1000 и 1,5 моль/л NaCl

Таблица 4.9 – Влияние КМЦ-1000 и NaCl на величину индукционного периода кристаллизации $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ из пересыщенных растворов

$C_{\text{Ca}^{2+}}$, моль/л	$C_{\text{КМЦ}}$, г/л	$\tau_{\text{инд.}}$, мин	$C_{\text{Ca}^{2+}}$, моль/л	$C_{\text{КМЦ}}$, г/л	$\tau_{\text{инд.}}$, мин	$C_{\text{Ca}^{2+}}$, моль/л	$C_{\text{КМЦ}}$, г/л	$\tau_{\text{инд.}}$, мин
0,0 моль/л NaCl								
0,15	0,1	<15	0,26	0,1	–	0,35	0,1	<10*
	0,5	100		0,5	–		0,5	<10*
	1,0	210		1,0	–		1,0	<10*
0,7 моль/л NaCl								
0,15	0,1	60	0,26	0,1	<10*	0,35	0,1	<10*
	0,5	630		0,5	<10*		0,5	<10*
	1,0	–		1,0	<210*		1,0	63**
1,5 моль/л NaCl								
0,15	0,1	32	0,26	0,1	<10	0,35	0,1	<10*
	0,5	>720		0,5	80**		0,5	<10*
	1,0	–		1,0	<210*		1,0	55**
2,0 моль/л NaCl								
0,15	0,1	–	0,26	0,1	<10*	0,35	0,1	<10*
	0,5	–		0,5	<18*		0,5	<10*
	1,0	–		1,0	208**		1,0	<40*

*Индукционный период кристаллизации фиксировали с момента приготовления пересыщенного раствора до появления первых кристаллов соли.

**Время начала кристаллизации устанавливали по изменению концентрации ионов кальция в растворе.

4.3. Результаты полевых испытаний и корректировка параметров процесса создания искусственного геохимического барьера

С целью подтверждения возможности снижения фильтрационных характеристик пород путем осаждения солей кальция в реальных условиях в 2019 г. совместно с лабораторией геологии техногенных процессов Естественнонаучного института проведены полевые испытания. Полигон для проведения испытаний расположен в г. Перми (в районе Верхней Курьи), на правом берегу реки Камы. Климат территории исследований – умеренно-континентальный. Наличие Камского водохранилища вызывает повышенную влажность. Среднемесячная влажность воздуха колеблется от 60 % в мае до 84 % в ноябре, среднегодо-

вая – 75 %. Годовая норма осадков составляет 639 мм, большая часть из них выпадает в виде дождя. Зимой высота снежного покрова может достигать 111 см.

Геологическое строение в районе г. Перми определяется развитием пород четвертичного и пермского возрастов (шешминский- $P1_{ss}$, соликамский- $P1_{sl}$ горизонты уфимского яруса; иренский горизонт кунгурского яруса- $P1_{ir}$). Полевые испытания проведены непосредственно на поверхности четвертичных отложений, представленных аллювиальными песками средней крупности. В районе г. Перми выделяются водоносные горизонты, приуроченные к четвертичным, шешминским, верхнесоликамским и нижнесоликамским отложениям. В рамках настоящего исследования подземные воды территории вскрыты не были.

Этапы полевых испытаний

1. Разбивка полигона на опытные и контрольные секции, определение первоначальных фильтрационных характеристик пород.

2. Обработка подготовленных секций растворами для снижения фильтрационных характеристик пород.

3. Исследование фильтрационных характеристик пород после их обработки, отбор образцов для последующего анализа.

4. Проведение минералогических исследований и определение физических параметров образцов пород.

Для проведения опытных полевых испытаний на полигоне подготовлены 4 секции площадью 1 м² каждая (рисунок 4.21). Выбранный размер секций обусловлен необходимостью исследования фильтрационных характеристик пород, а также отбором образцов для анализа. Перед внесением растворов с поверхности каждой секции снимался почвенно-растительный слой и верхний слой четвертичных отложений с целью получения ровной площадки, общая мощность снимаемых отложений составила 0,15–0,2 м. Секции, расположенные в непосредственной близости друг от друга, использованы как опытные (Б-1 и Б-2) и контрольные (М-1 и М-2) (см. рисунок 4.21).

Состав растворов для осаждения соли и схема обработки опытных секций приведены в таблице 4.10. Раствор для обработки секции Б-2 готовился непосредственно перед применением путем смешения растворов 1 и 2. После внесения растворов все секции накрывались полиэтиленовой пленкой для минимизации взаимодействия обработанных пород с атмосферными осадками.

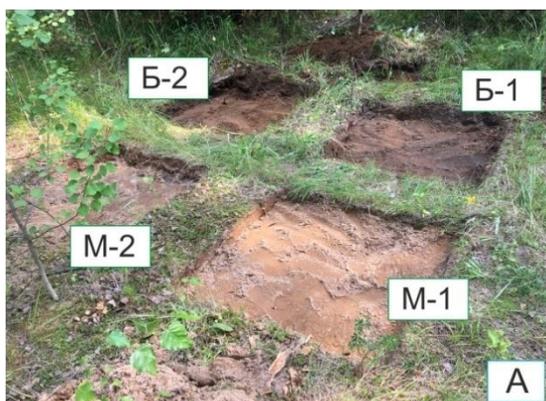


Рисунок 4.21 – Подготовленные секции для проведения полевых испытаний

Таблица 4.10 – Состав растворов для осаждения сульфата кальция

Компонент	Концентрация, мас. %	Примечание	
	Секция Б-1		
	Эвтонический раствор		
Хлорид кальция	44,0	Однократная обработка раствором сульфата натрия и эвтоническим раствором с интервалом 15 мин	
Хлорид калия	3,0		
Хлорид натрия	0,6		
Вода	52,4		
	Раствор осадителя		
Сульфат натрия	21,9	Двукратная обработка пересыщенным раствором сульфата кальция с ингибитором кристаллизации с интервалом в 2 недели	
Вода	78,1		
	Секция Б-2		
	Раствор 1		
Хлорид кальция	20,0		Двукратная обработка пересыщенным раствором сульфата кальция с ингибитором кристаллизации с интервалом в 2 недели
Вода	80,0		
	Раствор 2		
Сульфат натрия	20,0		
Вода	80,0		
КМЦ	0,5 г/л		

Для проверки эффективности способа по снижению фильтрационных характеристик грунтов путем осаждения солей кальция замерялась скорость фильтрации воды до и после обработки растворами экспериментальных площадок с помощью инфильтрометра фирмы Eijkelkamp Soil & Water (рисунок 4.22), затем рассчитывался коэффициент фильтрации грунтов.



Рисунок 4.22 – Определение фильтрационных характеристик грунтов на полигоне

Исследование фильтрационных характеристик грунтов проводилось в соответствии с рекомендациями [65] следующим образом.

✓ Фиксировался начальный уровень воды на поплавке, затем через равные интервалы времени отмечалось снижение уровня. В начале исследования измерение уровня воды производилось через небольшие интервалы времени, которые увеличивались по мере стабилизации скорости инфильтрации.

✓ При добавлении воды заново отмечался начальный уровень, измерения при этом продолжались.

✓ Уровень воды во внутреннем и наружном кольцах поддерживался на одной высоте для снижения погрешности измерений.

✓ Измерения прекращались при достижении постоянного значения скорости инфильтрации.

Расчет коэффициента фильтрации с учетом размеров внутреннего кольца проведен по формулам:

$$Q = \frac{S \cdot (h_n - h_{n-1})}{t_n - t_{n-1}}, \quad K_{\Phi} = \frac{Q}{I \cdot S},$$

где K_{Φ} – коэффициент фильтрации, см/с; Q – дебит, см³/с; I – напорный градиент (в условиях вертикальной фильтрации принятый за 1); S – площадь кольца, см²; h_n , h_{n-1} – высота уровня воды в кольце, см; t_n , t_{n-1} – время от начала замера, с. Значение коэффициента фильтрации остающееся неизменным в течение последних 8–10 замеров, считалось окончательным.

Для изучения физических характеристик грунтов отобраны образцы грунтов до и после обработки растворами. В лабораторных условиях определены следующие параметры: естественная влажность, коэффициент водонасыщения, природная плотность грунта, плотность частиц грунта, плотность сухого грунта, коэффициент пористости, гранулометрический состав. Исследования прово-

дились по общепринятым методикам в соответствии с ГОСТ 5180–2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик» [66] и ГОСТ 12536–2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического микроагрегатного состава» [67].

В соответствии с классификацией по ГОСТ 25100–2011 [68] грунты на экспериментальных площадках в основном представляют собой пески средней крупности, однородного гранулометрического состава с преобладанием частиц размером 0,5–0,25 мм и малой степенью водонасыщения. Коэффициент фильтрации (K_f) песков средней крупности обычно изменяется в пределах от 5 до 20 м/сут [69], что соответствует данным полевых замеров фильтрационных характеристик грунтов на контрольных необработанных площадках, где K_f изменялся в пределах от 5,76 до 10,45 м/сут. Подробная информация о физических свойствах исследуемых грунтов представлена в таблице 4.11.

Результаты замеров K_f на опытных и контрольных площадках представлены на рисунке 4.23. Коэффициент фильтрации грунтов опытных секций снизился по сравнению с контрольными участками. Максимальное снижение K_f отмечено для секции Б-1, где осаждение сульфата кальция осуществлялось из эвтонического раствора при взаимодействии с насыщенным раствором сульфата натрия. Полученный $K_f = 2,11$ м/сут характерен для песков мелких с содержанием частиц размером 0,10–0,25 мм более 75% от общей массы. Полевые исследования подтвердили данные лабораторных экспериментов.

Как видно из рисунка 4.23, на поверхности грунта в секции Б-2, обработанной пересыщенным раствором сульфата кальция, сформировались трещины, что, вероятно, повлияло на скорость фильтрации воды при контрольном замере. Полученное значение коэффициента фильтрации (7,20 м/сут) выше, чем в секции Б-1, но ниже, чем в контрольных секциях М-1 и М-2, где коэффициенты фильтрации равны 8,89 м/сут и 10,45 м/сут соответственно.

Стоит отметить, что проведенные полевые испытания носят скорее оценочный характер и подтверждают потенциальную эффективность предлагаемого способа. Для более детального изучения и совершенствования способа необходимы дальнейшие исследования с большим количеством опытных и контрольных секций, а также изучение возможности сохранения свойств образовавшихся солей во времени под влиянием окружающей среды. Необходимо провести полевые эксперименты по тампонированию водопроницаемых участков горных пород, расположенных на глубине.

Таблица 4.11 – Сводная таблица физических свойств исследуемых грунтов

Номер пробы	Влажность естественная, д.е. W	Коэффициент водонасыщения, д.е. S _w	Плотность, г/см ³			Коэффициент пористости, e	Гранулометрический состав мас. % частиц размером, мм				Классификация по ГОСТ 25100–2011
			частиц грунта, ρ _s	грунта природная, ρ	грунта сухого, ρ _d		1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	
Б-1	0,129	0,420	2,64	1,65	1,46	0,808	2,08	59,94	29,10	8,88	Песок средней крупности малой степени водонасыщения рыхлый однородный
	0,122	–	–	–	–	–	1,98	57,24	27,79	12,98	Песок средней крупности однородный
Б-2	0,108	0,320	2,64	1,55	1,40	0,886	2,33	59,18	28,44	10,05	Песок средней крупности малой степени водонасыщения рыхлый неоднородный
	0,103	0,340	2,64	1,62	1,47	0,796	2,21	56,12	26,97	14,71	Песок средней крупности малой степени водонасыщения рыхлый неоднородный
М-1	0,069	0,250	2,64	1,63	1,52	0,737	2,38	62,38	32,48	2,76	Песок средней крупности малой степени водонасыщения рыхлый однородный
М-2	0,079	0,300	2,64	1,68	1,56	0,692	2,82	49,23	38,03	9,92	Песок средней крупности малой степени водонасыщения средней плотности однородный



Рисунок 4.23 – Вид поверхности обработанных секций и результаты замеров K_f

Детальные минералогические исследования образцов обработанных грунтов выполнены сектором наноминералогии ПГНИУ. Определение минерального состава грунта и новообразованных минералов, сформировавшихся при обработке растворами, проведено рентгеноструктурным анализом. С помощью сканирующего электронного микроскопа получены фотографии образовавшихся между частицами песка кристаллических осадков солей. В образце Б-1 присутствуют агрегаты, сростки и другие формы новообразованного гипса. В составе этих агрегатов в небольшом количестве (менее 10 %) находится и глинистое вещество (индикаторы кремний и алюминий). Характерно также присутствие меди и цинка (таблица 4.12). В образце Б-2 присутствуют такие же агрегаты гипса (анализы 2 и 3). Кроме того, в анализе 1 отмечается присутствие налетов гипса на зерне полевого шпата. В составе такого налета находится соль (галит), железистое и глинистое вещества. Обращает на себя внимание повышенное содержание меди и цинка.

Возможности сканирующей электронной микроскопии позволяют наглядно увидеть характерные формы новообразованного вещества (рисунки 4.24–4.32), особенно гипса. Так, в образце Б-1 часто встречаются «гипсовые розы» (агрегаты игольчатых кристаллов), звездчатые выделения, мелкозернистые плотные агрегаты.

По данным рентгеноструктурного анализа порошковой рентгенометрии, в образцах исходных песков (до обработки) присутствуют зерна кварца (84,2 %), полевых шпатов (12,3 %) и глинистого вещества, представленного гидрослюдами (3,5 %). Судя по приведенным выше данным микронзондового анализа, полевые шпаты включают калишпаты и плагиоклазы (таблица 4.13, рисунки 4.33, 4.34). Содержание гипса в образцах Б-1 и Б-2 составляет 2,6–3,7 %.

Выполненные минералогические исследования подтвердили образование сульфата кальция в обработанных породах, формирование которых приводит к снижению фильтрационных характеристик пород на экспериментальной площадке [70].

Таблица 4.12 – Химический состав образцов с присутствием сульфатных новообразований, мас. %

Оксид	Образец Б-1		Образец Б-2		
	1	2	1	2	3
SO ₃	42,93	42,98	1,98	43,73	38,03
SiO ₂	4,74	3,92	56,45	1,88	1,92
TiO ₂	–	–	0,60	–	–
Al ₂ O ₃	2,28	1,67	19,13	0,58	0,54
FeO*	0,77	0,35	5,19	0,28	0,22
CaO	26,61	28,41	1,03	30,68	25,13
MgO	0,29	0,35	1,02	0,08	–
K ₂ O	0,21	0,29	1,94	–	–
Na ₂ O	–	–	2,77	0,19	–
Cl	–	–	0,55	–	–
Cu	0,33	0,32	0,53	0,59	0,51
Zn	0,26	0,29	0,47	0,52	0,45
Сумма	78,42	78,58	91,90	78,53	77,80

Таблица 4.13 – Минеральный состав образцов, мас. %

Образец	Кварц	Полевые шпаты	Гидро-слуды	Кальцит	Гипс	Сумма
Б-1	75,7	12,0	8,6	–	3,7	100
Б-2	76,3	12,7	8,4	–	2,6	100

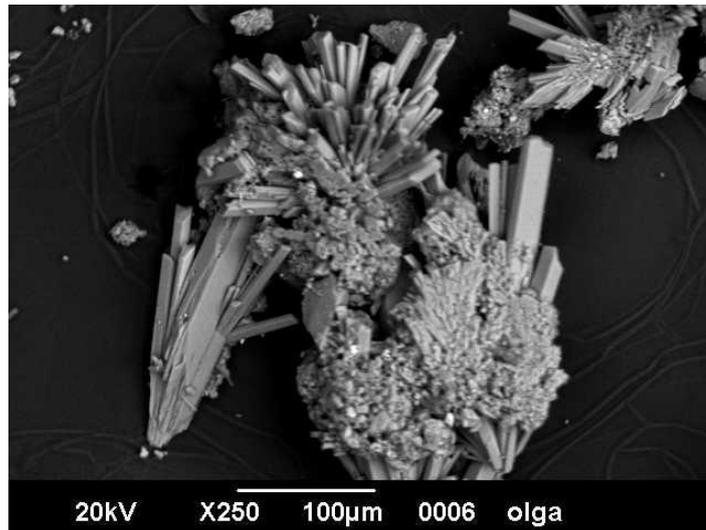


Рисунок 4.24 – Агрегаты типа «гипсовые розы» (образец Б-1)

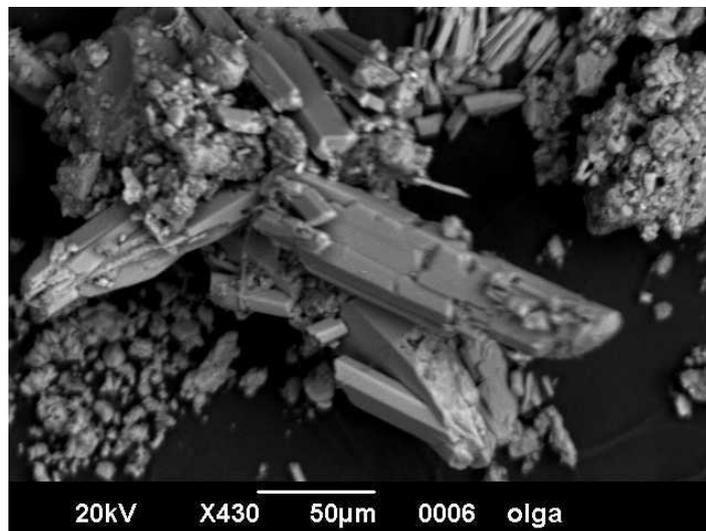


Рисунок 4.25 – Хорошо образованные кристаллы гипса дощатого облика (образец Б-1)

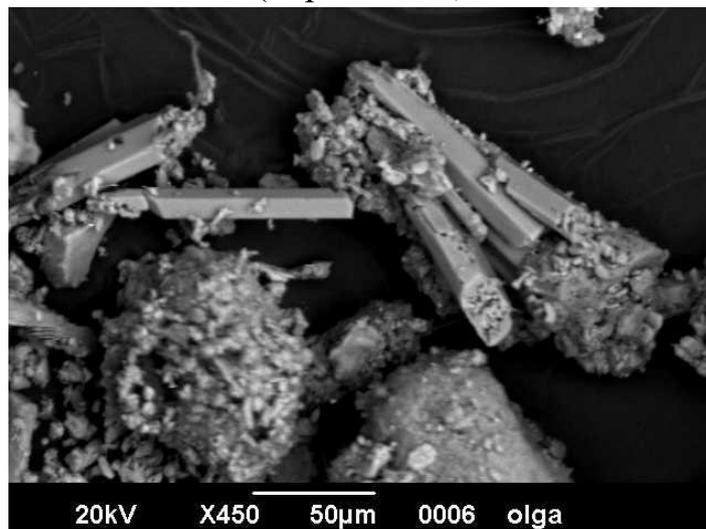


Рисунок 4.26 – Скопления кристаллов и тонкозернистых агрегатов гипса (образец Б-1)

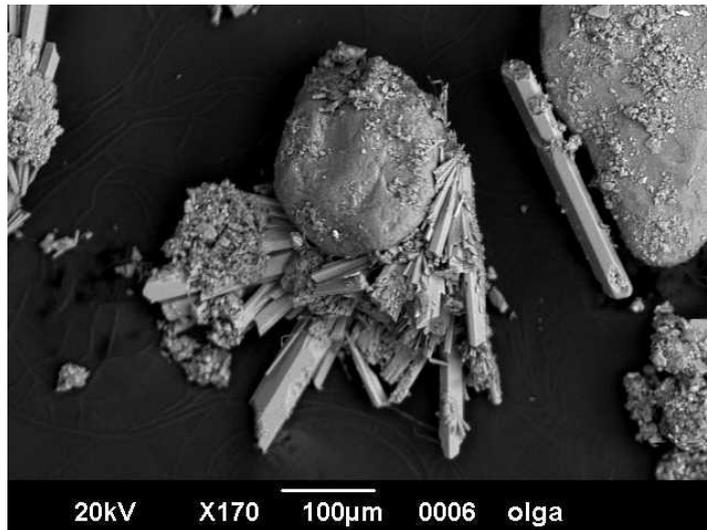


Рисунок 4.27 – Новообразованный гипс на зерне кварца (образец Б-1)

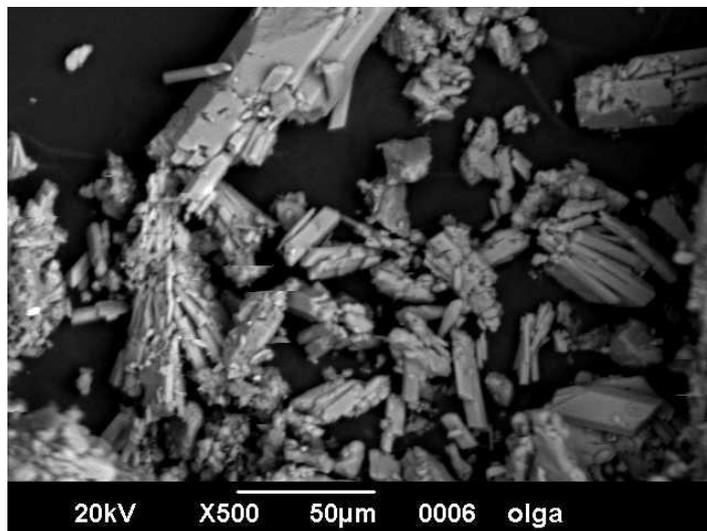


Рисунок 4.28 – Разнообразные формы новообразований гипса (образец Б-1)

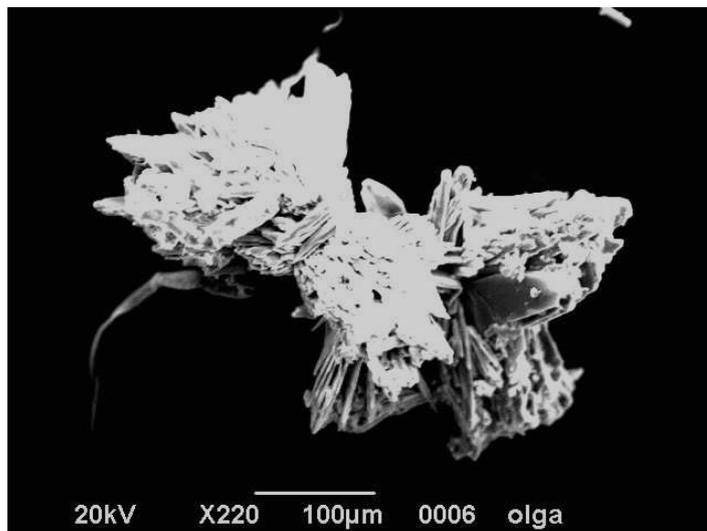


Рисунок 4.29 – Агрегат гипса сложной формы (образец Б-2)

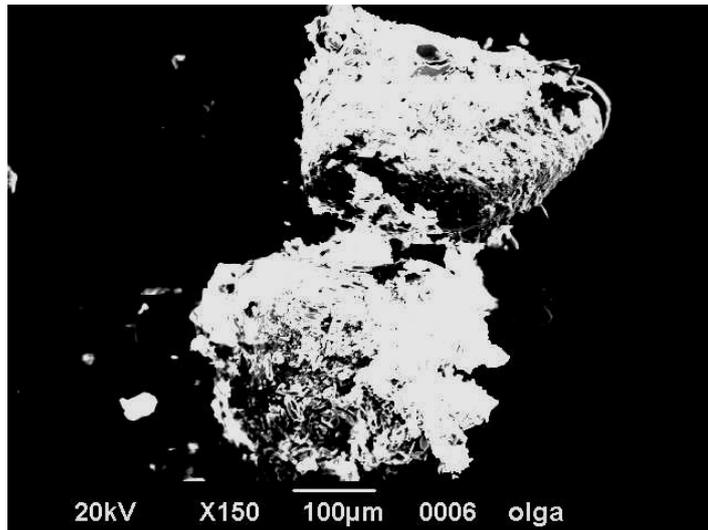


Рисунок 4.30 – Налеты гипса на поверхности зерен кварца (образец Б-2)

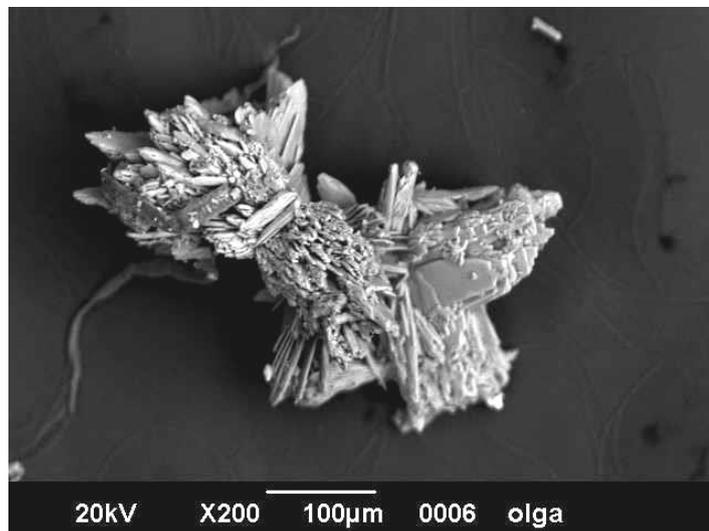


Рисунок 4.31 – Агрегат гипса сложного строения (образец Б-2)

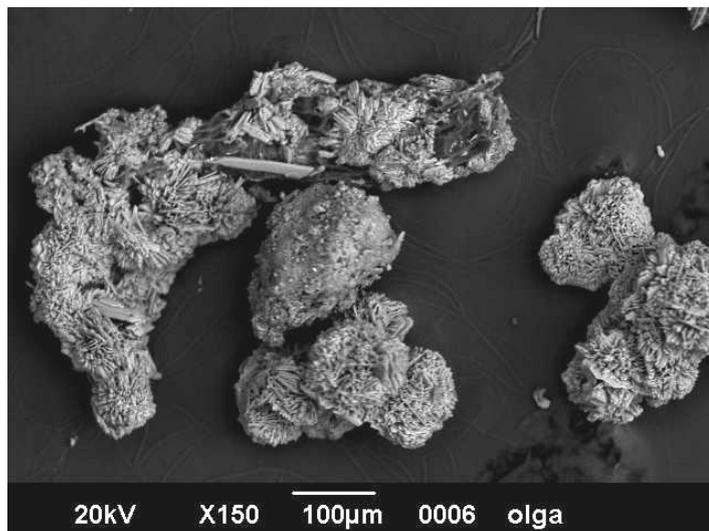


Рисунок 4.32 – Тонкозернистые гипсовые агрегаты с включениями кристаллов (образец Б-2)

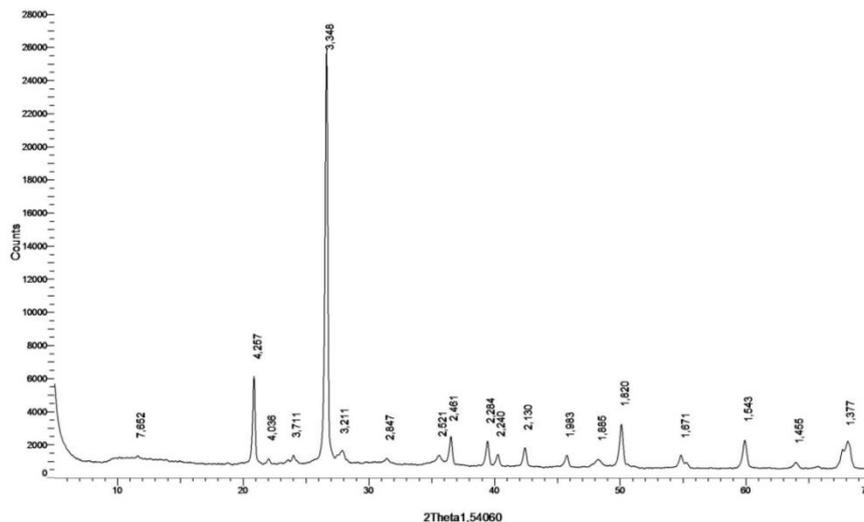


Рисунок 4.33 – Дифрактограмма образца Б-1

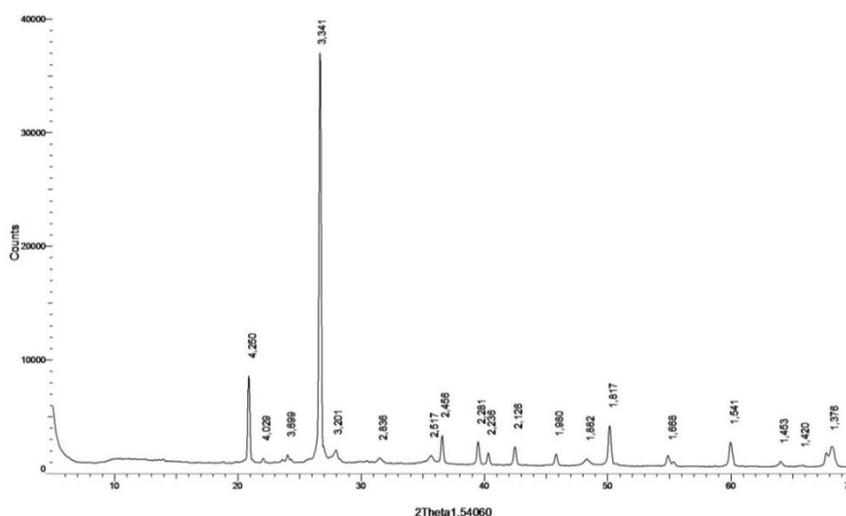


Рисунок 4.34 – Дифрактограмма образца Б-2

Рекомендации по использованию способа снижения водопроницаемости участков или зон в соляных горных породах

На основании полученных данных при проведении лабораторных экспериментов и полевых испытаний можно сформулировать следующие рекомендации:

- ✓ осаждение сульфата в толще грунтов может рассматриваться как превентивная мера для дополнительной гидроизоляции пород;
- ✓ целесообразность использования эвтонического раствора (насыщенный относительно хлоридов калия, натрия и кальция) в соляных горных породах обусловлена тем, что в нем не происходит растворение сильвинита и галита; из-за большой разницы в плотности он образует расслаивающуюся систему с раствором хлорида натрия и препятствует взаимодействию этого раствора с соля-

ной породой, а при смешении этих двух растворов происходит кристаллизация хлорида натрия;

✓ изменение фильтрационных характеристик пород характеризует эффективность снижения их водопроницаемости до и после осаждения солей кальция; в отдельных случаях достигнуто снижение скорости фильтрации более чем на 80 %;

✓ использование достаточно концентрированных растворов серной кислоты для осаждения сульфата кальция позволит минимизировать количество воды, вносимое в участки вблизи соляных пород;

✓ осаждение солей кальция рекомендуется в грунтах вблизи соляных пород, что позволит снизить их водопроницаемость и минимизировать контакт соляных пород с растворами хлорида натрия и водой;

✓ участки грунтов, наиболее подходящие для засоления, выбираются на основании геологических данных. Основные показатели грунтов – их местоположение, обводненность, коэффициент фильтрации и т.д.

Список литературы к главе 4

1. Баюрова Ю.Л., Нестеров Д.П., Корнева Е.А. и др. Искусственные геохимические барьеры для решения экологических и технологических задач // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 536–541.
2. Перельман А.И. Геохимия. М. – Высшая школа, 1989. 582 с.
3. Перельман А.И., Воробьев А.Е. Ландшафтно-геохимические условия размещения предприятий горной промышленности // Известия РАН. Серия Географическая. 1994. № 2. С. 50–61.
4. Chanturiya V., Masloboev V., Makarov D. et al. Artificial geochemical barriers for additional recovery of non-ferrous metals and reduction of ecological hazard from the mining industry waste // Journal of Environmental Science and Health. Part A. 2011. Vol. 46, № 13. P. 1579–1587.
5. Бочкарев Г.Р., Пушкарева Г.И., Ростовцев В.И. Интенсификация процессов рудоподготовки и сорбционного извлечения металлов из техногенного сырья // ФТПРПИ. 2007. № 3. С. 129–139.
6. Изотов А.А., Ковердяев О.Н., Вершинина О.О. Способы снижения воздействия дренажных вод на окружающую среду в горнодобывающих районах // Горный журнал. 2006. № 10. С. 103–106.
7. Максимович Н.Г. Очистка сточных вод россыпных месторождений с помощью механических геохимических барьеров // Горный журнал. 2007. № 4. С. 77–78.

8. IV Meeting Crystallisation Technologies for Prevention of Salt Water Intrusion (26-29 September 2002) // ScanzanoJonico, Italia, 2002. 75 p.
9. Каймин Е.П., Захарова Е.В., Константинова Л.И. Использование кремневой кислоты для создания противотрационной завесы в песчаном горизонте // Геоэкология. 2007. № 2. С. 137–142.
10. Лыгач В.Н., Семенов Ю.В., Ноздря В.И. и др. Закономерности процесса отверждения кислых стоков нефелиновыми шламами // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. 2003. № 1. С. 206–209.
11. Лыгач В.Н., Семенов Ю.В., Ноздря В.И. и др. Исследование и выявление оптимальных параметров разложения нефелинсодержащего сырья с целью получения гидрогелевых составов для гидроизоляции буровых скважин и обезвреживания жидких отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. 2004. № 3. С. 337–340.
12. Семенов Ю.В., Ноздря В.И., Коснов В.К. Кинетические закономерности процесса гелеобразования в системе нефелин – серная кислота // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. 2003. № 7. С. 228–230.
13. Жижаяев А.М., Брагин В.И., Михайлов А.Г. Осаждение меди с использованием природных карбонатов кальция // Обогащение руд. 2001. № 5. С. 13–17.
14. Орехова Н.Н. Концептуальные и технологические подходы к ресурсо-воспроизводящей переработке гидроминерального техногенного сырья // Научные основы и современные процессы комплексной переработки труднообогатимого минерального сырья: материалы междунар. совещ. (Плаксинские чтения – 2010). Казань, 2010. С. 431–433.
15. Мильвит Н.В., Шашкова И.Л., Ратько А.И. и др. Сорбционные свойства карбонатсодержащих трепелов // ЖПХ. 2007. Т. 80, № 11. С. 1819–1825.
16. Пат. 2259956 Российская Федерация. Способ очистки воды от ионов тяжелых металлов. / Макаров В.Н., Макаров Д.В., Луговская А.С., Калинин В.Т. – № 2004119116/15; заявл. 23.06.2004; опубл. 10.09.2005, Б.И. № 25.
17. Макаров Д.В., Мазухина С.И., Нестерова А.А. и др. Взаимодействие минералов искусственных геохимических барьеров с сульфатными растворами тяжелых металлов // Минералогия техногенеза-2009. ИМинУрО РАН, 2009. С. 96–103.
18. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Использование геохимических барьеров для защиты подземных и поверхностных вод от загрязнения // Сергеевские чтения: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: ГЕОС, 2000. Вып. 2. С. 224–231.

19. Кузьмин Е.В., Хайрутдинов М.М., Зенько Д. К. Основы горного дела: учебник для вузов. М.: ООО «АртПРИНТ+», 2007. 472 с.
20. Трупак Н.Г. Способы борьбы с водой на калийных и соляных рудниках. М.: Госгортехиздат, 1961. 285 с.
21. Шиман М. И. Предотвращение затопления калийных рудников. М.: Недра, 1992. 160 с.
22. Трупак Н. Г. Цементация трещиноватых пород в горном деле. М.: Металлургиздат, 1956. 144 с.
23. Ржаницын Б.А. Некоторые итоги работ в области химического закрепления грунтов: материалы VIII Всесоюз. совещ. Киев: Буддвельник, 1971.
24. Старцев Ю.Г. Гидроизоляция горных выработок калийных и соляных рудников синтетическими смолами // Технология подземных разработок калийных месторождений. Пермь, 1988.
25. Пат. 252029 ГДР. Инъекционный способ тампонирования трещиноватой и пористой соленосной породы. 1987.
26. Попов А.В. Разработка тампонажных растворов для водоизоляции капитальных горных выработок в сложных горно-геологических условиях: дис. ... канд. техн. наук. Шахты, 1984. 292 с.
27. Пат. 2133342 Российская Федерация. Способ предотвращения затопления калийных рудников / Папулов Л. М., Николаев А. С., Белкин В. В. № 97113888/03; заявл. 13.08.1997; опубл. 20.07.1999.
28. Пат. 2363848 Российская Федерация. Способ техногенного эпигенеза тампонирования водопроницаемых участков или зон в соляных горных породах /Клименко Н.А., Пономаренко Ю.В., Изотов А.А., Кузькин В.С. – 2007140286/03; заявл. 30.10.2007; опубл. 10.08.2009.
29. Коган В.Б., Огородников С.К., Кафаров В.В. Справочник по растворимости. – Т. II, кн. 1, 2. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 2067 с. Т. III, кн. 2. Л.: Наука, 1969. 1170 с.
30. Amjad Z., Demadis K.D. Mineral scales and deposits. Berkeley: Elsevier, 2015. 758 p.
31. Tsang C., Apps A. Underground injection science and technology. Berkeley: Elsevier, 2005. 703 p.
32. Freyer D., Voigt, W. Crystallization and phase stability of CaSO₄ and CaSO₄ – based salts // Monatshefte für Chemie. 2003. Vol. 134. P. 693–719.
33. Malai K., Shojaei, O., Iranpour, S., Taherkhani, Z. Crystal growth inhibition of gypsum under normal conditions and high supersaturations by a copolymer of phosphino-polycarboxylic acid // Heliyon. 2021. № 7. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06064>

34. Ziegenheim Sz., Peintler G., Palinko I., Sipos P. The kinetics of the precipitation of gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, over a wide range of reactant concentration // Reaction kinetics, mechanisms and catalysis. 2020. Vol. 131. P. 75–88.
35. Lancia A., Musmarra D., Prisciandaro M. Measuring induction period for calcium sulfate dihydrate precipitation // AIChE Journal. 1999. Vol. 45. P. 390–397.
36. Klepetsanis P.G., Dalas E., Koutsoukos G. Role of temperature in the spontaneous precipitation of calcium sulfate dehydrate // Langmuir. 1999. Vol. 15. P. 1534–1540.
37. Bock E. On the solubility of anhydrous calcium sulphate and of gypsum in concentrated solutions of sodium chloride at 25°C, 30°C, 40°C, and 50°C // Canadian Journal of Chemistry. 1961. Vol. 39. P. 174–1751.
38. Sheikholeslami R., Ong H.W.K. Kinetics and thermodynamics of calcium carbonate and calcium sulfate at salinities up to 1.5 M // Desalination. 2003. Vol. 157. P. 217–234.
39. Dai Z., Kan A.T., Shi W. et al. Solubility Measurements and Predictions of Gypsum, Anhydrite, and Calcite Over Wide Ranges of Temperature, Pressure, and Ionic Strength with Mixed Electrolytes // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 50. P. 327–339. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1123-9>
40. Hamdona S.K., Hadad O.A. Influence of additives on the precipitation of gypsum in sodium chloride solutions // Desalination. 2008. Vol. 228. P. 277–286.
41. He S., Oddo J.E., Tomson M.B. The inhibition of gypsum and barite nucleation in NaCl brines at temperatures from 25 to 90°C // Applied Geochemistry. 1994. Vol. 9. P. 561–567.
42. Reiss A.G., Gavrieli I., Rosenberg Y.O. et al. Gypsum Precipitation under Saline Conditions: Thermodynamics, Kinetics, Morphology, and Size Distribution // Minerals. 2021. Vol. 11(2), №141. P. 1–36. <https://doi.org/10.3390/min11020141>.
43. McCartney E.R., Alexander A.E. The effect of additives upon the process of crystallization. I. Crystallization of calcium sulfate // Journal of Colloid Science. 1958. Vol. 13. P. 383–396.
44. Abd-El-Khalek D.E., Abd-El-Nabey B.A., Abdel-kawi M.A. et al. The inhibition of crystal growth of gypsum and barite scales in industrial water systems using green antiscalant // Water Supply. 2019. Vol. 19(7). P. 2140–2146. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.094>.
45. Zhao Y., Jia L., Liu K. et al. Inhibition of calcium sulfate scale by poly (citric acid) // Desalination. 2016. Vol. 392. P. 1–7.
46. Chauhan K., Kumar R., Kumar M. et al. Modified pectin-based polymers as green antiscalants for calcium inhibition // Desalination. 2012. Vol. 305. P. 31–37.

47. Hasson D., Shemer H., Sher A. State of the art of friendly «green» scale control inhibitors: a review article // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 50. P. 7601–7607.
48. Lioliou M.G., Paraskeva C.A., Koutsoukos P.G., Payatakes A.C. Calcium sulfate precipitation in the presence of water-soluble polymers // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2006. Vol. 303. P. 164–170.
49. Zhao Y., Jia L., Liu K. et al. Inhibition of calcium sulfate scale by poly (citric acid) // *Desalination*. 2016. Vol. 392. P. 1–7.
50. Rabizadeh T., Peacock C.L., Benning L.G. Carboxylic acids: effective inhibitors for calcium sulfate precipitation? // *Mineralogical Magazine*. 2014. Vol. 78(6). P. 1465–1472.
51. Akyol E., Öner M., Barouda E., Demadis K.D. Systematic structural determinants of the effects of tetraphosphonates on gypsum crystallization // *Crystal Growth & Design*. 2009. Vol. 9. P. 5145–5154.
52. Chauhan K., Kumar R., Kumar M. et al. Modified pectin-based polymers as green antiscalants for calcium inhibition // *Desalination*. 2012. Vol. 305. P. 31–37.
53. Hasson D., Shemer H., Sher A. State of the art of friendly «green» scale control inhibitors: a review article // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 50. P. 7601–7607.
54. Amjad Z., Landgraf R.T., Pen J.L. Calcium sulfate dihydrate (gypsum) scale inhibition by PAA, PAPEMP, and PAA/PAPEMP blend // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2014. Vol. 3. P. 35–47.
55. McCartney E.R., Alexander A.E. The effect of additives upon the process of crystallization. I. Crystallization of calcium sulfate // *Journal of Colloid Science*. 1958. Vol. 13. P. 383–396.
56. Ahmed S.B., Tlili M.M., Amami M., Amor M.B. Gypsum Precipitation Kinetics and solubility in the NaCl – MgCl₂ – CaSO₄ – H₂O system // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014. Vol. 53. P. 9554–9560.
57. Rabizadeh T., Stawski T.M., Morgan D.J. et al. The Effects of Inorganic Additives on the Nucleation and Growth Kinetics of Calcium Sulfate Dihydrate Crystals // *Crystal Growth & Design*. 2017. Vol. 17. P. 582–589. <https://doi.org/10.1021/ACS.CGD.6B01441>
58. Hamdona S.K., Nessim R.B., Hamza S.M. Spontaneous precipitation of calcium sulphate dihydrate in the presence of some metal ions // *Desalination*. 1993. Vol. 94. P. 69–80.
59. Driessche A.E.S., Kellermeier, M., Benning, L.G., Gebauer, D. Calcium sulfate precipitation throughout its phase diagram // *New Perspectives on Mineral*

Nucleation and Growth: From Solution Precursors to Solid Materials. Springer, Switzerland, 2017. P. 227–256.

60. Amjad Z., Landgraf R.T., Pen J.L. Calcium sulfate dihydrate (gypsum) scale inhibition by PAA, PAPEMP, and PAA/PAPEMP blend //International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. 2014. Vol. 3. P. 35–47.

61. Кистанова Н.С., Леонтьев П.Ю., Кудряшова О.С. Влияние натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы и полиакриламида на осаждение сульфата кальция // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2019. Т. 9, № 9(3). С. 203–211. <https://doi.org/10.17072/2223-1838-2019-3-203-211>

62. Rabizadeh T., Peacock C.L., Benning L.G. Carboxylic acids: effective inhibitors for calcium sulfate precipitation? //Mineralogical Magazine. 2014. Vol. 78(6). P. 1465–1472.

63. Мельникова П.В., Кистанова Н.С., Кудряшова О.С. Влияние натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы и хлорида натрия на осаждение дигидрата сульфата кальция // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2021. Т. 11, Вып. 3. С. 175–183. DOI:10.17072/2223-1838-2021-3-175-183

64. Ширинкин В.А., Кистанова Н.С., Кудряшова О.С. (). Влияние натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы и хлорида натрия на осаждение сульфата кальция из его пересыщенных растворов // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2022. Т. 12, Вып. 12(3). С. 127–137. <https://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-3-127-137>

65. Double ring infiltrometer. Operating instructions. Eijkelkamp Soil & Water. www.eijkelkamp.com. The Netherlands, 2018.

66. ГОСТ 5180–84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартиформ. 2016 г.

67. ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического микроагрегатного состава. М.: Стандартиформ. 2015 г.

68. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартиформ. 2013.

69. Грунтоведение / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1042 с.

70. Пат. 2363848 Российская Федерация. Состав для снижения водопроницаемости горных пород (варианты) и способ тампонирования водопроницаемости участков горных пород / Кудряшова О.С., Хайрулина Е.А. № 2020106365; заявл. 10.02.2020; опубл. 01.03. 2021.Бюл. № 7.

Научное издание

**Экологическая безопасность освоения
месторождений полезных ископаемых**

Монография

Под общей редакцией Е.А. Хайрулиной

Редактор *Е. И. Герман*

Корректор *Е. Г. Иванова*

Компьютерная верстка: *О.С. Кудряшова, Е.Е. Малышкина*

Подписано в печать 28.12.2022. Формат 60×84/16

Усл. печ. л. 11 Тираж 200 экз. Заказ № 100

Издательский центр
Пермского государственного
национального исследовательского университета.
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

Отпечатано в ООО "Типография "Здравствуй"
614068, г. Пермь, ул. Данщина, 7Д
Тел. (342) 270-14-05
hellobook@mail.ru