

На правах рукописи



Целюк Денис Игоревич

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТЕХНОГЕНЕЗА ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ НАМЫВНЫХ ХРАНИЛИЩ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ
ЕНИСЕЙСКОЙ СИБИРИ, ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ**

Специальность: 1.6.21 – Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Красноярск 2023

Работа выполнена в Государственном предприятии Красноярского края «Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья» (ГПКК «КНИИГиМС»), г.Красноярск

Официальные оппоненты:

Руш Елена Анатольевна,
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой «Техносферная
безопасность», Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Иркутский
государственный университет путей
сообщения», г. Иркутск

Левченко Елена Николаевна,
доктор геолого– минералогических наук,
заместитель генерального директора, директор
центра научно-методического обеспечения
геологоразведочных работ на редкометалльные
объекты Федерального государственного
бюджетного учреждения «Института
минералогии, геохимии и кристаллохимии
редких элементов», г. Москва

Макаров Дмитрий Викторович,
доктор технических наук, доцент,
директор Института проблем промышленной
экологии Севера – обособленное подразделение
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федерального
исследовательского центра «Кольский научный
центр Российской академии наук», г. Апатиты

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский федеральный
университет», Институт цветных металлов,
г. Красноярск

Защита диссертации состоится 8 ноября 2023 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета 24.1.053.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН» (ФГБУН «ИГХ СО РАН»)

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а
e-mail:amosova@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН «Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН», адрес сайта: <http://www.igc.irk.ru/ru/nauka/dissertatsionnyj-sovet>

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.х.н.



А.А. Амосова

Актуальность. Многолетняя эксплуатация горнопромышленных предприятий сопровождается масштабным образованием жидких промышленных отходов, размещение которых происходит в накопителях. Хвостохранилища и золоотвалы расположены преимущественно в пределах речных долин и ручьев. Встроенные в природную сеть поверхностных водотоков и взаимодействующие с ними на протяжении десятков лет намывные накопители образуют с природными водными объектами единые природно-технические системы, упорядочено функционирующие в пространственном и временном отношении. Экологическая опасность эксплуатации намывных накопителей проявляется в загрязнении природных вод химическими токсикантами. Степень опасности накопителей для природных водотоков зависит от развития техногенных процессов, протекающих во всех природно-технических системах независимо от их промышленной принадлежности, поскольку в процессе вторичного преобразования вещественного состава отходов происходит выщелачивание токсикантов и обогащение ими техногенных вод, циркулирующих внутри накопителей. Существенную роль играют количественные показатели дренажных утечек токсичного фильтрата за пределы промнакопителей и миграционная активность водорастворимых химических элементов. Большое значение имеют физико-химические параметры техногенных вод и дренажных утечек, а также кислотно-щелочной баланс водной среды на рубеже встречи токсичного фильтрата и природных вод, поскольку геохимические барьеры способны оказать определяющее воздействие на подвижность и потенциальную опасность токсикантов в отношении природных водотоков.

Исследования взаимовлияния природных и техногенных намывных систем, базирующихся на физико-химических трансформациях источников поступления технофильных элементов в природную среду, являются основой для раскрытия закономерностей опасных техноприродных процессов, происходящих в системе «намывные техногенные объекты – природные воды». Научно обоснованные факторы и критерии раскрытия процессов техногенеза позволяют оценить экологическую опасность, оказываемую техногенными объектами на природную среду, обосновать и разработать мероприятия по предупреждению негативных последствий. Актуальность решения данной проблем соответствует современным экологическим вызовам, ставшие перед нашей страной в XXI веке. Необходимость поиска решений преодоления экологических вызовов, связанных с ресурсосбережением и рациональным использованием минеральных ресурсов, соответствует положениям, утвержденным Правительством РФ в «Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года» и в «Прогнозе научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года».

Цель работы – исследование развития процессов техногенеза, определяющих особенности функционирования ведущих природно-технических систем «намывные техногенные объекты – природные воды» для комплексной оценки их воздействия на природные водотоки Енисейской Сибири, научного обоснования критериев оценки их экологической опасности и разработки мероприятий по предотвращению экологических кризисов.

Задачи исследования

Изучение особенностей вещественного состава техногенных осадков в намывных накопителях горнопромышленных отходов и влияния процессов техногенеза на их преобразование.

Исследование химического состава техногенных вод в намывных накопителях горнопромышленных отходов и их типизация по качественному составу.

Исследование техногенных процессов, формирующих качественный состав дренажного фильтрата, поступающего из намывных накопителей горнопромышленных отходов в природную среду.

Изучение воздействия техногенных вод на природные водотоки, исследование особенностей миграционных свойств технофильных элементов при взаимодействии фильтрата с природными водами.

Исследование геоэкологических последствий эмиссии технофильных элементов в окружающую среду в процессе промышленного использования природно-технических систем Енисейской Сибири на примере ртутного загрязнения. Научное обоснование критериев оценки экологической опасности их функционирования.

Объекты исследования. Объектами исследований послужили природные водные объекты и техногенные намывные хранилища горнопромышленных отходов, включающие хвостохранилища золоторудных ЗИФ, полиметаллических и железурудных ГОКов, золоотвалы КАТЭК. Сбор фактических данных осуществлен автором при обследовании промышленных объектов и компонентов природной среды, попадающих в зону антропогенного воздействия:

- Красноярский край: золоотвал Минусинской ТЭЦ, золоотвал Канской ТЭЦ, золоотвал Назаровской ГРЭС, золоотвал Березовской ГРЭС, золоотвал Красноярской ТЭЦ-1, золоотвал Красноярской ТЭЦ-2, золоотвал Красноярской ТЭЦ-3, золонакопитель ОАО «Крастяжмашэнерго», золоотвал ОАО «КрамзЭнерго», золоотвал ОАО «Красмаш», хвостохранилище ООО «Соврудник», хвостохранилище, ОАО «Артемовская золоторудная компания», хвостохранилище Краснокаменского ГОКа, хвостохранилище ОАО «Новоангарский обогатительный комбинат», сливное поле Богунаевской ЗИФ.
- Республика Хакасия: золоотвал Абаканской ТЭЦ, хвостохранилище Саралинской ЗИФ.
- Республика Тыва: хвостохранилище комбината «Тувакобальт».

Предмет исследования. Горнопромышленные отходы, объекты промышленной и природной водной среды, процессы техногенеза, природные системы. Изучение процессов трансформации вещественного состава промышленных отходов, преобразования состава техногенных и природных вод в природно-технических системах «намывной накопитель отходов – природные воды», исследование механизмов миграции и аккумуляции технофильных элементов при их транзите в природные водотоки. Исследования выполнены в соответствии с разделами «4. Глобальные и региональные экологические кризисы – комплексные изменения окружающей среды, приводящие к резкому ухудшению условий жизни и хозяйственной деятельности. Геоэкологические последствия природных и техногенных катастроф», «7. Геоэкологические аспекты функционирования природно-технических систем. Оптимизация взаимодействия (коэволюция) природной и техногенной подсистем», «14. Научные основы организации геоэкологического мониторинга природно-технических систем и обеспечение их экологической безопасности, разработка средств контроля состояния окружающей среды», «16. Моделирование геоэкологических процессов и последствий хозяйственной деятельности для природных комплексов и их отдельных компонентов».

Научная новизна. Впервые раскрыты особенности процессов, определяющие развитие техногенеза, как внутри намывных накопителей горнопромышленных отходов, так и в зонах их влияния на природную среду. Проведенные исследования показали, что деструкция минерального состава, процессы растворения, разложения, окисления минеральных форм, а также ионного обмена и переноса вещества водными растворами, происходящие внутри накопителей, определяют физико-химическую зональность техногенных массивов, обуславливают различия геохимической специфики технических и техногенных вод накопителей, а также техногенного фильтрата.

Установлено, что процессы вторичного минералообразования в техногенных массивах оказывают существенное влияние на качественный состав техногенного фильтрата и миграционную активность водорастворимых ингредиентов. Техногенные процессы, протекающие внутри намывных накопителей, оказывают воздействие на состояние природной среды, определяют экологическую опасность промышленных объектов и являются основой формирования и функционирования природно-технических систем. Определена ведущая роль окислительного воздействия атмосферного кислорода на миграционные свойства технофильных элементов в зоне разгрузки техногенного фильтрата из намывных накопителей промышленных отходов. Оценено влияние сорбционного барьера на миграционную активность ионных форм элементов в природной водной среде.

Обоснована методика научных исследований комплексного изучения взаимного влияния природных, технических и техногенных факторов, формирующих развитие экологических опасных процессов, происходящих в природно-технических системах «намывные техногенные объекты – природные воды». На основе изучения особенностей технической эмиссии ртути в регионе оценены масштабы негативных последствий воздействия технофильных элементов на природную среду экологически опасных природно-технических систем Енисейской Сибири.

Положения, выносимые на защиту

1. Массивы отложений в намывных накопителях горнопромышленных отходов гетерогенны по вещественному составу. Техногенные отложения верхнего горизонта сложены первичным и слабоизменённым минеральным комплексом сбрасываемых отходов. Обводненные техногенные осадки нижнего горизонта характеризуется замещением первичного минерального состава на вторичные формы, появлением новообразованных веществ коллоидного и аморфно-глинистого состава, способных накапливать химические вещества опасного и умеренно опасного классов.

2. Водоносная система в намывных накопителях сформирована из поверхностных технических вод (пульпа и осветленные воды прудов отстойников) и вод техногенного водоносного горизонта, обогащённых токсичными веществами в результате деструкции минеральной фазы нижнего горизонта.

3. Техногенный водоносный горизонт является источником загрязнителей, которые в составе фильтрата поступают в природные водные объекты. Масштаб распространения ионов токсичных веществ из техногенного фильтрата зависит от интенсивности действия геохимических барьеров: окислительного (атмосферного), где происходит их выпадение в составе новообразованных кристаллических минеральных фаз и сорбционного (природный водоток), где поллютанты аккумулируются новообразованными аморфными минеральными фазами в илистых фракциях речных осадков.

4. Процессы техногенеза, происходящие в природно-технических системах, приводят к повышению экологической опасности намывных хранилищ отходов горнопромышленных комплексов и кризисному изменению природной среды Енисейской Сибири, что подтверждается на примере ртутного загрязнения региона. Установленные факторы и критерии техногенных процессов следует учитывать в существующей системе обращения и управления отходами.

Достоверность защищаемых положений определяется объемом фактического материала, собранного на разнообразных техногенных объектах и проанализированного современными лабораторно-аналитическими методами в авторитетных аккредитованных лабораториях. Анализы выполнены в аккредитованных лабораториях ГПКК «Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья», Института химии и химической технологии СО РАН, проектно-изыскательского института «Красноярскгидропроект» филиал ОАО «СибЭНТЦ», Центральная лаборатория ОАО «Красноярскгеология», ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского», ОАО «Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов», Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. В основу расчетов положены апробированные методики, представленные в работах П.А. Удодова, А.И. Перельмана, С.Л. Шварцева. Статистическая обработка информации проведена с помощью программных комплексов Statistika и Statsoft с учетом фактической дисперсии концентрации данных на техногенных и природных объектах. Математическая обработка осуществлялась комплексом Matlab, графические построения выполнены с помощью AutoCad, CorelDraw, Surfer. Построенные физико-химические модели природно-технических систем «намывной накопитель отходов – природные воды» отражают основные закономерности техногенных процессов и согласуются с результатами гидрохимических наблюдений в районе антропогенного изменения речных систем.

Теоретическое и практическое значение работы. Теоретическая значимость работы заключается в развитии научных представлений о техногенных процессах, происходящих при деструктивном воздействии на отходообразующие минералы и минеральные комплексы

технических вод. Исследование техногенных процессов, приводящих к формированию техногенного водоносного горизонта, позволили создать модель развития техногенеза внутри намывных накопителей горнопромышленных отходов, обусловленную взаимодействием осадков и водных растворов. Установлено, что процессы техногенеза формируют насыщенность техногенного фильтрата загрязняющими ингредиентами. Обоснована теоретическая миграционная модель поведения загрязняющих веществ при поступлении их из промнакопителей в природный водоток. Обосновано влияние геохимических барьеров на миграционные свойства технофильных элементов, поскольку они формируют уровень загрязнения и определяют степень экологической опасности промнакопителей, как источников загрязнения природной среды.

Разработанные теоретические модели развития техногенеза в природно-технических системах послужили основой для оценки экологической опасности эксплуатируемых намывных накопителей горнопромышленных отходов. Установлено, что основой негативного воздействия на окружающую среду является повышение класса опасности отходов, связанного с деструкцией минерального состава техногенных осадков, перераспределением химических компонентов и миграцией сконцентрированных в техногенном фильтрате загрязняющих ингредиентов в природные водотоки. Установленные критерии экологической опасности функционирования систем позволили сформировать предложения по совершенствованию экологического мониторинга. Созданы пионерные способы вовлечения лежалых намывных хвостов в повторную отработку, что подтверждено экспертизой ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности» и защищено двумя патентами. Результаты работ неоднократно докладывались в Министерстве природных ресурсов Красноярского края, на заседаниях Экспертной комиссии КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки науки и научно-технической деятельности», внедрены на горнодобывающих предприятиях ООО «Соврудник», ЗАО «Артемовская золоторудная компания», ОАО «Краснокаменский рудник».

Апробация результатов работы и публикации. Результаты исследований опубликованы в 50 научных работах, в том числе в одной монографии, 19 статьях в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации, получены 2 патента. Основные научные положения работы обсуждались на 25 международных, всероссийских и региональных конференциях, в том числе на Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию Сибирского государственного технологического университета. «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения» (Красноярск, 2005); Всероссийской научной конференции, посвященной 75-летию образования Красноярского края «География, история и геоэкология Сибири» (Красноярск, 2009); Второй научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Геология, поиски и комплексное изучение и оценка месторождений твердых полезных ископаемых» (Москва, 2009); Научно-практической конференции «Создание новых горнорудных районов в Сибири и на Дальнем Востоке: проблемы и пути решения» (Москва, 2011); IV Международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (Хабаровск, 2011); X Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» (Москва – Махачкала, 2011); Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Москва, 2011); III научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Комплексное изучение и оценка месторождений твердых полезных ископаемых» (Москва, 2011); Baikal international conference “Geology of mineral deposits”. (Ulan-Ude, 2012); IV научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Комплексное изучение и оценка месторождений твердых полезных ископаемых» (Москва, 2012); III Всероссийской научно-практической конференции «Минерагения Северо-Восточной Азии» (Улан-Удэ, 2012); VII Российском семинаре «Прогнозная оценка технологических свойств полезных методами прикладной минералогии» (Москва, 2012); Всероссийской научно-практической конференции «Геолого-геохимические проблемы экологии» (Москва, 2012); IX Конгрессе обогатителей стран СНГ (Москва, 2013); IV международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования». (Москва, 2013); XLI Международной конференции

«Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе» (Гурзуф (Украина), 2013); XII Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» (Москва - Иран, 2013); XVI Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр». (Москва - Донецк, 2017 г.); XI Международном горно-геологическом форуме МИНГЕО СИБИРЬ 2018 (Красноярск, 2018); Енисейском экологическом форуме (Красноярск, 2019), VIII Всероссийском симпозиуме с международным участием «Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий» (Чита, 2021).

Фактический материал. Работа выполнена в рамках государственного контракта «Осуществление мониторинга подземных вод в зоне влияния промышленных отвалов предприятий Красноярского края» (2008 г.), а также при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в процессе выполнения НИР «Оценка ресурсного потенциала хвостов горнорудного производства с целью расширения минерально-сырьевой базы золота Красноярского края и разработки рекомендаций для выбора оптимальной технологической схемы их комплексного использования» (2010 г.); «Оценка ресурсного потенциала хвостов железорудного производства Красноярского края, научное обоснование технологических решений их комплексного использования» (2011 г.); «Оценка условий применения метода кучного выщелачивания золота при разработке лежалых хвостов золото-кварцевых руд (на примере месторождений ООО «Соврудник»)» (2011 г.); «Разработка рациональной технологии переработки лежалых хвостов из хвостохранилища ОАО «Краснокаменское рудоуправление» с получением товарного железорудного концентрата» (2012г.); «Проведение исследований по повышению эффективности применения метода кучного выщелачивания золота при вовлечении в промышленное производство лежалых хвостов золото-сульфидных руд» (2013 г.). Дополнительный материал собран при проведении договорных работ на предприятиях теплоэнергетики и горнодобывающих комплексах Енисейской Сибири в период с 2005 по 2019 г.

В процессе исследований изучено более 2000 проб золошлаковых отложений из золоотвалов ТЭС и лежалых хвостов горнорудных комплексов, 500 проб подземных вод из сети наблюдательных скважин золоотвалов; 200 проб поверхностных вод и 300 проб донных отложений из водотоков в зоне влияния намывных накопителей промышленных отходов Енисейской Сибири. Общее количество выполненных анализов, включая результаты водных, кислотных вытяжек и экспериментальных исследований, составило более 10000 элементо-определений. В работе использованы результаты исследований физических свойств золowych отложений и лежалых хвостов горнопромышленного производства (лаборатория физико-механических исследований проектно-изыскательского института «Красноярскгидропроект» филиал ОАО «СибЭНТЦ»); химических и спектральных полуколичественных и количественных анализов (аналитический отдел «Аккредитованный испытательный центр ОАО «Краснояскгеология» по полезным ископаемым, металлам и сплавам»); количественного химического, спектрального атомно-эмиссионного и атомно-абсорбционного анализа, масс-спектрометрического метода с индуктивно связанной плазмой (ISP-MS) грунтов и донных отложений, химического анализа техногенных вод и фильтрационных растворов, гидрохимического анализа природных вод (аккредитованная аналитическая лаборатория ГПКК «КНИИГиМС»); рентгенофазовых, термогравиметрических, локальных рентгеноспектральных анализов, растровой электронной микроскопии (Институт химии и химической технологии СО РАН, ФГБУ "Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского", Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН).

Личный вклад автора. Автором осуществлена постановка цели и задач геоэкологических исследований, проработан комплексный методических подход в системе изучения техногенных отложений из намывных накопителей промышленных отходов, технических и техногенных вод, фильтрационных растворов, природных поверхностных вод, донных отложений. Проведен отбор проб, выполнен анализ полученного фактического материала и аналитическое обобщение полученных результатов, разработана и подготовлена

техногенная модель функционирования природно-технической системы «намывной накопитель отходов – природный водоток». На основе полученного фактического материала изучены процессы формирования техногенного фильтрата, поступающего в природные водотоки. Раскрыты причины и оценены масштабы загрязнения речных водотоков ртутью, обусловленные последствиями функционирования природно-технических систем Енисейской Сибири. Разработана система комплексного экологического мониторинга исследуемых природно-технических систем. На основе полученных результатов обоснованы и рекомендованы для реализации предложения по совершенствованию системы управления в области обращения с намывными накопителями горнопромышленных отходов.

Структура и объем. Диссертация состоит из 5 глав, содержит 357 страниц, в том числе рисунки – 203, таблиц – 72, список литературы включает 237 наименований.

Благодарности. За ценные консультации при создании работы автор выражает глубокую благодарность ведущим сотрудникам Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН д.г. - м.н. Е.В. Безруковой, д.г. - м.н. В.И. Гребенщиковой, к.г. - м.н. Г.П. Королевой. За помощь и оказанную поддержку в создании работы автор выражает искреннюю благодарность директору «ФГБУ "Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского"» д.г. - м.н. Г.А. Машковцеву, а также д.г. - м.н. Е.Г. Ожогойной, д.г.-м.н. В.И. Кузькину, д.г.-м.н. Л.З. Быховскому, д.г.-м.н. Б.И. Пирогову (ФГБУ «ВИМС»), д.ф.-м.н. В.М. Журавлеву (Политехнический институт Сибирского федерального университета), к.г.-м.н. А.П. Романову, к.т.н. В.И. Герману (ГПКК «КНИИГиМС»), руководителю Центра трансфера и технологий Красноярского научного центра СО РАН к.т.н. А.Н. Кокорину. Автор весьма признателен администрации КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» д.ф.-м.н. В.Н. Моргуну, к.т.н. А.А. Иптешеву, к.т.н. Д.В. Кокорину. Особую благодарность за помощь в проведении минералогических и аналитических исследований автор выражает сотрудникам Института химии и химической технологии СО РАН к.х.н. А.М. Жижаеву, Г.Н. Бондаренко, сотрудникам отделов минералогических и технологических исследований ФГБУ «ВИМС» С.И. Ануфриевой, Е.С. Бронецкой, В.Е. Жуковой, О.А. Якушиной а также сотрудникам аналитической лаборатории ГПКК «КНИИГиМС» А.П.Соловьевой, С.Н. Шведовой, Л.И. Вороновой. Искреннюю признательность, за помощь в проведении полевых работ автор выражает директору буровой компании ООО «Енисейводстрой» Ю.А. Меркулову, а также А.Н. Брацуну.

Структура автореферата оформлена по защищаемым положениям.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

В первой главе проведен анализ исследований, касающихся фундаментальных проблем взаимодействия техногенных объектов и природных компонентов. Существующая постоянная взаимосвязь технических вод из промнакопителей с природными водотоками доказывает наличие постоянно действующих природно-технических систем, функционирующих по типу «намывные техногенные объекты – природные воды» (рис.1). Составными параметрами функционирования каждой системы является: намывной накопитель отходов, массив техногенных отложений, технические поверхностные воды, техногенный водоносный горизонт – образуется в результате фильтрации, техногенный фильтрат, природный водоток. Развитие техногенеза в природно-технических системах включает следующие этапы:

- 1 этап.** Преобразование вещества техногенных осадков в объектах накопления;
- 2 этап.** Формирование химической специализации водной среды в накопителях;
- 3 этап.** Формирование химической специализации техногенного фильтрата и миграционных параметров химических ингредиентов, в том числе загрязняющих веществ в природно-технических системах;
- 4 этап.** Развитие экологических опасных процессов, формирующихся под влиянием техногенеза в природно-технических системах.

Во второй главе приведены результаты исследований химического, микроэлементного и минерального состава *массивов техногенных отложений золотизвлекающего, железорудного и теплоэнергетического производства*. Установлены закономерности неоднородного строения техногенных массивов. В третьей главе изложены результаты изучения химического состава технических поверхностных и вод техногенного водоносного горизонта в накопителях. Выделены химические типы техногенных вод и геохимические ассоциации элементов, содержащиеся в них. В четвертой главе изложены результаты исследований качественного состава техногенного фильтрата, определены миграционные способности химических элементов и пути их водного транзита в природно-технических системах. В пятой главе обоснованы и рассмотрены модели функционирования природно-технических систем. На основе ртутного загрязнения промышленных регионов Енисейской Сибири исследованы последствия эмиссии технофильных элементов в природные водотоки и оценены геоэкологические последствия негативного влияния техногенеза. Представлено научное обоснование критериев оценки экологической опасности функционирования природно-технических систем. Подготовлены предложения по совершенствованию управления в области обращения с горнопромышленными отходами.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое положение.

Массивы отложений в намывных накопителях промышленных отходов гетерогенны по вещественному составу. Техногенные отложения верхнего горизонта сложены первичным и слабоизменённым минеральным комплексом сбрасываемых отходов. Обводненные техногенные осадки нижнего горизонта характеризуются замещением первичного минерального состава на вторичные формы, появлением новообразованных веществ коллоидного и аморфно-глинистого состава, способных накапливать химические вещества опасного и умеренно опасного классов.

Состав техногенных осадков, размещаемых в намывных золоотвалах и хвостохранилищах, определяется веществом перерабатываемого на промышленных объектах природного сырья. Техногенные отложения в промышленных накопителях неоднородны по вещественному составу (рис. 2). Зональное строение обусловлено процессами вторичного преобразования осадков, залегающих в нижних горизонтах техногенных массивов. Произошедшие модификации минеральных выделений в техногенных осадках обусловлены процессами замещения первичных минералов вторичными образованиями и формированием новообразованных тонкокристаллических и аморфных минеральных фаз, цементирующих обломочный материал.

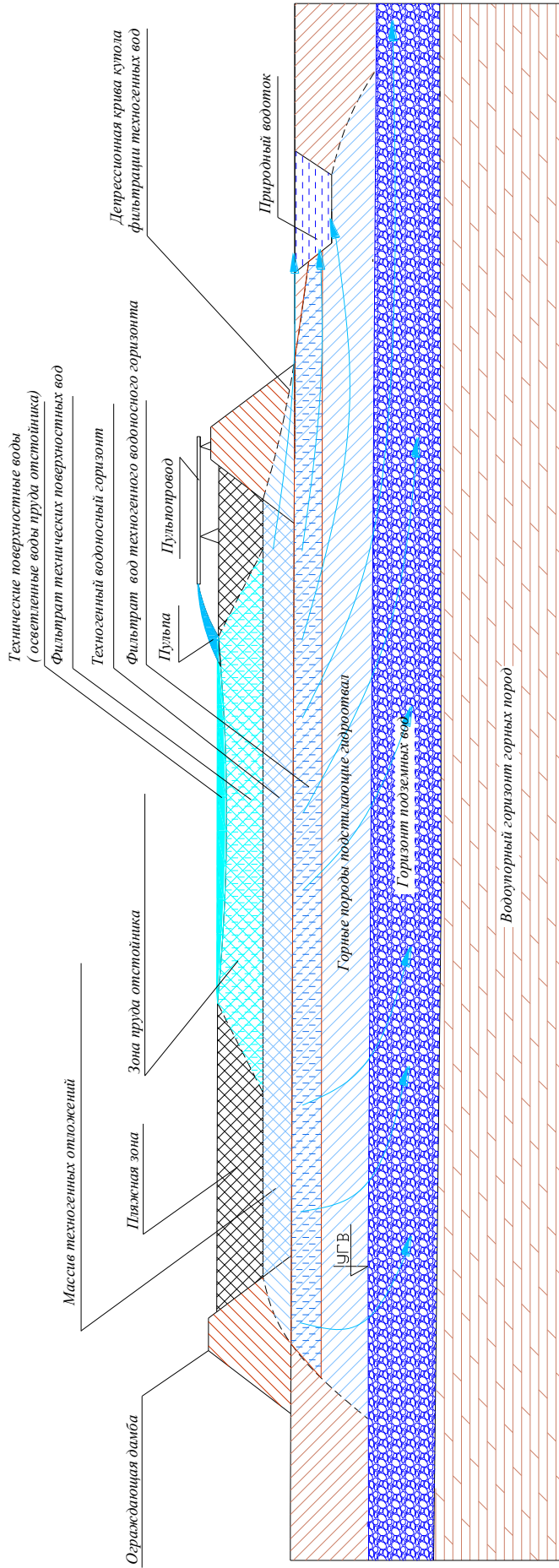


Рис. 1. Принципиальная схема строения природно-технической системы «намывной накопитель отходов – природные воды».

Условные обозначения

Намывной накопитель отходов – техногенные объекты намывного типа, предназначенные для накопления и хранения промышленных отходов, поступающих в результате гидроудаления с горнопромышленного производства. Основными конструктивными элементами этих объектов являются обустроенные в соответствии с требованиями СНиП ограждающие дамбы, днища накопителей, дренажные системы, сооружения для сбора дренажных вод, а также противофильтрационные экраны.

Массив техногенных отложений – осадочные отложения внутри намывного накопителя отходов, сформированные в результате разделения пульпы на технические воды и твердую фракцию промышленных отходов, осаждающуюся во внутреннем пространстве накопителя.

Технические поверхностные воды – жидкая фракция, образующаяся при разделении пульпы, формирующая пруды осветления (отстойники) во внутреннем пространстве накопителя.

Техногенный водоносный горизонт – образуется в результате фильтрации технических поверхностных вод в нижележащие горизонты до основания техногенных отложений при накопителе ограниченного противофильтрационными элементами. Его распространение фиксируется практически по всей придонной площади намывных объектов и ограничивается дамбами обвалования.

Техногенный фильтрат – воды техногенного водоносного горизонта, дренирующие через ограждающие сооружения, через подшосу дамбы, либо через опорные грунты ложа намывного накопителя отходов.

Природный водоносный горизонт – природный водный объект речного типа в пойме которого располагается массив техногенных отложений, оказывающий на него техногенное воздействие.

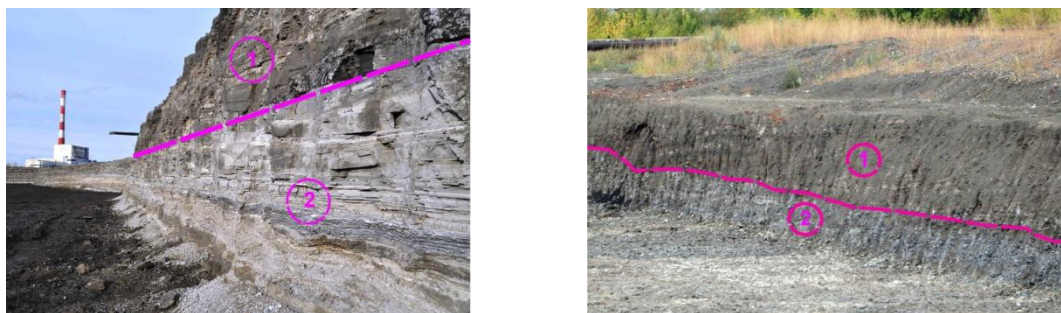


Рис. 2. Литологический состав золовых осадков в осушенных секциях золоотвалов.

а – южный борт золоотвала АО «КрамзЭнерго»; **б** – юго-восточный борт золоотвала Красноярской ТЭЦ-1 филиала АО «Енисейская ТГК-13». **1** – верхний горизонт темно-серых зол, сложенных кремнистой фазой, железистыми и карбонатными минеральными выделениями; **2** – нижний горизонт зол светло-серого цвета с широким развитием новообразованных хлопьевидных и коллоидных карбонатных минеральных форм.

В намывных золоотвалах тип золовых осадков обусловлен качеством углей, сжигаемых на ТЭЦ и ГРЭС Енисейской Сибири. Главными золообразующими химическими соединениями являются оксид кальция и оксид кремния. Суммарная доля этих веществ составляет от 52 до 59%. Доминирует оксид кальция, содержание которого варьирует от 31 до 38%. Доля оксида кремния несколько ниже от 14 до 27%. Количество оксида железа и оксида алюминия на порядок уступает показателям основных золообразующих компонентов, содержание оксида алюминия не превышает 8,96%, а оксида железа 8,1%. Остальные компоненты представлены серой и оксидами магния, натрия, калия, суммарная доля, которых не превышает 6–7%.

По химическому составу в вертикальном разрезе золовых отложений отчетливо выделяются два горизонта. В верхнем горизонте содержание оксида кальция 28–32%, в нижнем 38–40%. Химический состав зол в нижних горизонтах сдвигается от кальциевого к высококальциевому типу. Распределение оксида кремния имеет противоположную тенденцию. Максимальные содержания зафиксированы в верхних горизонтах техногенных отложений, минимальные в нижних. В верхнем горизонте зафиксировано повышенное содержание оксидов алюминия и относительно низкие концентрации оксидов железа. В нижних горизонтах концентрации оксида алюминия уменьшаются почти в два раза, а концентрации оксида железа увеличиваются.

По результатам спектрального анализа установлено постоянное присутствие В, Р, Se, Ti, V, Cr, Mn, Co, Cu, Ni, Zn, Ga, Sr, Y, Zr, Mo, Ba, Pb. Микроэлементы разделяются на три группы. В первую группу с пределом содержания 5000–100 мг/кг входят Mn, Ti, Sr, Ba, Zr, В. Вторую группу с концентрацией 100–1 мг/кг составляют Cu, Pb, Zn, Co, V, Cr, Ni, Zr, Ga, Mo, Sn, Be. Третья группа элементов с содержанием менее 1 мг/кг представлена Bi, W, Ag, Cd, As, Sb, Ce, Li, U, Th, Hf, Ta, Tl, Hg, Te, In. в золах происходит накопление практически всех микроэлементов. В ощутимых количествах накапливаются экологически опасные ингредиенты: Ba, Sr, В, Mo, Pb, Cu, Zn, Co, Ni. Так В, Co, Mo, Pb относятся ко второму классу опасности, Ba, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn к третьему.

По уровню концентрации элементов установлены два горизонта осадков, отличных друг от друга. Верхние горизонты золовых толщ практически во всех золоотвалах характеризуются повышенным содержанием Ba, Sr, Cr, Ti, V, Mn, Cu, Pb, Zn. Концентрация Ba, Sr, Ti, Mn установлена в пределах от 1000 до 1500 мг/кг. Содержание Cr, V, Mn, Cu, Pb, Zn от 15 до 120 мг/кг, Co 12 мг/кг, Ni 24 мг/кг, Mo 1,5 мг/кг. Установлены четыре ассоциации элементов: Si-K-Na-Cr-Be; Ca-Mg-Ba-Sr-Mn-Pb; Si-Al-Ba-Co; Fe-Ti-V, состав которых отражает минералогию первичных зол, поступающих в накопители после сжигания углей.

В нижних горизонтах техногенных осадков концентрации Sr и Ba существенно снижаются. Валовые содержания Cr, V, Mn, Cu, Pb, Zn также уменьшаются почти на порядок. Вместе с этим в золах наблюдается рост содержания Co до 24 мг/кг, Ni до 70 мг/кг и Mo до 3 мг/кг. Корреляционные связи между элементами изменяются. Формируются три ассоциации элементов Fe-Ti-V-Cr, Ca-Co-Be-Ba, Al-Mg-Si-Ni-Cu-Mo-Zr. Вновь образованные элементные

группы отражают накопление в нижнем горизонте черных металлов, а также появление вторичного карбоната кальция и новообразованных алюмосиликатных фаз.

Золы, образованные от сжигания углей Канско-Ачинского бурогоугольного бассейна, относятся к кальциевому типу, в котором доминируют карбонатные минеральные формы и переплавленная кремнисто-стекловатая фаза. Минеральный состав зол представлен кварцем, кальцитом, полевыми шпатами, оксидами и гидроксидами железа. В подчиненном количестве присутствуют глинистые минералы, гипс, цеолиты.

По результатам количественного минералогического анализа установлено, что доля породообразующих минералов в золовых отложениях составляет 46,2 – 49,9 %. К их числу относятся карбонатные фазы (преимущественно кальцит) 14 – 26 %, кварц 5 – 12 % и алюмосиликаты 5,6 – 6 %, представленные альбитом и анортитом. Доля переплавленной стекловатой кварцевой массы – стеклофазы в общем объеме вещества довольно заметная 19 % – 23 %. Содержания рудных минералов магнетита и гематита находятся в пределах от 5,3 до 7 %. По данным термогравиметрического анализа в золовых отложениях повсеместно фиксируется присутствие недожженного угля, общее количество которого в техногенных осадках может достигать 5 %.

Кварц присутствует как в виде самостоятельных зерен, так и в составе стеклофазы. Кроме кристаллических широко распространены отдельные формы и скопления сферических выделений кварца. Диаметр сфер изменяется от 0,05 мм до 0,1 мм. Сфероиды характеризуются черным, бурым, зеленовато-бурым окрасом с признаками начальной кристаллизации вещества.

Карбонатные минералы в золовых отложениях представлены преимущественно кальцитом, реже доломитом. Субкристаллические формы кальцита часто проявляются в виде отдельных прямоугольных табличек и зернистых агрегатов, которые рассеяны в основной массе золовых осадков. Доломит развит в виде микрочернистых агрегатов и ромбовидных кристаллов светло серого и серого цвета, иногда с незначительным бурым оттенком.

Магнетит в массиве техногенных отложений распространен равномерно, представлен оплавленными кристаллами октаэдрической либо ромбо-додекаэдрической формы. Гематит встречается в виде ромбоэдрических и пластинчатых кристаллов, а также чешуйчатых скоплений.

В золе присутствуют акцессорные минералы. Выделяются первичные оплавленные минеральные формы апатита, турмалина, эпидота, кристаллы монацита, сфена, пироксена, лейкоксена. Отмечаются редкие угловатые зерна бадделеита и роговой обманки.

Помимо породообразующих и акцессорных минералов в техногенных осадках в большом количестве присутствуют алюмосиликатные и ферритовые глобулы. Железистые глобулы появляются в результате преобразования марказита при сжигании угля, алюмосиликатные глобулы при расплавлении глинистой и карбонатной составляющей углей. При охлаждении золы также формируются полые алюмосиликатные сферы, внутреннюю часть которых заполняют газы CO_2 и SO_2 . Поверхность как ферритовых, так и алюмосиликатных глобул гладкая, глянцевая. В ряде случаев на поверхности алюмосиликатных глобул проявляются вторичные образования кальцита и гипса пластинчатой, игольчатой и хлопьевидной формы. В золовых отложениях глобулы распределены практически равномерно.

Обращает на себя внимание широкое развитие в золах вторичных новообразованных минеральных фаз, суммарная доля которых может достигать 50 %. Визуально зона интенсивного проявления минеральных новообразований отчетливо прослеживается по цветовым тонам на стенках бортов карьеров, вскрывших золовые массивы на всю мощность. В большинстве своем вторичные минеральные фазы распространены в нижних горизонтах осадочных отложений золоотвалов. Отличительный белесый оттенок этих осадков обусловлен широким развитием новообразованных минералов, ведущими из которых являются кальцит, гипс и аморфные глинисто-карбонатные минеральные фазы (рис. 2).

В нижних горизонтах характеризуется преобразованием минеральной массы выраженного вторичными изменениями кальцита, полевых шпатов и алюмосиликатных глобул. В составе новообразованных минеральных фаз проявлены вторичный кальцит, гипс, слоистые

алюмосиликаты, гидро-алюмосиликаты, гидроксиды железа, цеолиты, гелеобразные и аморфные глинисто-карбонатные массы.

Новообразованные чешуйчатые и микрокристаллические выделения вторичного кальцита в массовом количестве заполняют трещины, полости, поры и другие свободные пространства в техногенных осадках нижних горизонтов золовых осадков. Довольно часто они полностью покрывают поверхность алюмосиликатных глобул. При этом толщина новообразованного минерального слоя может значительно варьировать. Так, например, при покрытии поверхности первичных сфероидов равномерным тонким слоем чешуйчатых и игольчатых новообразований сохраняется первичная округлая форма глобул. Более мощная кристаллизация таблитчатых и зернистых новообразованных минеральных фаз приводит к значимой видимой трансформации округлого контура глобул (рис. 3 а, б). Кроме того, чешуйчатые новообразованные агрегаты способны накапливаться и внутри первичных глобул. Характерным примером могут служить полые алюмосиликатные микросферы, в которых вторичные фазы кальцита почти полностью заполняют внутренние пространства сфероидов, вытесняя из них газы CO_2 и SO_2 (рис. 3).

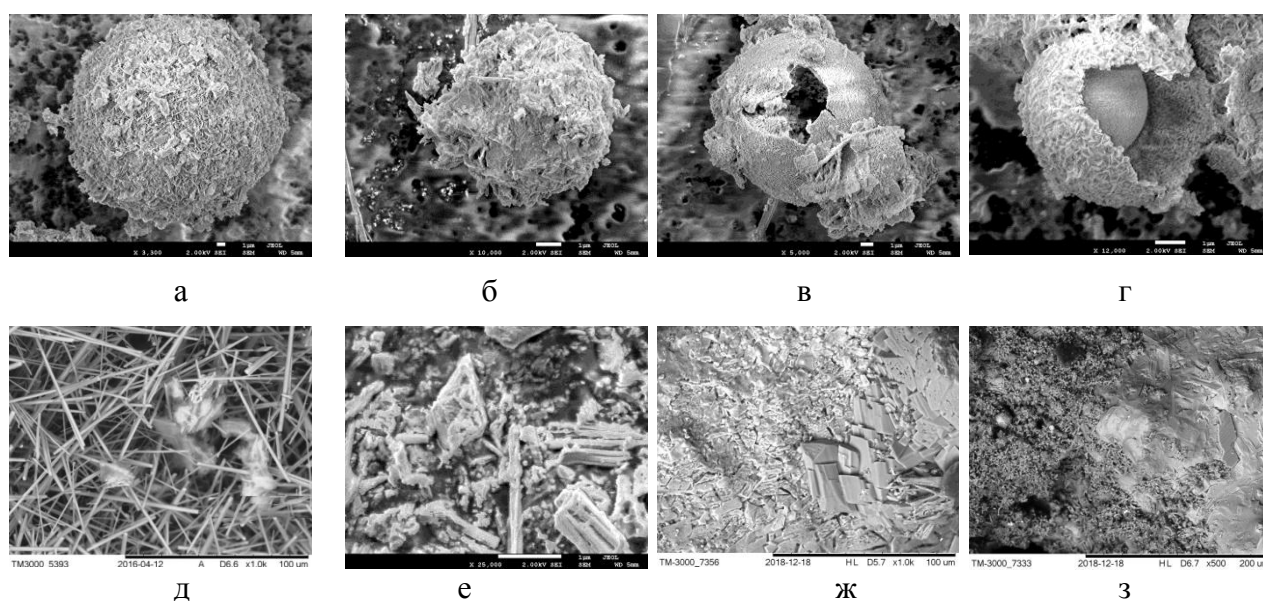


Рис. 3. Вторичные минеральные фазы из нижнего горизонта осадочных отложений золоотвалов.

а, б – кристаллизация новообразованных карбонатных минеральных фаз на поверхности алюмосиликатных глобул с сохранением первоначального сферического контура; **в** - деструкция алюмосиликатных микросфер с выпадением вторичных минеральных фаз кальцита во внутреннем пространстве сфероидов; **г** - плотный слой вторичных карбонатных минеральных фаз на поверхности ферритовых глобул; **д** - игольчатые выделения гипса; **е** - кристаллические выделения гипса, ассоциирующие с землистыми массами угольного недожега и алюмосиликатными глобулами; **ж** – таблитчатые формы гипса и аморфной карбонатной алюмосиликатной массы; **з** – аморфная карбонатно-алюмосиликатная масса с новообразованным кристаллическим кальцитом.

В отличие от алюмосиликатных, железистые глобулы в золовых отложениях изменяются слабо. Обычно поверхности этих глобул подвержены слабо выраженной пористости. Лишь в нижних слоях осадочных золовых отложений вторичные карбонатные минеральные выделения могут покрывать ферритовые глобулы плотным слоем (рис. 3 г).

Гипс в техногенных осадках кристаллизуется в виде сростков, состоящих из игольчатых форм и удлиненных призм (рис. 3 д, е). Кристаллические агрегаты обычно ассоциируют с несгоревшими угольными массами и алюмосиликатными глобулами. Появление гипса обусловлено химическими процессами преобразования в золах серосодержащих минеральных форм. Здесь происходит разрушение пустотелых сфер и высвобождение SO_2 , а также идет деструкция угольного вещества с заметным понижением содержания в нем связанной серы от 5 до 1,5 %.

Особенностью аморфной глинисто-карбонатной землистой массы является ее цементирующее свойство. Вторичные минеральные новообразования буквально пропитывают

золотые осадки, цементируя стеклофазу, кварц, железистые и алюмосиликатные глобулы (рис. 3ж). Другая разновидность аморфной фазы представляет собой наздревато-пористые метаколлоидные, частью концентрически-зональные, тонкодисперсные агрегативные образования, состоящие из соединений кремния, алюминия, кальция (рис. 3з). В ряде случаев на поверхности аморфных выделений под большим увеличением можно наблюдать выпадение микрокристаллических агрегатов кальцита и гипса.

Об интенсивности процессов вторичного минералообразования свидетельствует широко проявленная кристаллизация минеральных форм внутри труб дренажных систем золоотвалов. Рисунок 3 дает наглядное представление о масштабности протекания этого процесса. В результате поступления пересыщенных растворов в дренажную систему внутренние стенки труб начинают интенсивно покрываться слоистыми уплотненными образованиями вторичного кальцита, гипса, а также гидросульфокарбосиликата кальция – таумассита, гидросульфалюмината кальция – эттрингита, барита вплоть до полного заполнения всего внутритрубного пространства (рис. 4а). Также обращают на себя внимание параметры пластовых ноздревато-пористых метаколлоидных новообразований, сформировавшихся в основании золотых массивов. Вскрытая мощность их в бортах карьерных выемок достигает 3 – 4 метров. (рис. 4 б, в).

В намывных хвостохранилищах состав лежалых хвостов в значительной мере зависит от промышленного типа рудного сырья, обогащаемого на ЗИФ Енисейской Сибири.

Лежалые хвосты, образованные при переработке малосульфидных руд золото-кварцевой формации, относятся к кремнистому типу и характеризуются сульфидным кварцево-слюдисто-хлоритовым минеральным составом. Лежалые хвосты, сформированные при переработке руд золото-кварц-сульфидной формации, классифицируются в кремнисто-кальциевый тип, в котором доминируют кварц, гидрослюды, сульфиды и карбонаты.

В химическом составе лежалых хвостов преобладают оксиды кремния (SiO_2) от 39,38 до 46,3 %, оксид железа (FeO) от 20,9 до 27,98 %, оксид алюминия от 5,84 до 11,9 %. В подчиненном количестве присутствуют оксиды кальция (CaO), магния (MgO) в сумме не более 14 %. Суммарное содержание оксида натрия и оксида калия около 2 %.

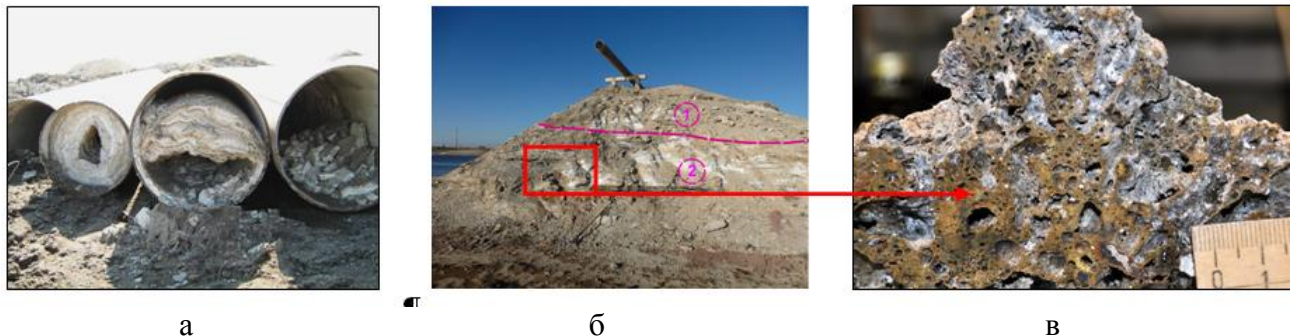


Рис. 4. Новообразованные колломорфные минеральные фазы

а – слоистые новообразованные минеральные фазы в дренажных системах золоотвала Назаровской ГРЭС (диаметр труб 700 мм); **б** – сцементированные колломорфные массы из нижнего горизонта золоотвала Березовской ГРЭС; **в** – ноздревато – пористые новообразованные колломорфные массы из нижнего горизонта золоотвала Березовской ГРЭС.

По химическому составу в вертикальном разрезе массива лежалых хвостов четко выделяются два горизонта. Основным отличительным признаком является показатель уровня концентрации оксида железа. В верхнем горизонте содержание Fe_2O_3 практически не превышает 20 %, в нижнем увеличивается до 30 %. Различия в составе лежалых хвостов проявляется и в концентрациях главных рудообразующих элементов: железа, мышьяка, серы. Особенно показательно увеличение доли окисленного железа, мышьяка и серы в нижних горизонтах массива техногенных отложений, при уменьшении доли их сульфидных форм. Заметным отличием содержания в разрезе техногенных осадков обладает оксид алюминия. В верхних горизонтах его

концентрации редко превышают 5 %, в нижних горизонтах они увеличиваются почти в два раза, достигая 10,5 %.

В составе лежалых хвостов ЗИФ установлено постоянное присутствие следующих микроэлементов: Ag, Au, As, Ba, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Ti, V, Zn. Максимальные концентрации, находящиеся в пределах 0,1 – 1 %, характерны для As, Cu, Mn, Ti. Значения от 0,01 до 0,1% присущи Ba, Co, Pb, V, Zn. В интервале от 0,001 до 0,01 % присутствуют Li, Cr, Ni. Содержания благородных металлов Ag и Au колеблются от 0,0001 до 0,001 %.

По уровню концентрации As, Ba, Co, Ni, Cu, Mn, Pb, Zn в техногенных толщах четко выделяются два горизонта. В верхнем горизонте хвостохранилища Артемовской ЗИФ концентрация As составляет 40 мг/кг, Ba 270 мг/кг, Co 18 мг/кг, Cu от 80 до 130 мг/кг, Zn 80 мг/кг, Mn 800 мг/кг, Ni 16 мг/кг, Pb 9 мг/кг. В нижнем горизонте концентрации этих элементов увеличиваются. Содержание Cu и Mn возрастает до 4500 – 5000 мг/кг, As до 760 – 920 мг/кг, Ba до 650 – 720 мг/кг, Zn и Co до 340 – 400 мг/кг, Pb и Ni до 140 – 170 мг/кг. В хвостохранилище Советской ЗИФ также в нижнем горизонте содержания As, Ba, Co, Ni, Cu, Pb, Zn, Au, Ag намного выше, чем в верхнем. Концентрация As возрастает от 5000 мг/кг до 10000 мг/кг, Ba от 170 мг/кг до 540 мг/кг, Co от 45 мг/кг до 250 мг/кг, Ni от 64 мг/кг до 290 мг/кг, Cu от 100 мг/кг до 460 мг/кг. Zn повышается до 1100 мг/кг, Pb до 1200 мг/кг, Ag до 3,49 мг/кг.

В верхнем горизонте техногенных осадков Артемовской ЗИФ установлены тесные корреляционные связи между Ag-Cu-Ni-Fe-Pb и Si-V-Ti в лежалых хвостах Советской ЗИФ As – Co – Ni – Fe – Cu и Cr – V – Mn – Ti. Сочетание элементов, формирующих ассоциации, обусловлено минеральным составом рудного сырья. В нижнем горизонте осадков содержания Au, Ag, Cu, Co, Ni, Pb, Zn, As значительно увеличиваются. Корреляционные связи между элементами меняются. В осадках Артемовской ЗИФ сформированы ассоциации, состоящие из Si-V-Ti, Mg-Fe-Zn-Pb-Mn-Cu-Co и K-Na-Al-Si-Ba-Cr, в осадках Советской ЗИФ Fe – Co – Ni – Cu – Pb – Ba – Ag, As-Mo-Fe-Mg-Al и Cr – V – Mn – Ti. Взаимосвязи элементов в ассоциациях обусловлены присутствием в хвостах вторичных минеральных фаз железа, сульфатов, сульфоарсенатов и слоистых алюмосиликатов.

Минеральный состав лежалых хвостов по результатам рентгенофазового анализа представлен кварцем, полевыми шпатами, слюдисто-гидроslюдистыми выделениями, а также рудными минералами, в составе которых преобладают пирит, пирротин, арсенопирит и вторичные минеральные фазы. Содержание породообразующих минералов в техногенных осадках изменяется от 42,05 % до 60,3%, рудных минералов от 26,4 % до 37,01 %. В хвостах Советской ЗИФ в составе сульфидов преобладает пирит и марказит, содержание которых достигает 20,1 %, реже встречается арсенопирит до 11 %. Доля пирротина и сульфидов меди (халькопирита, ковеллина) незначительная и не превышает 0,3 %. В единичных зернах отмечаются галенит и сфалерит. В хвостах Артемовской ЗИФ преобладают пирит до 15,93 % и пирротин до 20,61 %. Арсенопирит и халькопирит присутствуют в значительно меньшем количестве от 0,1 до 0,5 %. Породообразующие минералы представлены кварцем, обломками сланцев, полевых шпатов и доломита.

Массивы лежалых хвостов неоднородны. Зональное строение обусловлено процессами вторичного преобразования вещественного состава техногенных осадков. Наиболее выражено вторичное преобразование рудных, главным образом, сульфидных минералов.

В верхнем горизонте лежалых хвостов арсенопирит, пирротин, пирит слабо изменены. Вторичные процессы проявлены в основном в виде сколов граней кристаллов и трещиноватости зерен. Кроме этого на поверхности минералов отмечаются локальные пленки гидроксидов железа.

В нижнем горизонте зерна пирита (рис. 5 а, б), пирротина (рис. 5 в) и арсенопирита (рис. 5 г) подвержены достаточно существенному вторичному преобразованию. Как правило, процесс окисления сульфидов начинает развиваться в зонах механического повреждения зерен. На деформированных гранях и плоскостях формируются окисные корочки, которые впоследствии покрывают поверхности минералов целиком. Химический состав окисных корочек отличается заметным увеличением содержания железа и уменьшением серы по отношению к первичным зернам.

На завершающей стадии происходит полное разложение минерала до стадии гидроксида железа, однако с сохранением первоначальной морфологии зерна. Содержание железа в продуктах замещения сульфидов резко доминирует над серой и другими ингредиентами. По зернам халькопирита и арсенопирита, наряду с железистыми вторичными минералами имеет место развитие ковелина и скородита.

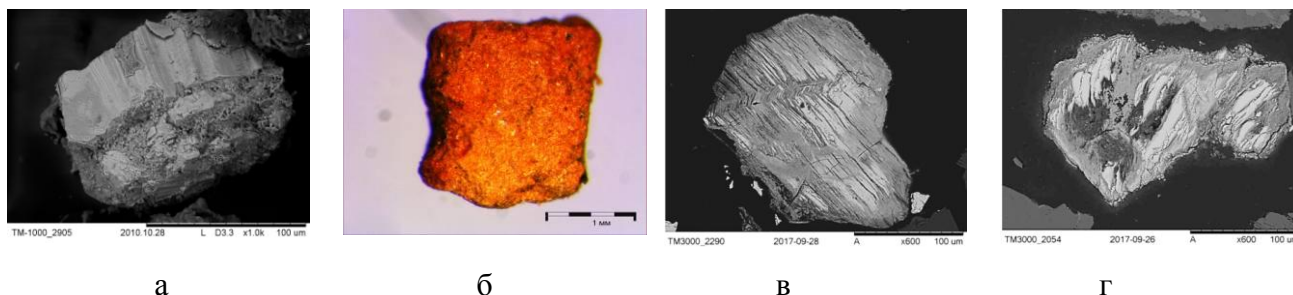


Рис. 5. Вторичные изменения зерен сульфидов в нижнем горизонте лежалых хвостов.

а – разрушение кристалла пирита с замещением его землистым гидрогетитом по деформированным зонам. СЭМ. **б** – псевдоморфоза гидроксидов железа по пириту с сохранением первичной кубической формы. Оптическая микроскопия; **в** – псевдоморфоза гидроксидов железа по пирротину, СЭМ; **г** – псевдоморфоза гидроксидов железа по арсенопириту. СЭМ.

Помимо вторичных минералов группы замещения (псевдоморфоз), широко развиты новообразованные минеральные фазы, в большинстве своем выполняющие роль цементирующей и связывающей массы для обломочного материала лежалых хвостов. В их состав входят самородная сера, гипс, сульфаты, сульфоарсенаты, тонкокристаллические и коллоидные гидроксиды железа, а также аморфные сульфатные и сульфоарсенатные глинисто-железистые и глинисто-карбонатно-железистые образования (рис. 6).

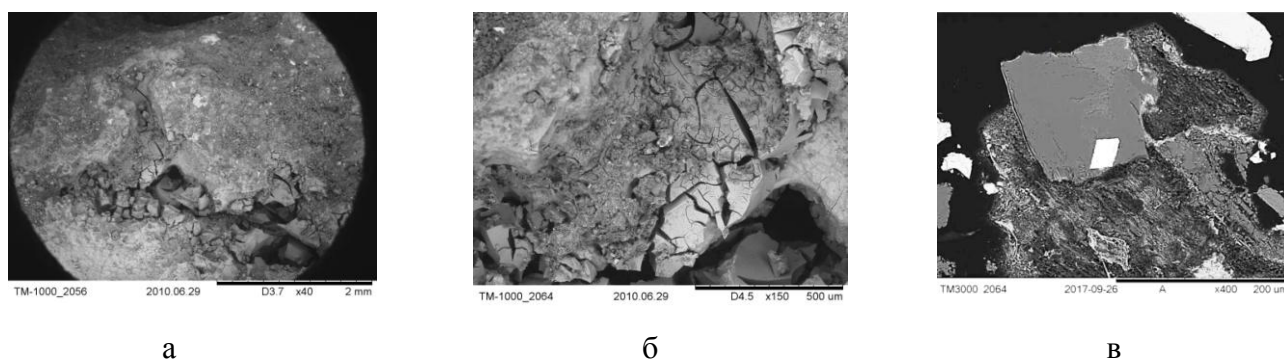


Рис. 6. Натечные коллоидные выделения сульфоарсенатов железа, заполнивших пустоты в нижних горизонтах осадков лежалых хвостов. СЭМ.

а – общий вид; **б** – увеличенный фрагмент; **в** - цементация кристаллов пирротина и псевдоморфозы пирита сульфатами.

В намывных хвостохранилищах железорудных ГОКов, полученных в процессе обогащения скарново-магнетитового рудного сырья, принадлежат к высоко-железистому кремнистому типу и представляют собой кварц-полевошпатовую минеральную массу, вмещающую железорудные минеральные выделения. Химический состав хвостов определяется комплексом литофильных (породообразующих) и рудообразующих компонентов. Главными среди литофильных ингредиентов являются оксид кремния и оксид алюминия, суммарное содержание которых может достигать 50 %. Главным рудным элементом в лежалых хвостах является железо 27,7%. Химический состав осадков по разрезу техногенной толщи изменяется незначительно. Некоторые отличительные особенности проявляются в количественных показателях железа, марганца и кальция. В верхнем горизонте хвостов концентрации этих компонентов выражены более отчетливо, чем в нижнем. Так по содержанию MnO это отношение

выглядит как 1,27 % к 0,53 %, Fe_{общ} 27,7 % к 30,4 %, а CaO 1,74 % к 0,78 %. Вместе с тем содержание закисного железа FeO в хвостах нижнего горизонта возрастает от 2,18 % до 3,55 %, а Fe_{магн.} от 3,89 % до 7,56 %. В соответствии с генетической классификацией Е.В. Склярова грунты верхнего горизонта относятся к кремнисто-высокожелезистому, а нижнего к кремнисто-гипержелезистому типу.

Особенности поведения элементов в разрезе массива хвостов подчеркивают неоднородность состава техногенных отложений. Ряд элементов Ti, V, Co, Cr, Mn, Ni, Pb характеризуется ростом концентраций в нижнем горизонте массива. Элементы As, Cu, Zn распределены равномерно по разрезу с незначительными локальными колебаниями их концентраций. Анализ корреляционных связей элементов между собой также указывает на неоднородность состава техногенной толщи. В верхнем горизонте лежалых хвостов геохимические элементы образуют три ассоциации: Fe – Mn – Ti – V – Cr; As – Cu – Pb – Zn – Ni и Al – Ca – Mg – Cu – Mo. Ассоциация Fe – Mn – Ti – V – Cr обусловлена наличием в верхнем горизонте большого количества рудных железистых оксидных минеральных форм. Ассоциация As – Cu – Pb – Zn – Ni характеризует присутствие в лежалых хвостах сульфидных минералов. Ассоциации Al – Ca – Mg – Cu – Mo отражает специфику порообразующих минеральных форм, главными из которых являются полевые шпаты и слоистые алюмосиликаты.

В нижнем горизонте корреляционные связи между химическими элементами изменяются. Ассоциации Fe – V – Ti – Mn – Co – Ni и Si – Al – Fe – Pb – Ba отражают распределение элементов, обусловленное вторичным преобразованием магнетита и полевого шпата в мартит и аморфные алюмосиликатно-железистые минеральные фазы. Ассоциация Ca – Mg – Mo обусловлена появлением новообразованного кальцита и других карбонатных минералов.

Минеральный состав лежалых хвостов по результатам рентгенофазового анализа представлен кварцем, полевыми шпатами группы альбита - анортита, слоистыми алюмосиликатами хлоритом и мусковитом. Группу рудных минералов составляют магнетит и гематит. Количество порообразующих минералов изменяется от 35,92 % до 36,85 %. Содержание рудных минералов изменяется в пределах от 24,15 до 25,18 %. Вторичные минералы составляют около 39 %.

Лежалые хвосты верхнего горизонта относятся к гематит-магнетит-гетитовому минеральному типу, а нижнего к гетит-гематит-магнетитовому минеральному типу. В верхнем горизонте лежалых хвостов содержание магнетита составляет 10 %, в нижнем – 13 %, преобладают трещиноватые и окисленные формы. Магнетит в верхнем горизонте представлен обломками черного цвета с металлическим блеском и кристаллическими формами в виде октаэдров и ромбододекаэдров. Частицы минерала имеют острые неровные края, свидетельствующие о механическом воздействии при дроблении руды. Поверхность кристаллов большей частью шероховатая, местами пористая, частично покрыта бурой пленкой гидроксидов железа. Форма, размер пор и трещин разнообразны. Иногда прослеживается система паутинообразных, разно ориентированных трещин толщиной менее 1 мкм. Повсеместно в полостях и трещинах отмечается повышенное содержание кремния и алюминия, что связано с присутствием в них слоистых алюмосиликатов. Результаты исследования химического состава магнетита микронзондовым анализом показали высокое содержание в нем железа 82,96 %. В значительно меньшем количестве отмечаются алюминий, кремний, титан.

Магнетит неравномерно гематитизирован. Начало процесса замещения хорошо проявляется на поверхности зерен, где гематит формирует каймы, пленки и корочки. Центральная часть магнетита, как правило, остается неизменной. На последующих стадиях гематит проникает внутрь магнетитовых зерен, преимущественно вдоль трещин и плоскостей октаэдрической спайности. На заключительных стадиях преобразования магнетит практически полностью замещается гематитом, гетитом и гидрогетитом с сохранением контура первичных зерен. В химическом составе кайм и корочек гематита (полиминерального образованного агрегата) преобладает железо 73,4 %. В подчиненном количестве отмечаются медь 4,6 %, титан 2,1 %.

В нижнем горизонте лежалые хвосты относятся к гетит-гематит-магнетитовому минеральному типу. Вторичное преобразование магнетита развито более интенсивно. Для нижнего горизонта более всего характерны субкристаллические выделения и мартитизированные зерна. Появление в нижнем горизонте значительной части субкристаллических выделений магнетита связано с высвобождением их из сростков. Наиболее заметно раскрытие магнетита характерно для материала крупностью – 0,25 мм.

Кроме свободных выделений и сростков значительная часть магнетита представлена в виде мелких зерен 0,25 – 0,5 мм агрегированных в комки, внутри которых они сцементированы, материалом пелитовой размерности. Связывающая зерна магнетита аморфная масса представляет собой метаколлоидные соединения гидроксидов железа и алюминия.

Электронно-микроскопическими исследованиями в магнетите выявлены более сложные вторичные структуры, связанные с разрушением внутренних частей зерен и образованием характерной скелетной решетки. Структуры распада чаще всего отражают направления октаэдрической отдельности магнетита, реже ориентированы субпараллельно плоскостям микроблоков (рис. 7 а, б). Отчетливо особенности распада магнетита проявляются в энергодисперсионном спектре (рис. 7 в, г). Нередко структуры распада приводят к формированию трещин, способствующих раскалыванию минерала на микроблоки, в составе которых наряду с железом проявляются повышенные концентрации Mn, Ti.

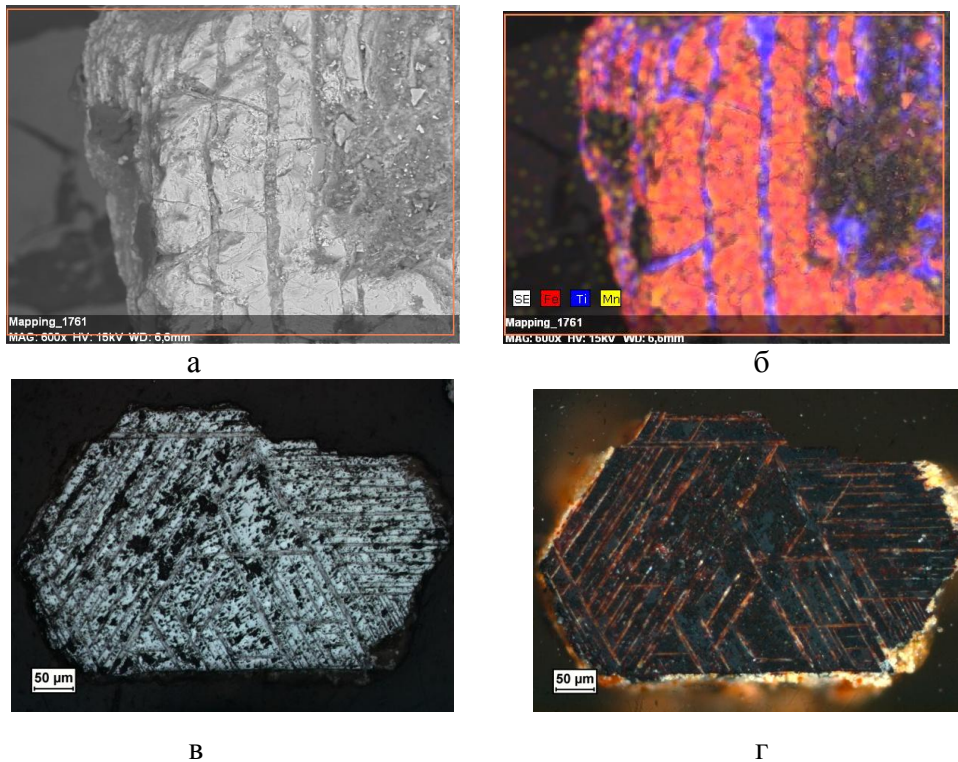


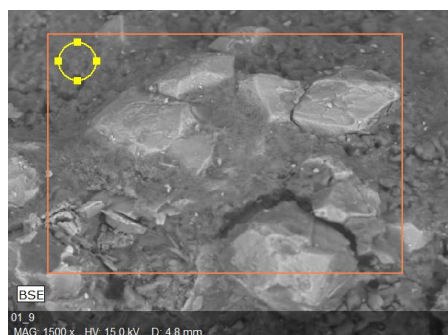
Рис. 7. Сетчатые и решетчатые структуры распада магнетита.

а, б – карта распределения Fe, Mn, Ti в решетчатых структурах распада магнетита;

в – структуры распада магнетит в отраженном свете, николи скрещены; **г** – структуры распада магнетита в энергодисперсионном спектре.

В нижнем горизонте широко развиты железистые минеральные фазы гетита, гриналита и ферроактинолита. Вторичные слоистые алюмосиликаты зарегистрированы в виде каолинита и монтмориллонита. Представлены на 9,8 % гетитом, гидроксидами железа, а также натечными и скрытокристаллическими формами гематита. В меньшем количестве присутствует гриналит до 1,6 % и ферроактинолит до 1,2 %. Кроме минеральных форм железа в осадках идентифицируются глинистые минеральные фазы до 8 % и рентгеноаморфные железистые выделения до 12,4 %, а также образования вторичного оксида урана.

В нижнем горизонте развиты характерные линзовидные образования, состоящие из рентгеноаморфной глинисто-железистой минеральной фазы бурого цвета. Как показали исследования, проведенные с помощью больших увеличений, глинисто-железистая масса вмещает в себя обломки кварца, измененных полевых шпатов, разрушенных в разной степени минеральных форм магнетита и гематита (рис. 8). Связывающая обломочный материал рентгеноаморфная фаза представляет собой метаколлоидные (колломорфоподобные), тонкодисперсные агрегативные образования, состоящие из соединений гидроксидов железа и алюминия. В их химическом составе наряду с высоким содержанием железа и алюминия присутствует кальций.



Spectrum: Point

Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Iron	26	K-series	39,64	19,39
Oxygen	8	K-series	31,60	53,94
Silicon	14	K-series	13,07	12,70
Aluminium	13	K-series	11,77	11,92
Titanium	22	K-series	1,55	0,88
Manganese	25	K-series	1,45	0,72
Cobalt	27	K-series	0,61	0,28
Vanadium	23	K-series	0,30	0,16
Total:			100,00	100,00

Рис.8. Химический состав аморфной глинисто-железистой массы, цементирующей обломочный материал хвостов. СЭМ, изображение в обратно рассеянных электронах, с результатами энергодисперсионного микроанализа.

Второе защищаемое положение.

Водоносная система в намывных накопителях сформирована из поверхностных технических вод (пульпа и осветленные воды прудов отстойников) и вод техногенного водоносного горизонта, обогащённых токсичными веществами в результате деструкции минеральной фазы нижнего горизонта.

Комплекс техногенных вод в намывных накопителях включает в себя технические поверхностные воды и техногенный водоносный горизонт (рис. 9). Технические поверхностные воды формируются жидкой фазой пульпы и концентрируются в виде осветленных вод в границах прудов отстойников. Образование техногенного водоносного горизонта связано с фильтрацией технических вод из прудов отстойников через толщу техногенных осадков в придонную часть промнакопителей. При достижении фильтратом водоупорных отложений или горных пород, подстилающих днище промышленных бассейнов, формируются воды, постоянно циркулирующие в нижних горизонтах техногенных отложений в пределах всей площади технических сооружений.

Технические поверхностные воды и воды техногенного водоносного горизонта отличаются друг от друга по химическому составу, минерализации и показателю pH. Химическую спецификацию водной среды определяют катионы кальция, магния, натрия, калия, железа, а также анионы сульфатов, гидрокарбонатов, хлора. Технические поверхностные воды по химическому составу тесно связаны с жидкой фазой пульпы, формирование которой обусловлено технологическими водами, используемыми в производственном процессе. На качество воды техногенного водоносного горизонта существенное влияние оказывают процессы вторичного преобразования минерального состава техногенных осадков, залегающих в нижнем горизонте лежалых хвостов.

Распределение микроэлементов в техногенных водах подчеркивает неоднородность состава технических поверхностных вод и вод техногенного водоносного горизонта, как по содержанию в них малых элементов, так и по корреляционным связям элементов между собой. Отмечается четкая сопряженность максимальных концентраций водорастворимых форм основных ингредиентов с границами залегания нижних горизонтов отложений в техногенных

массивах. Наличие постоянно действующего напора техногенных вод в придонной части накопителей создает условия слабого водообмена. Застойный режим способствует формированию долговременных стабильных условий взаимодействия техногенных осадков с водами техногенного водоносного горизонта в системе «техногенные осадки — поровые растворы». Процессы гидролиза сопровождаются высвобождением из минеральных комплексов в поровые растворы химических элементов и соединений, способных активно влиять на состав водной фазы. Под влиянием поровых растворов увеличение содержания элементов в водной среде может быть достаточно ощутимым, что существенным образом проявляется не только в изменении химической формулы вод техногенного водоносного горизонта, но и в смене корреляционных связей между элементами.



Рис. 9. Компоненты, формирующие техногенный водоносный комплекс в намывных накопителях промышленных отходов.

а – сброс пульпы в хвостохранилище Краснокаменского ГОКа; **б, в** – вскрытый уровень залегания техногенного водоносного горизонта в нижней зоне массива техногенных осадков на золоотвале Красноярской ГРЭС-2 (**б**) и Лучегорской ГРЭС (Приморский край) (**в**).

В золоотвалах функционируют два типа разных по составу техногенных вод.

Поверхностные воды прудов отстойников в золоотвалах относятся к пресным. В химическом составе в значительных концентрациях присутствуют гидрокарбонаты, сульфаты, хлориды и другие компоненты. Концентрация гидрокарбонатов находится на уровне 177,5 – 210,2 мг/л, хлоридов 61 – 83,5 мг/л, сульфатов 42,5 – 91,3 мг/л, катионов кальция 45,8 – 140,3 мг/л, катионов натрия и калия 67,1 – 167,2 мг/л, железа 0,32 – 0,54 мг/л. Количественные показатели основных ионов и катионов в водах пруда отстойника слабо отличаются от их содержания в водной фазе золотой пульпы, где концентрация гидрокарбонатов составляет 80,6 – 121,2 мг/л, хлоридов 52,9 – 98,1 мг/л, сульфатов 51,8 – 84,4 мг/л, натрия и калия в сумме 52,4 – 194,3 мг/л, кальция 49,2 – 128,1 мг/л, магния 0,9 – 2,1 мг/л, железа 0,29 – 0,54 мг/л. В соответствии с классификацией Курлова воды пульпы и пруда отстойника близки по составу, являются пресными с показателем минерализации 0,45 – 0,69 мг/л, относятся к хлоридно-гидрокарбонатному натриево-кальциевому типу, имеют щелочную среду с показателем pH 9,3 – 9,5 ед.

Воды техногенного водоносного горизонта отличаются от технических поверхностных вод. Содержание карбонатов в них по сравнению с водами пруда отстойника увеличивается до 2556 мг/л. Повышаются концентрации натрия от 167 мг/л до 1723 мг/л, кальция от 140,3 мг/л до 559 мг/л, железа от 0,3 мг/л до 7,3 мг/л. Вместе с тем уменьшаются содержания хлора в 2 - 3 раза и сульфатов от 91,3 мг/л до 13,5 мг/л. Водная среда из щелочной переходит в высоко-щелочную с показателем pH 12,6 ед. Химическая формула воды по классификации Курлова сдвигается к гидрокарбонатно-кальциево-натриевому или гидрокарбонатно-натриевому типу. Отмечается повышение минерализации до 4,6 г/л, воды переходят в разряд солоноватых или соленых.

Изменение химического состава техногенных вод, циркулирующих в нижних горизонтах осадочных толщ золоотвалов, происходит в результате их активного взаимодействия с техногенными осадками. Большую роль при этом играют растворенные соли и углекислота CO₂. Химический состав вод обусловлен высвобождением кальция и натрия при преобразовании карбонатов и алюмосиликатов в нижнем горизонте золотых массивов.

Распределение микроэлементов в техногенных водах золоотвалов также подчеркивает отличие состава технических поверхностных вод и вод техногенного водоносного горизонта. Воды различаются как по содержанию в них малых элементов, так и по корреляционным связям элементов между собой.

В технических поверхностных водах установлены две основные ассоциации химических элементов. Ассоциации Ca-Cu-Ba-Sr и V-Mn-Co-Ni-Mo-Li-Al имеют среднюю корреляционную связь между элементами. В воде техногенного водоносного горизонта выявлены три ассоциации химических элементов. Первая ассоциация представлена Ca-Mg-Co-Ni-Cu, вторая – Na-Al-Ba-Sr-Pb, третья – Fe-Mn-V-Cr. Изменения корреляционных связей между элементами в техногенных водах и различия в их содержании объясняются существенным влиянием на водную среду поровых растворов, высачивающихся из золовых осадочных толщ. В пробах поровых растворов, отобранных из нижних горизонтов золовых осадков, увеличивается содержания Ba, Sr, Cr, Ti, V, Mn, Cu, Pb, Zn. Отмечается четкая сопряженность максимальных концентраций водорастворимых форм Ba, Sr, Cr, Ti, V, Mn, Cu, Pb, Zn с границами залегания вод техногенного водоносного горизонта. Концентрация Sr возрастает от 30 до 130 мг/кг, Ba от 0,1 до 1,5 мг/кг, Cr от 0,1 до 0,3 мг/кг, Ti от 0,1 до 7,5 мг/кг, V, Pb, Zn и Cu от 0,1 до 0,3 мг/кг, Mn от 0,001 до 0,02 мг/кг.

Химическую специфику водной среды хвостохранилищ золотоизвлекающих фабрик определяют сульфаты, гидрокарбонаты, натрий, калий, кальций, магний и железо.

В технических поверхностных водах концентрация гидрокарбонатов HCO_3^- находится на уровне 198,2 – 200 мг/л, сульфатов меняется от 116,3 до 154 мг/л, хлоридов от 1,67 до 4,26 мг/л. Из катионов преобладает кальций. В хвостохранилище Советской ЗИФ его содержание составляет 112,16 мг/л, в хвостохранилище Артемовской ЗИФ 71,45 мг/л. Показатели магния сопоставимы между собой и изменяются от 29,6 до 41,18 мг/л. Обращает на себя внимание довольно низкое присутствие железа в осветленных водах хвостохранилищ от 0,14 до 0,083 мг/л.

По классификации Курлова технические поверхностные воды пресные, уровень минерализации 0,45 мг/л. Относятся к сульфатно-гидрокарбонатному магниевом-кальциевому типу с нейтральным показателем pH, равным 6,95 – 7,6 ед. По составу воды прудов отстойников сопоставимы с водной фазой пульпы.

В водах техногенного водоносного горизонта концентрация гидрокарбонатов по сравнению с водами пруда отстойника заметно снижается. В хвостохранилище Советской ЗИФ уровень их содержания не превышает 10 мг/л, а в Артемовской ЗИФ 124 мг/л. На фоне падения показателей гидрокарбонатов наблюдается рост сульфатной составляющей: в хвостохранилище Советской ЗИФ от 116,30 до 2135 мг/л, в хвостохранилище Артемовской ЗИФ от 154 до 659 мг/л. Также заметно увеличиваются концентрации кальция от 112,16 до 498,06 мг/л, магния от 41,18 до 127 мг/л и железа до 124,34 мг/л.

Химические параметры водной среды, рассчитанные по формуле Курлова, позволяют отнести воды техногенного водоносного горизонта к соленым или солоноватым сульфатно-кальциевому типу. Значения показателя pH от 2,8 до 4,1 ед. свидетельствуют о кислом состоянии водной фазы. Изменение химической формулы техногенных вод, циркулирующих в нижних горизонтах массивов лежалых хвостов, происходит в результате преобразования рудных, главным образом сульфидных минералов. Экспериментальными исследованиями Д.В.Макарова показано, что активное разложение сульфидов в увлажненных горнопромышленных отходах может происходить в условиях ограниченного доступа атмосферного кислорода. Большую роль при этом играют растворенные соли и серная кислота. Исследованиями Mosesm Nordstrom, Л.П. Листовой, Г.П. Бондаренко, С.С. Смирнова доказано, что образовавшаяся серная кислота также способна участвовать в качестве самостоятельного окислителя и расходоваться на разрушение первичных минералов. Извлекая из минеральных форм катионы, серная кислота впоследствии связывает их в металлы.

Качественное отличие технических поверхностных вод и вод техногенного водоносного горизонта проявляется и в корреляционных связях микроэлементов. В поверхностных водах установлены три ассоциации элементов. Ассоциации SO_4^- – Cu – Co – Ni – Pb – Cd и Zn-As характеризуют технологический процесс, сопряженный с вскрытием сульфидов, в результате

которого в технологические воды из сульфидов железа высвобождается часть халькофильных элементов и вместе с пульпой в растворенном виде поступает в хранилище отходов. Третья ассоциация представлена средней корреляционной связью между черными металлами Cr – Mn – V – Ti.

В воде техногенного водоносного горизонта элементный состав ассоциаций меняется за исключением группы черных металлов. Ассоциации принимают вид: Fe – As – Co – Ni – Cu, Zn – Cd – Pb и Cr – Mn – V – Ti. Ассоциации Fe – As – Co – Ni – Cu и Zn – Cd – Pb являются производными процессов разрушения сульфидных минералов пирита, пирротина, арсенопирита, галенита и сфалерита. При вторичном преобразовании сульфидов из пирита, пирротина, арсенопирита высвобождается целый ряд халькофильных элементов, а также сера, мышьяк и железо. На активное выщелачивание Fe, As, Zn, Ni, Co, Cu, Cd, Pb из сульфидных минеральных форм указывает существенный рост их концентраций в поровых растворах из техногенных осадков нижнего горизонта массивов лежалых хвостов, где доля водорастворимых форм возрастает: As от 0,1 до 635 мг/кг, Co от 0,023 до 5,8 мг/кг, Ni от 0,053 до 9,43 мг/кг, Cu 0,005 до 8,55 мг/кг, Zn от 0,024 до 50,5 мг/кг.

Химическую специфику водной среды хвостохранилищ железорудных ГОКов определяют сульфаты, гидрокарбонаты, катионов кальция, бария, стронция, натрия, железа и марганца. В составе технических поверхностных вод хвостохранилищ (воды пруда отстойника) присутствуют гидрокарбонаты 54,82 мг/л, сульфаты 6,25 мг/л, хлориды 3,46 мг/л. Из катионов в наибольшей концентрации установлен кальций 15,35 мг/л, в меньшей натрий 3,13 мг/л и магний 2,43 мг/л. Железо представлено в минимальном количестве на уровне 0,53 мг/л. По классификации Курлова технические поверхностные воды являются ультрапресными с показателем минерализации 0,09 г/л, относятся к гидрокарбонатному кальциево-магниевому типу с показателем рН, равным 7,75 ед. Химический состав вод сопоставим с составом жидкой фазы пульпы.

Химический состав вод техногенного водоносного горизонта отличается от поверхностных вод. Содержание гидрокарбонатов увеличено в пять раз и достигает 277 мг/л. Концентрации кальция возрастает в четыре раза до 43,1 мг/л. Однако, максимальное увеличение содержания характерно для железа. Концентрация металла в техногенном водоносном горизонте достигает 69 мг/л. Содержания хлоридов, сульфатов, натрия и магния существенно не меняются. Химические параметры водной среды, рассчитанные по формуле Курлова, свидетельствуют о смещении химического состава вод к пресному гидрокарбонатно-кальциевому типу с высоким содержанием железа. Значение показателя рН составило 6,5 ед., а минерализации 0,39 г/л

Железистый гидрокарбонатно-кальциевый тип вод формируется в восстановительной глеевой обстановке. Согласно исследованиям С.Р. Крайнова, С.Л. Шварцева и др. практически все подземные воды, залегающие ниже зоны окислительной геохимической обстановки, обогащены кальцием и железом. В водах данного геохимического типа наблюдается рост содержания гидрокарбонатов, кальция и железа, а ионы хлора, натрия и калия имеют подчиненное значение. По мнению С.Л. Шварцева рост водорастворимых форм гидрокарбоната кальция и железа является результатом определенной стадии эволюционного развития системы «вода — алюмосиликаты». Неравновесное состояние воды приводит к растворению алюмосиликатов с переводом в раствор Ca и HCO_3^- .

Отличие технических поверхностных вод и вод техногенного водоносного горизонта также выражено в корреляционных связях химических элементов. Ассоциации поверхностных вод представлены Cu – Co – Ni – Pb – Cd и Fe – Mn – K – Al – Ba. Связь элементов между собой обусловлена составом технологических вод, сбрасываемых по пульпопроводу в хвостохранилище.

В воде техногенного водоносного горизонта установлены четыре ассоциации. Ассоциация Fe – Mn характеризует поступление в водные растворы элементов высвободившихся в процессе мартитизации магнетита. Вторая ассоциация Ca – Mg – Na – Sr – U – Ba обусловлена процессами дезинтеграции алюмосиликатов. Третья ассоциация представлена Cu – Co – Ni – Zn – Pb. Полученное сочетание элементов является производной процессов разложения сульфидов

железа, присутствующих в лежалых хвостах. Четвертая ассоциация объединяет Cr – V – Ti. Элементы внутри группы отражают устойчивую связь, характеризуя единую форму поведения элементов в процессе преобразования железорудных минералов.

Из лежалых хвостов, залегающих в нижней части разреза техногенной толщи, происходит активное выщелачивание в поровые растворы целого комплекса: доля Fe достигает 25 мг/кг, Ca 59 мг/кг, Mn 4,45 мг/кг, Ba 0,5 мг/кг, Sr 0,5 мг/кг.

Третье защищаемое положение.

Техногенный водоносный горизонт является источником загрязнителей, которые в составе фильтрата поступают в природные водотоки. Масштаб распространения ионов токсичных веществ из техногенного фильтрата зависит от интенсивности действия геохимических барьеров: окислительного (атмосферного), где происходит их выпадение в составе новообразованных кристаллических минеральных фаз и сорбционного (природный водоток), где поллютанты аккумулируются новообразованными аморфными минеральными фазами в илстых фракциях речных осадков.

1. Специфика формирования техногенного фильтрата внутри намывных накопителей горнопромышленных отходов

По химическому составу фильтрационные растворы сопоставимы с водами техногенных водоносных горизонтов, залегающими в придонной части золоотвалов и хвостохранищ. Природа этой связи носит генетический смысл и определяет механизм зависимости экологической опасности фильтрата от концентрации и водной подвижности токсичных ингредиентов, присутствующих в составе техногенных вод.

В химическом составе фильтрата техногенных вод из золоотвалов ТЭЦ высокий уровень содержания характерен для карбонат-иона от 601 до 861 мг/л. Концентрация хлоридов не превышает 18 мг/л, а сульфат-иона 12,5 мг/л. Из катионов в наибольшей концентрации присутствуют натрий 560,5 мг/л и кальций 65,00 мг/л. Содержание железа находится на уровне 1,6 мг/л. Воды фильтрата минерализованы и характеризуются слабощелочной и щелочной реакцией с показателем рН от 9,4 до 10 ед. По своему составу техногенный фильтрат в целом, сопоставим с химическим составом вод техногенного водоносного горизонта, циркулирующего в золоотвалах. Между тем при их сравнении следует обратить внимание на то, что концентрация кальция в воде техногенного водоносного горизонта достаточно высокая до 559 мг/л, а в фильтрате падает до 41 мг/л.

В фильтрате из микрокомпонентов доминируют калий от 62 до 64 мг/л, стронций от 14 до 29 мг/л, барий от 1,4 до 3,1 мг/л и алюминий от 0,7 до 1,4 мг/л. В интервале концентраций 0,01 – 0,1 мг/л установлены марганец, титан, цинк. В пределах от 0,001 до 0,01 мг/л содержатся хром, медь, литий, молибден, никель, ванадий. В концентрациях 0,0001 – 0,001 мг/л обнаружены кобальт и свинец. Миграционная активность микрокомпонентов, формирующих фильтрационный раствор, оценена по числовым показателям коэффициента геохимической подвижности К_п. Ряд подвижности, по мере убывания, выглядит следующим образом: высокоподвижным элементом является Na, подвижными Sr, K, Ba, слабоподвижными Mo, Mg, Cu, Zn.

Состав фильтрата техногенных вод из хвостохранилищ ЗИФ характеризуется высоким содержанием сульфатов от 375 до 1410 мг/л. Концентрация гидрокарбонатов изменяется от 15 до 181 мг/л, хлоридов не превышает 1,75 мг/л. Среди катионов преобладают кальций и магний, максимальное содержание которых составляет 370 мг/л и 66,53 мг/л соответственно. Концентрация железа незначительна от 0,53 до 68,17 мг/л. Воды минерализованы и имеют кислый показатель рН от 3,8 до 4,3 ед. Установленные параметры указывают на сульфатно-кальциевый, солоноватый или пресный тип фильтрационного раствора. По особенностям химического состава раствор фильтрата сопоставим с водой техногенного водоносного горизонта, залегающего в хвостохранилищах. По отдельным ингредиентам отмечается ряд различий. Содержание сульфатов, кальция и магния в фильтрате несколько ниже, чем в

техногенном водоносном горизонте. Содержание железа в воде техногенного водоносного горизонта хвостохранилища Советской ЗИФ весьма значительное, достигает 124,34 мг/л, а в фильтрате уменьшается до 68,13 мг/л. В техногенных водах хвостохранилища Артемовской ЗИФ концентрация железа 5,94 мг/л, в фильтрате 0,53 мг/л.

Дренаж из подошвы дамбы хвостохранилища Советской ЗИФ характеризуется высокими концентрациями As 21,4 мг/л, Mn 19,39 мг/л, Zn 3,26 мг/л, Ni 1,86 мг/л, Co 1,21 мг/л, Cu 0,51 мг/л, Ti 0,26 мг/л. В интервале концентраций 0,01 – 0,1 мг/л присутствует барий, свинец. В пределах от 0,001 до 0,01 мг/л содержатся кадмий, хром, ванадий. В фильтрате из хвостохранилища Артемовской ЗИФ доминирует марганец 2,5 мг/л. В интервале концентраций 0,01 – 0,1 мг/л установлены мышьяк, барий, хром, медь, свинец, титан, цинк. Содержание кобальта, никеля, ванадия, молибдена менее 0,01 мг/л. Геохимическая подвижность микрокомпонентов в фильтрационном растворе, выраженная через показатели коэффициента K_p , выглядит следующим образом: к высокоподвижным относятся Ca, Mg, к подвижным Na, Mn, Ni, Co, к слабоподвижным Zn, Cd, Cu, As, Fe.

Химический состав фильтрата техногенных вод из хвостохранилища Краснокаменского ГОКа представлен высоким содержанием гидрокарбонат-иона 151,56 мг/л, сульфат-иона не превышает 49,5 мг/л, а хлоридов 3,86 мг/л. Из катионов в наибольшей концентрации находятся кальций 42,1 мг/л и железо 13,5 мг/л. Натрий не превышает 8,64 мг/л. Воды фильтрата слабо минерализованы и имеют нейтральный показатель pH.

Химический состав техногенного фильтрата по основным параметрам сопоставим с водами техногенного водоносного горизонта, залегающими в основании хвостохранилища. Отличия в балансовом составе химических веществ сводятся к тому, что в фильтрационном растворе уменьшены концентрации гидрокарбонатов и железа, но отчетливо выражено повышение сульфатов. Доминируют следующие ингредиенты: железо 13,5 мг/л, марганец 0,85 мг/л, алюминий 0,6 мг/л, стронций 0,11 мг/л, барий 0,034 мг/л, титан 0,085 мг/л. В интервале концентраций 0,001 – 0,01 мг/л установлены медь, цинк, хром, молибден, никель, кобальт, ванадий. В концентрациях 0,0001 – 0,001 мг/л обнаружены свинец, кадмий, уран. Геохимическая подвижность микрокомпонентов в фильтрационном растворе, выраженная через показатели коэффициента K_p , выглядит следующим образом: группу подвижных образуют Ca, Na, Mg, Mn, Sr, слабо подвижных Cu, Fe, Ti, Ni, Zn, V, Co, инертных Al, Cr, Mo, Ba, U.

На формирование химического состава техногенного фильтрата существенное влияние оказывают процессы, развивающиеся в системе "техногенный водоносный горизонт — техногенные осадки". Производными этой связи являются дезинтеграция и растворение минеральных форм и комплексов, а также вторичное минералообразование. Процессы, выраженные через нестабильность кислотно-щелочного потенциала, равно как и окислительной, глеевой и восстановительной обстановки, определяют геохимическое состояние водной среды внутри промакопителей и контролируют подвижность каждого ингредиента вплоть до осаждения их в новообразованных вторичных минеральных фазах.

Выпадающие из растворов вторичные минералы, большей частью проявляющиеся в виде аморфных и микрокристаллических форм, существенно снижают миграционную активность большинства ингредиентов. К данной группе относятся минеральные ассоциации цементации обломочного материала и заполнения пустот в осадках техногенных массивов. Вторичные минеральные новообразования при формировании своей структуры способны захватывать не образующие собственных минеральных форм рассеянные элементы, а также сорбировать их на своей поверхности.

В золоотвалах основными вторичными минеральными выделениями этого вида являются гипс, кальцит, гидросульфокарбосиликат кальция – таумассит, аморфная карбонатная масса. Минеральный состав хлопьев определен фазовым рентгеноструктурным анализом. Хлопья гипса представляют собой агрегаты микрокристаллической игольчатой формы. Размеры игольчатых кристаллов разнообразны, ориентация бессистемная. Химический состав гипса отличается высоким содержанием кальция, серы, алюминия и углерода. В подчиненном количестве присутствуют кремний, натрий, никель, стронций.

В хлопьевидной массе совместно с игольчатыми кристаллами гипса, присутствуют кальцит, таумассит, эттрингит в виде хлопьевидных и тонкокристаллических выделений заполняют пустоты и трещины в теле осадочного массива, аккумулируя Ca, Al, Fe, Zn, S, U. В хлопьевидных массах также идентифицируются многочисленные розеточные формы микрокристаллических агрегатов барита. Микронзондовым анализом в его составе установлены высокие концентрации бария, кальция, серы и углерода, в меньшей степени присутствуют никель и алюминий

Особенностью аморфной карбонатной массы является ее цементирующее свойство. Вторичные минеральные образования буквально пропитывают золотые осадки, цементируя стеклофазу, кварц, железистые и алюмосиликатные глобулы. Отличительной чертой химического состава как аморфных фаз, так и микрокристаллических агрегатов является присутствие в большом количестве кальция, углерода, кремния, алюминия и железа. Содержание железа может варьировать от 5 % до 27 %, а алюминия от 3 до 5 %. В подчиненном количестве фиксируется натрий, магний, сера, стронций, титан, кобальт, хром (рис. 10 а). Примечательно, что в аморфной карбонатной массе также присутствуют вторичные микрокристаллические агрегаты барита, содержащие в своем составе серу, титан, стронций, медь, свинец, алюминий, магний.

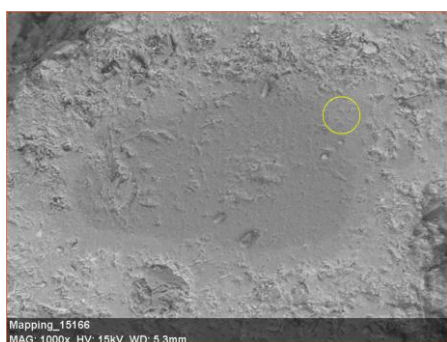
При выпадении из растворов вторичные карбонатные минералы захватывают и сорбируют широкий спектр микрокомпонентов. Причем, применяя метод поэлементного спектрального сканирования поверхности новообразованных минералов, можно увидеть некую избирательность в сорбции микрокомпонентов. Так для барита характерна сорбция ванадия, свинца, серы. В кальците сорбируются углерод, магний, медь, стронций, уран (рис. 10 б).



Spectrum: Point

Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Calcium	20	K-series	35,91	26,54
Iron	26	K-series	27,57	14,62
Oxygen	8	K-series	17,40	32,22
Silicon	14	K-series	5,92	6,24
Carbon	6	K-series	5,33	13,15
Aluminium	13	K-series	3,10	3,40
Magnesium	12	K-series	1,63	1,99
Cobalt	27	K-series	1,33	0,67
Titanium	22	K-series	0,97	0,60
Chromium	24	K-series	0,55	0,31
Sulfur	16	K-series	0,29	0,27
Total:			100,00	100,00

a



Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Oxygen	8	K-series	43,78	61,40
Silicon	14	K-series	18,04	14,42
Aluminium	13	K-series	17,67	14,70
Calcium	20	K-series	9,91	5,55
Zinc	30	K-series	3,38	1,16
Copper	29	K-series	1,58	0,56
Uranium	92	M-series	1,36	0,13
Potassium	19	K-series	1,21	0,69
Cobalt	27	K-series	0,87	0,33
Iron	26	K-series	0,73	0,29
Magnesium	12	K-series	0,58	0,53
Barium	56	L-series	0,46	0,08
Nickel	28	K-series	0,43	0,12
Total:			100,00	100,00

б

Рис. 10. Химический состав новообразованных аморфных землистых (а) и метаколлоидных (б) глинисто-карбонатных масс. СЭМ, изображение в обратно рассеянных электронах, с результатами энергодисперсионного микроанализа.

В хвостохранилищах ЗИФ группу вторичных минералов формируют различные модификации сульфоселенатов железа питтицит, туэлит, сармиентит, зикаит, аморфные

гидроксиды железа, глинисто-сульфатно-карбонатные образования, а также барит, гипс, самородная сера, гетит.

Вторичные минеральные фазы железа и сульфоарсенатов железа в большей мере развиты в придонной части массивов лежалых хвостов. Морфологические особенности минеральных выделений свидетельствуют о ведущей роли коллоидных растворов в их происхождении.

На рисунке 11 представлена коллоидная натечная вторичная минеральная фаза. Медленно мигрирующие коллоидные растворы обволакивают минеральные образования, а затем, теряя испаряющуюся в полое пространство воду (дисперсионную среду), густеют и выпадают в осадок в виде аморфной либо микрокристаллической массы. В зависимости от количества потерянной воды и степени пересыщения исходного раствора поверхность минерального вещества покрывается трещинами усыхания либо растрескивается на блоки, края которых отличаются специфическим раковистым изломом.

Помимо коллоидных натечных минеральных выделений также широко развиты губчатые, почковидные, дендровидные формы и микроглобулы, покрывающие поверхность обломочного материала лежалых хвостов. Отдельные глобулы представляют собой практически идеально округлые оолиты, тесно сросшиеся между собой. В ряде случаев губчатые микроглобулярные минеральные выделения выполняют роль цемента, в котором находятся обломки горных пород, кварца и сульфидов. По результатам микрозондового анализа установлено, что состав натечных сульфоарсенатных форм характеризуется высокими содержаниями железа от 31,95 до 34,9 % и мышьяка до 15,46 % (рис. 11 а). В меньшем количестве присутствуют сера 0,8 – 1,2 %. В микроглобулярных формах содержание мышьяка увеличивается до 27,26 %, а железа падает до 23,34 % (рис. 11 б). Содержание серы остается на прежнем уровне 1,28 %. В составе всех коллоидных минералов присутствуют тяжелые металлы, главными из которых являются медь, кобальт, никель, цинк, свинец, хром, ванадий

Аморфные гидроксиды железа создают минеральную массу, цементирующую рудные зерна и обломки минералов. Аморфные гидроксиды железа большей частью проявляются в составе цементирующей массы и отличаются высокими значениями содержания железа до 92,1%. Наряду с железом, в их составе может присутствовать алюминий до 2,9 %, марганец до 1,4 %. Содержания других микрокомпонентов не превышают 1 %.

Землистые глинисто-сульфатно-карбонатные образования накапливают Al, S, Ca, Ba, Ti, Zn, Cu и содержат игольчатые и розеточные формы барита и гипса. Гетит представлен в виде корочек из таблитчатых и чешуйчатых разновидностей, покрывающих поверхность минералов. В составе гетита доминирует железо, в подчиненном количестве Al, As, Cu, Ni, Co, Pb, Zn, Cd, Mn Au (Рис. 11 в).

Гипс проявляется в виде игольчатых и таблитчатых кристаллов, размещающихся на агрегатных образованиях вмещающих пород. Самородная сера широко развита в лежалых хвостах. Проявляется в виде корочек желтого цвета, в тесном срастании с гетитом цементирует обломочный материал техногенных отложений. Состав серы моноэлементный, примесей практически нет.

Изложенный материал показывает, что в системе «техногенный водоносный горизонт – фильтр» концентрация элементов и числовые характеристики коэффициентов геохимической подвижности K_p заметно понижаются в фильтрационном растворе. Главную роль в этом процессе играют вторичные минеральные фазы, которые в аморфном или микрокристаллическом виде осаждаются на геохимическом барьере в придонной части хвостохранилищ. Вторичные минеральные новообразования выполняют роль сорбентов для мышьяка, кадмия, цинка, кобальта, никеля, свинца, никеля, меди, золота.

В хвостохранилищах железистых хвостов вторичные минеральные выделения образованы вторичными сульфидами и аморфной железисто-алюмосиликатной минеральной фазой, скрытокристаллическими водными силикатами железа и гидроксидами железа.

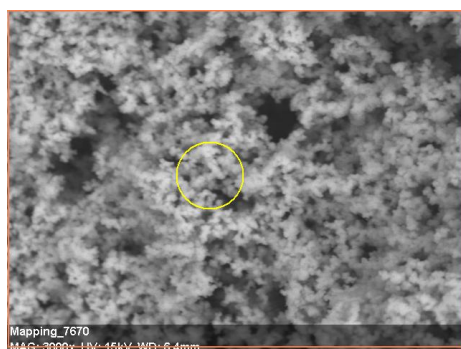
Вторичные железистые сульфиды образует в придонной части массива хвостов и представлены марказитом (FeS_2), а также гидротроиллитом ($FeS \cdot nH_2O$).



Spectrum: Point

Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Oxygen	8	K-series	47,22	75,55
Iron	26	K-series	31,95	14,64
Arsenic	33	L-series	15,08	5,15
Aluminium	13	K-series	2,64	2,50
Cobalt	27	K-series	1,18	0,51
Silicon	14	K-series	1,00	0,91
Sulfur	16	K-series	0,80	0,64
Potassium	19	K-series	0,14	0,09
Total:			100,00	100,00

a



Spectrum: Point

Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Oxygen	8	K-series	39,82	62,86
Arsenic	33	L-series	27,26	9,19
Iron	26	K-series	23,43	10,60
Carbon	6	K-series	7,65	16,09
Sulfur	16	K-series	1,28	1,01
Chromium	24	K-series	0,21	0,10
Cobalt	27	K-series	0,20	0,09
Nickel	28	K-series	0,15	0,07
Total:			100,00	100,00

б



Spectrum: Point

Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Oxygen	8	K-series	40,15	58,36
Iron	26	K-series	21,23	8,84
Silicon	14	K-series	12,05	9,98
Aluminium	13	K-series	10,54	9,09
Arsenic	33	L-series	6,45	2,00
Carbon	6	K-series	4,86	9,41
Potassium	19	K-series	2,38	1,41
Nickel	28	K-series	0,61	0,24
Copper	29	K-series	0,36	0,13
Gold	79	M-series	0,35	0,04
Cobalt	27	K-series	0,33	0,13
Sulfur	16	K-series	0,29	0,21
Zinc	30	K-series	0,22	0,08
Manganese	25	K-series	0,19	0,08
Total:			100,00	100,00

в

Рис. 11. Химический состав коллоидных натечных (а) и микроглобулярных форм сульфоарсенатов железа (б), а также землистых и микрокристаллические агрегатов гетита (в). СЭМ, изображение в обратно рассеянных электронах, с результатами энергодисперсионного микроанализа.

Количество аморфной железисто-алюмосиликатной минеральной фазы довольно значительно. По результатам проведения технологических испытаний крупнообъемных проб на предмет вторичного использования хвостов в промышленном производстве содержание рентгеноаморфной фазы установлено до 23,5 %. Рентгеноаморфная фаза является цементирующим веществом для рудных зерен и агрегатов. Микронзондовым анализом в составе рентгеноаморфной фазы установлено высокое содержание железа 39,64 % и кислорода 31,60 %. В меньших количествах присутствует кремний 13,07 %, алюминий 11,77 %, титан 1,55 %, марганец 1,45 %, а также до 0,5 % кобальт и ванадий (рис. 7).

При проведении рентгенофазового анализа в глинисто-железистой массе удалось установить наличие скрытокристаллического водного силиката железа – гриналита (Fe^{2+} ,

$\text{Fe}^{3+})_2 \cdot 3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. На дифрактограмме железистый минерал представлен в виде дифракционного максимума $d = 7,16 \text{ \AA}$, JCPDS, 45-1353. Гриналит относится к аутигенным железистым хлоритам, широко развитым в осадочных месторождениях железных руд. Минералы образуют землистые массы коричневатого цвета. Гидроксиды железа замещают рудные минералы и содержат Fe, Si, Al, S, As, K, Mg, Ti, Cr.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что падение подвижности микрокомпонентов в системе «техногенный водоносный горизонт - фильтрат техногенных вод» определяется изменением химического состава и окислительно-восстановительных условий водной среды. Вторичные минералы выполняют роль осадителей для большой группы ингредиентов, в результате чего алюминий, титан, хром, молибден, уран из подвижных и слабо подвижных переходят в инертные. Их концентрации в фильтрационном растворе существенно падают.

2. Специфика распространения ионов токсичных веществ из техногенного фильтрата в природные водотоки.

Воздействие на природные водотоки, высачивающегося за пределы промнакопителей техногенного фильтрата, осуществляется в два этапа.

Первый этап связан с разгрузкой техногенных фильтрационных потоков в нейтральные природные воды. Часто фильтрат техногенных вод распространяется в виде гелеобразных субстанций, хорошо заметных в природных водах (рис. 12 а). На участках их взаимодействия формируется встречный геохимический барьер. При нейтрализации фильтрата на береговой зоне водотоков вблизи уреза вод происходит выпадение вторичных новообразованных натечных, коллоидных фаз (рис. 12 б). Выше уреза воды в зоне обезвоживания происходит их кристаллизация в плотные корковидные образования. При больших увеличениях они представляют собой чередование зон свободного роста, хорошо ограненных кристаллических форм кальцита, которые к периферии перекрываются его сплошными микрокристаллическими землистыми новообразованиями (рис. 12 в, г). Отмеченные процессы кристаллизации подчеркивают имеющиеся неоднородности воздействия атмосферного кислорода на коллоидные массы, что приводит к развитию разнокристаллических форм выпадения вторичных минеральных новообразований.

Второй этап воздействия фильтрационных растворов на речные системы, сменяющий этап выпадение минеральных новообразований в прибрежной зоне, напрямую зависит от способности ионных форм элементов в составе смешанных природно-техногенного вод переносится природными водотоками на значительные расстояния. Большую роль при этом играет возможность элементов противостоять процессам сорбции, на которые способны иловые фракции донных отложений.

Особенности взаимодействия фильтрата и природного водотока в системе «золоотвал — природный водоток» рассмотрен на примере золоотвала Красноярской ТЭЦ-3 и р. Черемушка. Золоотвал пойменного типа общей площадью 49 га состоит из двух рабочих секций, пруда осветленной воды и бассейна осветленной воды. В настоящее время воды р. Черемушка выведены в обводное русло, искусственно сооруженное за ограждающей дамбой на расстоянии 10 – 15 м от ее подошвы. Длина руслоотводного канала 1,7 км, средняя глубина – 1,5 м. Двусторонний геохимический барьер отчетливо проявлен в зоне организованного выпуска техногенного фильтрата из трубопровода в русло р. Черемушка.

Первый этап характеризуется взаимодействием высокощелочных фильтрационных растворов с нейтральными водами речного потока. Вдоль береговой линии образуются зернистые корки. Рентгенофазовый анализ минерального состава показал, что среди новообразованных карбонатных минералов преобладает кальцит (CaCO_3 $d = 3,04, 2,096 \text{ \AA}$ JCPDS, 47-1743), в подчиненном количестве присутствуют гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $d = 7,63 \text{ \AA}$ JCPDS 36-432), таумасит ($(\text{CaSiO}_3)(\text{CaCO}_3)(\text{CaSO}_4) \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) и этрингит ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) ($d = 5,58, 3,58, \text{ \AA}$ JCPDS 13-156, 9-414).

Кальцит представлен хорошо выраженными кристаллическими формами (рис. 13 а). Грани кристаллов сглажены, зерна имеют бочонкообразный облик. Аморфные сферолитовые и

шарообразные выделения кальцита присутствуют только в основной массе, цементируя кристаллические формы. Аморфные частицы кальцита явились первичной основой для формирования кристаллов. В условиях свободного роста на береговой зоне р. Черемушка, коагуляционная структура выделений кальцита превращается в кристаллизационную вследствие распада аморфных зародышей на кристаллы и их срастания.

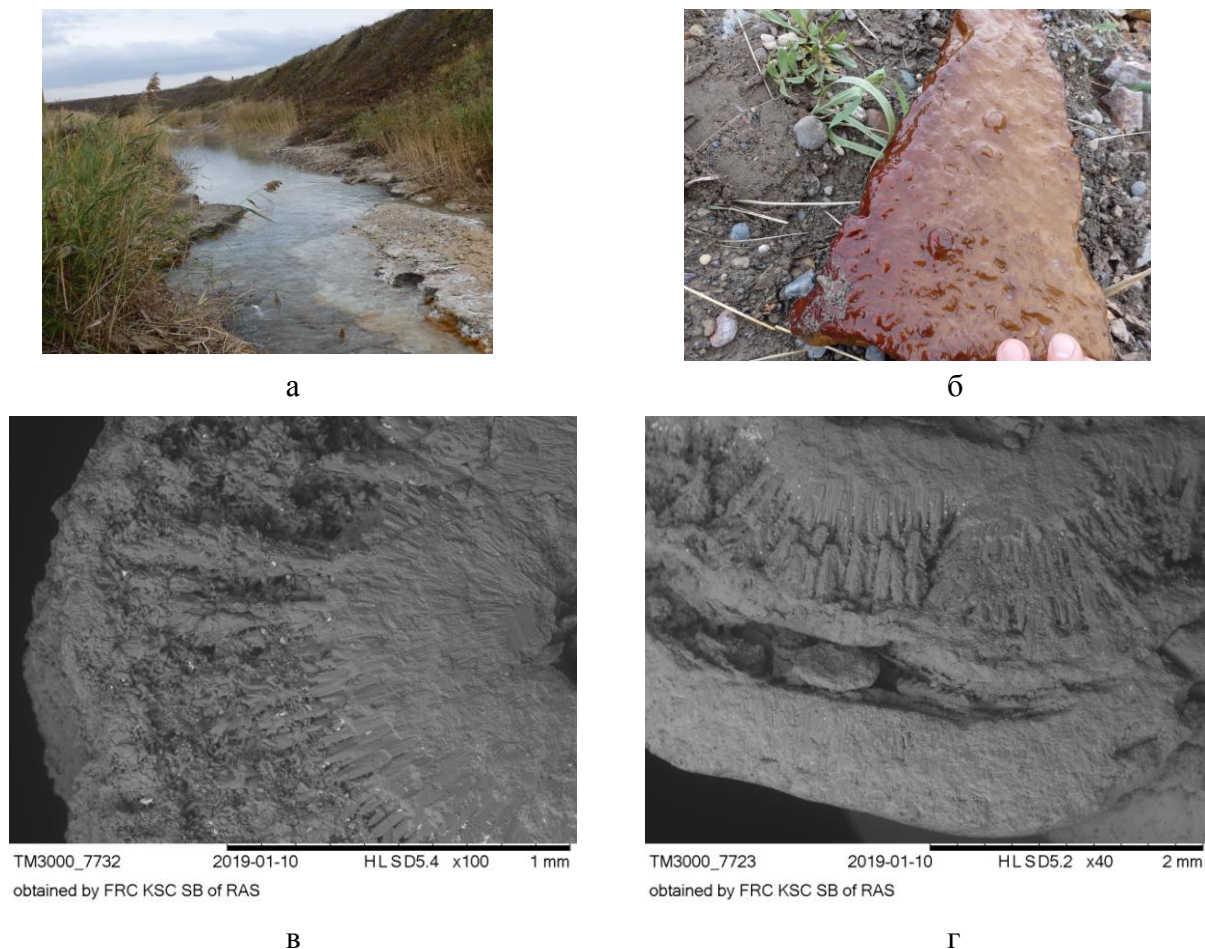


Рис. 12. Особенности взаимодействия техногенного фильтрата с водами природных водотоков на золоотвале Красноярской ТЭЦ-3.

а – гелеобразный техногенный фильтрат в природном водотоке (светло серый) и карбонатные землистые массы (светло коричневые), сформированные выше уреза береговой полосы водотока; б – почковидно-коллоидный морфологический вид гелеобразной субстанции фильтрата в переходной зоне уреза воды и береговой полосы водотока; в, г – особенности строения обезвоженных атмосферными процессами коллоидных выделений из зоны выше уреза воды, характеризующихся чередованием зон свободного роста кристаллических форм кальцита, перекрытых его сплошными микрокристаллическими землистыми новообразованиями. СЭМ, изображение в обратно рассеянных электронах

Барит кристаллизуется в виде таблитчатых, дендритовидных и розеточных образований (рис. 13 б). Хорошо выраженные кристаллические формы имеет гипс, сростки игольчатых и шестоватых выделений которого находятся в срастании с кальцитом (рис. 13 в).

Микронзондовым анализом установлено, что кристаллы кальцита сложены кальцием от 34,93 % до 45,97 %, кислородом от 39,49 % до 52,27 % и углеродом от 8,08 % до 9,29 %. В концентрациях от 0,5 % до 2,0 % присутствуют никель, алюминий, уран, свинец, железо. В барите содержания бария достигает 50,82 %, кислорода 25,82 %, серы 14,62 %. Из примесей фиксируется стронций 2,71 %, свинец 2,69 %, алюминий 1,67 %, кремний 1,51 %, ванадий 0,18 %.

На рубеже соприкосновения техногенного фильтрата и природного водотока происходит выпадение вторичных новообразованных карбонатных минералов. Причем в условиях

неограниченного доступа кислорода новообразованные вторичные минеральные фазы хорошо раскристаллизованы. Этим они существенно отличаются от аморфных и скрытокристаллических новообразований, выпадающих в осадок на геохимических барьерах, развитых в основании золовых толщ, уложенных в золоотвалах. Уже на первом этапе взаимодействия фильтрата с природным водотоком потенциал его вредного воздействия на природные воды существенно падает за счет снижения в нем концентрации Ca, Ba, Ni, Sr, Pb, Al, V.

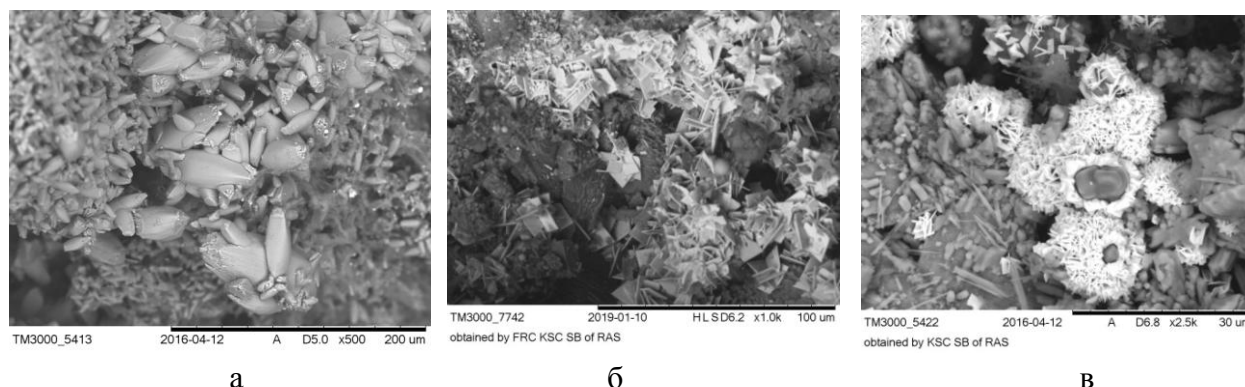


Рис. 13. Морфологические особенности кристаллического кальцита (а) и розеточные образования барита (светлые) (б) и игольчатого гипса (серые) (в), выпавшие в осадок на рубеже взаимодействия щелочных вод техногенного фильтрата и нейтральных природных вод р.Черемушка в виде плотной корки. СЭМ, изображение в обратно рассеянных электронах.

На втором этапе воздействие техногенного фильтрата на природные водотоки обусловлено остаточной подвижностью водорастворимых загрязняющих веществ. Основные особенности миграционной активности токсичных ингредиентов, привнесенных фильтратом в природные воды р.Черемушка, хорошо проявляются на отрезке водотока вдоль ограждающей дамбы золоотвала. Для оценки уровня накопления загрязняющих веществ в воде реки достаточно эффективным является применение стандартной методики, в основе которой лежит сопоставление содержаний химических элементов в наблюдательных и фоновых пунктах.

Воды р. Черемушки в фоновом пункте наблюдения характеризуются нейтральной средой с показателем рН 7,26 – 7,61 ед. Содержание кальция составляет 17,32 – 17,52 мг/л, натрия 54,3 мг/л. Однако, в полосе воздействия техногенного фильтрата на природный водоток фиксируется изменение химического состава природной воды. Область повышенной концентрации элементов совпадает с зоной разгрузки техногенного фильтрата в р. Черемушку. Здесь речные воды становятся слабощелочными с показателем рН от 8,3 до 9,1 ед. Содержание кальция увеличивается до 37,57 мг/л, натрия до 141 мг/л, магния до 9,53 мг/л, калия до 13,55 мг/л, стронция до 1,87 мг/л, бария до 0,36 мг/л, молибдена до 0,11 мг/л, меди до 0,0055 мг/л, цинка до 0,019 мг/л. Ниже по потоку содержания элементов в воде постепенно снижаются до фоновых значений.

Исследование химического состава донных илов показало наличие в них повышенных концентраций относительно фона для кальция в 5 раз, стронция в 2,21 раза, бария в 2,25 раза, молибдена в 1,6 раз. Пространственно высокие содержания этих элементов в донных илах сопряжены с областью их максимальных концентраций в воде р. Черемушка. На втором этапе взаимодействия фильтрационных вод с водами природных водотоков Ca, Sr, Ba, Mo сорбируются донными илами, на что указывает существенное повышение их концентраций в донных отложениях. Вышеперечисленные элементы не способны оказывать значительного негативного влияния на водные объекты

Содержание в донных илах натрия на уровне 0,58 %, калия 0,38 %, магния 0,64 %, цинка 0,032 % и меди 0,0082 % свидетельствует о незначительном отличии их от фоновых показателей. Элементы равномерно распределены в донных илах на протяжении всего водотока. Сорбция натрия, калия, магния, меди и цинка в донных илах не происходит. Эти элементы в составе

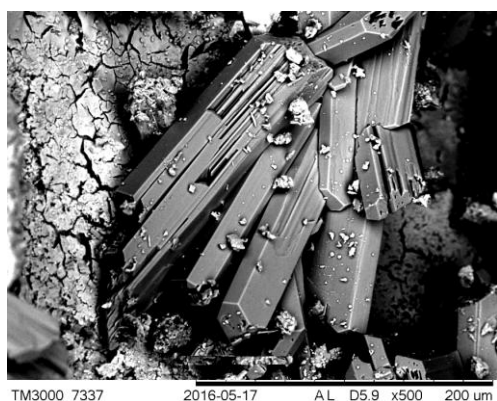
техногенных потоков, попадая в природные водные объекты, способны вместе с речными водами транспортироваться на значительные расстояния от источников техногенного воздействия.

Особенности взаимодействия фильтрата и природного водотока в системе «хвостохранилище ЗИФ – природный водоток» рассмотрен на примере хвостохранилища Советской ЗИФ.

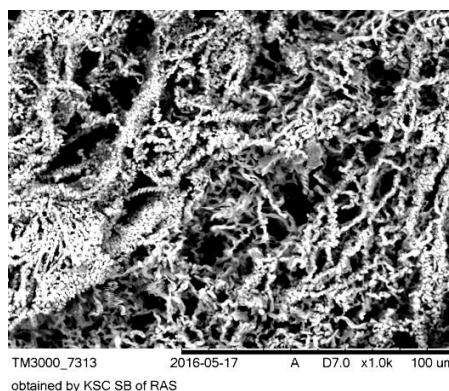
Первый этап обусловлен взаимодействием кислого техногенного фильтрата из хвостохранилищ ЗИФ с нейтральными природными водами речных систем. Данный барьер формируется на рубеже разгрузки фильтрата в природные воды. Визуально он проявляется обильной рыжей взвесью, концентрирующейся над и на урезе водного потока реки в области его контакта с фильтрационными растворами. При нейтрализации на геохимическом барьере раствор фильтрата становится пересыщенным, из которого при воздействии атмосферного воздуха на поверхности карбонатного и глинисто-слюдистого обломочного материала береговой полосы водотоков формируются кристаллические минеральные формы, явно выраженные структурами свободного роста в окружении метакolloидных сплошных землистых масс. Гипс, как правило, образует хорошо ограниченные вытянутые кристаллы и сростки кристаллов, спаянных цементирующей массой аморфных железистых минералов (рис. 14 а). В составе гипса удалось определить только основные минералообразующие элементы: кальций, кислород, серу и небольшое количество железа и кремния.

Кроме этого на начальном этапе на осушенной части береговой полосы в условиях дегидратации натечные новообразования железа растрескиваются и образуют мозаично-блоковые текстуры, полностью покрывающие поверхность обломочного материала. По результатам микронзондового анализа установлено, что натечные образования содержат в своем составе Fe 70,92 %, Al 5,66 %, S 4,42 %, Mn 0,72 %, Si 0,34 %, Ti 0,12 % и почковидные выделения Fe 70,81 %, Al 11,86 %, S 2,84 %, As 1,89 %, Co 1,65 %, Mn 1,21 %, Cr 1,15 %, K 0,53 %, Si 0,36 %.

Присутствие водной растительности в водотоке также способствует появлению новообразованных минеральных фаз. На осушенных участках береговой линии можно видеть, как отвердевшие железистые образования создают своеобразные дендритовидные, розеточные и сетчатые формы. При изучении под электронным микроскопом установлено, что адсорбированные выделения новообразованных фаз железа представлены оолитовыми агрегатами (рис. 14 б). Срастаясь друг с другом, оолиты образуют вытянутые, различно направленные и причудливо изогнутые, местами переплетенные нитевидные образования.



а



б

Рис. 14. Морфологические особенности кристаллов гипса (а) и вторичных оолитовых минеральных форм железа, адсорбированных на нитевидных водорослях (б). СЭМ, изображение в обратно рассеянных электронах.

Изучение их химического состава показало, что наряду с железом, концентрация которого составляет от 44 до 66 %, в большом количестве присутствует мышьяк от 7,37 до 11,1 %. В то же время присутствие серы довольно незначительное, не превышает 0,88 %. Помимо натечных

образований и оолитовых агрегатов широко развиты вторичные землистые формы железа, которые в ассоциации с гипсом и баритом выполняют роль цементирующей массы для обломочного материала. Микронзондовым анализом установлено, что в составе вторичных землистых минеральных форм железо составляет 28,37 %, кремнезем 10,52 %, сера 2,84 %, мышьяк 1,96 %, алюминий 3,35 %, медь 0,75 %, барий 0,29 %.

Как видно из представленных материалов, выпадение вторичных новообразованных железистых минералов сопровождается появлением в их составе изоморфных примесей мышьяка, титана, хрома, свинца, ванадия и в меньшей степени цинка, кадмия, меди, никеля, кобальта. Уже на начальном этапе взаимодействия кислого техногенного фильтрата с природным водотоком происходит заметное снижение в нем уровня концентрации водорастворимых элементов.

Оценка дальнейшего влияния загрязняющих веществ на природные воды осуществлялась по стандартной методике путем анализа динамики изменения химического состава вод водотока в наблюдательных и в фоновых пунктах. Как объект наблюдения, выбрана система «хвостохранилище Советской ЗИФ - р. Безымянка».

Установлено, что воды реки на отрезке размещения фоновых пунктов наблюдения характеризуются нейтральной средой с показателем рН 6,5 ед. Воды пресные и имеют гидрокарбонатный, кальциво-магниевый состав. На участке реки в зоне воздействия фильтрата из хвостохранилища, отмечается заметное изменение химического состава природной воды. Показатель рН опускается до значений 3,5 - 5 ед., количество сульфатов резко возрастает до 965 мг/л, а содержания гидрокарбонатов уменьшается до 36 мг/л.

Существенно растут содержания привнесенных техногенным потоком элементов. Концентрация кальция повышается до 376 мг/л, магния до 60 мг/л, натрия до 48 мг/л, никеля 1,61 мг/л, кобальта до 1,18 мг/л, железа до 40 мг/л, мышьяка до 1,87 мг/л, меди до 0,34 мг/л, цинка до 3,16 мг/л, кадмия до 0,0072 мг/л. Следует особо отметить, что по своему содержанию железо превышает фоновые значения до 200 раз, а остальные элементы от 3 до 13 раз. Ниже по потоку речных вод концентрации всех элементов постепенно снижаются.

В донных илах фиксируется накопление кальция, магния, натрия, никеля, кобальта, мышьяка и железа. Содержания меди, цинка и кадмия напротив не превышают фоновых значений. Таким образом, по миграционной активности выделяются три группы ассоциированных элементов. Кальций, железо и мышьяк образуют инертную группу элементов. При смешивании техногенных и природных вод эти элементы сразу же выпадают в осадок и образуют вторичные минеральные фазы. Натрий, магний, никель и кобальт сорбируются иловыми фракциями. В составе донных илов они способны мигрировать на незначительные расстояния, не превышающие первые сотни метров от места разгрузки техногенного фильтрата в природный водоток. Медь, цинк и кадмий не образуют самостоятельных вторичных минеральных фаз и не сорбируются донными илами. Эти элементы в составе природных вод способны мигрировать на значительные расстояния от источников техногенного воздействия.

Особенности взаимодействия фильтрата и природного водотока в системе «хвостохранилище намывных железистых хвостов – природный водоток» рассмотрен на примере хвостохранилища Краснокаменского ГОКа.

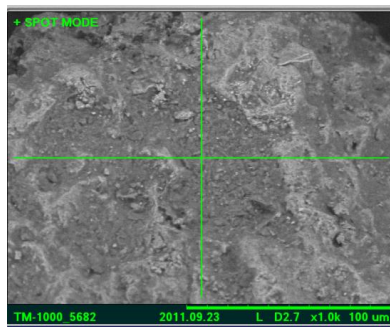
При поступлении фильтрата из хранилища намывных железистых хвостов большую роль на первом этапе играет изменение окислительно-восстановительных свойств дренирующих растворов под воздействием свободного кислорода, источником которого является атмосферный воздух. Поступающий из хвостохранилища фильтрат сталкивается с воздействием на него окислительного (кислородного) барьера, что сопровождается окислением растворенного железа в фильтрате до твердых трехвалентных гидроксидов. При обследовании фильтрационных потоков, дренирующих из подошвы опорной дамбы промнакопителя Краснокаменского ГОКа, активное накопление гидроксидов железа фиксируется в виде ржаво-бурых корок и стяжений в пределах береговой полосы руч. Грабовского (рис. 15 а).

Рентгенофазовым анализом установлено, что основной минеральной формой железистых стяжений является гетит (αFeOOH , $d=4,16; 4,04; 1,72 \text{ \AA}$, JCPDS, 17-536) (рис. 4.64). При изучении под

электронным микроскопом отчетливо проявлены его две минеральные модификации. С поверхности стяжения покрыты землистыми и порошковатыми агрегатами, с примазками глин. При разломе стяжений на свежем сколе проявляются ячеистые, колломорфные выделения ржаво-бурого цвета. Химический состав поверхности и внутренней части железистых стяжений в целом близки между собой (рис. 15 б). Различие наблюдается в колебании содержаний железа от 60,1 % до 86,2 % и алюминия от 6,9 % до 26,2 %. Данный факт обусловлен широким диапазоном присутствия глинистых примазок. Содержание кремния изменяется от 2,2 % до 3,0 %, из металлов установлены марганец 2,1 %, титан 1,2 %, ванадий 0,9 %.



а



б

Element	Weight %
Magnesium	0.6
Aluminum	26.2
Silicon	2.2
Sulfur	1.0
Chlorine	2.9
Potassium	2.7
Calcium	2.2
Manganese	2.1
Iron	60.1
Copper	0.0

Рис. 15. Фильтрат, дренирующий из-под подошвы дамбы накопителя Краснокаменского ГОКа (а) и химический состав ржаво-бурых землистых масс (б), сформированных на окислительном (атмосферном) барьере вдоль береговой полосы ручья Грабовского.

На втором этапе при попадании техногенных растворов в речной водоток действие окислительного барьера увеличивается за счет содержания в нем высоких концентраций растворенного кислорода. Для изучения состава речных вод произведен отбор гидрохимических проб из водотока на участке, прилегающем к восточной дамбе обвалования хвостохранилища, а также выше и ниже от нее по потоку.

Природные воды руч. Грабовского обладают нейтральным показателем рН 6,5 ед. По химическому составу воды ручья относятся к гидрокарбонатному кальциево-магниевому типу. Концентрация элементов сверху вниз по течению водотока изменяется. Особенно это заметно в зоне воздействия фильтрата на водоток, где показатель рН опускается до значений 4,5 - 5 ед., количество сульфатов резко возрастает до 98 мг/л, содержания гидрокарбонатов напротив, падает до 158 мг/л. Химический тип воды сдвигается к сульфатно-гидрокарбонатному кальциевому. В воде ручья происходит существенный рост содержания привнесенных техногенным потоком элементов. Концентрация натрия возрастает до 12,7 мг/л, магния до 2,99 мг/л, железа до 1,71 мг/л, никеля 0,028 мг/л, цинка до 0,015 мг/л, меди до 0,0067 мг/л, кобальта до 0,00036 мг/л.

Максимальные концентрации элементов в воде руч. Грабовского пространственно сопряжены с зоной разгрузки техногенного фильтрата в природный водоток. На этом отрезке ручья Na, Mg, Sr, Fe, Mn, Ti, V, Co, Ni, Cu, Zn превышают фоновые значения в 2,5 – 12 раз. Однако в донных илах фиксируется накопление лишь Fe, Mn, Ti, V, Co. Содержания остальных элементов близки к фоновым значениям.

Таким образом, в водотоке происходит осаждение гидроксидов железа, а Mn, Ti, V, Co, Ni накапливаются в донных отложениях. Миграционные возможности этих элементов в речном водотоке ограничены. Другая группа элементов представлена Na, Mg, Sr, Cu, Zn. При попадании техногенных растворов в речные водотоки они не участвуют в образовании твердых осадков, а вместе с водным потоком способны переноситься на значительные расстояния.

Четвертое защищаемое положение.

Происходящие в природно-технических системах процессы техногенеза приводят к повышению экологической опасности намывных горнопромышленных отходов и кризисному изменению природной среды Енисейской Сибири, что подтверждается на примере ртутного загрязнения региона. Установленные факторы и критерии техногенных процессов следует учитывать в существующей системе обращения и управления отходами.

Более ста лет на территории Енисейской Сибири осуществляется добыча благородных металлов, а с конца XX века и полиметаллов. В результате на территории Енисейской Сибири можно выделить три типа природно-технических систем, представленных отходами, содержащими ртуть.

Намывные законсервированные техногенные объекты малопроизводительных бегунных фабрик. К ним относятся отвалы сливных полей Богунаевской ЗИФ, Кузеевской ЗИФ, Майской ЗИФ, Иванавской ЗИФ, Туманной ЗИФ, Приисковой ЗИФ и других.

Намывные реорганизованные техногенные объекты крупных ЗИФ. К ним относятся ограниченные дамбами намывные хвостохранилища Советской ЗИФ, Артемовской ЗИФ, Саралинской ЗИФ, Коммунарской ЗИФ.

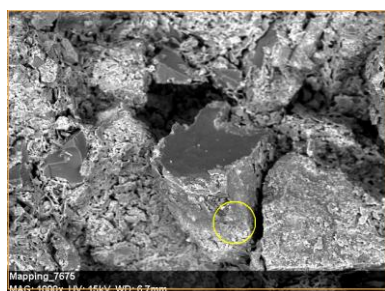
Намывные новейшие (современные) техногенные системы крупных горнообогатительных комбинатов. К ним относятся хвостохранилища Олимпиадинского ГОКа и Новоангарского ГОКа.

Специфика ртутного загрязнения речных долин, обусловленная воздействием намывных законсервированных техногенных объектов малопроизводительных фабрик рассмотрена на примере намывной природно-технической системы Богунаевской ЗИФ. Ресурсный потенциал техногенной металлической ртути в хвостохранилище Богунаевской ЗИФ оценивается порядка 400 кг. Маломощные хвосты амальгамации интенсивно подвержены процессам классического, атмосферного гипергенеза. В связи с отсутствием постоянно действующего техногенного водоносного горизонта процессы техногенеза практически не выражены. В настоящее время загрязнение р. Богунай происходит за счет механического перемещения ртутьсодержащих хвостов из техногенного массива в природный водоток. Во всех иловых пробах, взятых из речного русла вдоль границы техногенного массива, установлено наличие шариков металлической ртути. Лабораторный анализ донных илов показывает ее умеренное содержание 10 мг/кг, а в водной среде водотока практически не превышают фоновые. Содержание ртути на участке реки, прилегающей к ртутьсодержащим хвостам амальгамации, составило до 0,0026 мг/дм³, что в 260 раз превышало ПДК для рыбохозяйственных водоёмов. Протяженность загрязнения выявлена на расстоянии, не превышающее 6 км. Наличие ртути установлено в мышечной ткани голянов Чекановского, отловленных в р. Богунай у особей в районе фабрики.

Специфика ртутного загрязнения речных долин, обусловленная воздействием намывных реорганизованных техногенных объектов крупных ЗИФ, рассмотрена на примере намывной природно-технической системы Советской ЗИФ.

Общее содержание ртути в хвостохранилище оценивается в 94 тонны при содержании ртути от 4 до 22 мг/кг (г/т). До 2016 года ООО «Соврудник» сливало в него жидкую пульпу флотационных хвостов. Отмечается четкая сопряженность максимальных концентраций растворимых форм ртути с границами техногенных отложений, подверженных воздействию вод техногенного водоносного горизонта. Наличие постоянно действующего напора техногенных вод создает долговременные стабильные условия их взаимодействия с сульфидсодержащими техногенными осадками. Присутствие в воде сульфатов железа приводит к росту содержания ртути от 0,0004 до 0,008%, а кислый состав вод способствует ее миграционной активности. На участке реки в зоне высачивания фильтрата содержания ртути превышают ПДК в 43 раза. Кроме ртути растут содержания Fe, As, Ni, Co, Cu, Zn, Cd. В донных илах на участке поступления фильтрата в р. Безымянка фиксируется рост содержания Hg до 10,5 мг/кг. Накопление ртути зафиксировано в области разгрузки кислого фильтрата в нейтральные воды природного водотока, на рубеже которого обильно выпадают аморфные и

скрытокристаллические фазы гидроксидов железа. В составе практически всех вторичных новообразованных минеральных фаз происходит накопление ртути (рис. 16 а).



Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Oxygen	8	K-series	41,22	55,50
Iron	26	K-series	28,67	11,06
Carbon	6	K-series	12,43	22,29
Aluminium	13	K-series	5,27	4,21
Silicon	14	K-series	5,05	3,87
Sulfur	16	K-series	2,39	1,61
Mercury	80	M-series	2,10	0,23
Potassium	19	K-series	1,56	0,86
Arsenic	33	L-series	1,29	0,37
Titanium	22	K-series	0,03	0,01
Total:			100,00	100,00

а



Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Oxygen	8	K-series	43,04	63,81
Iron	26	K-series	34,11	14,49
Arsenic	33	L-series	10,87	3,44
Carbon	6	K-series	7,64	15,08
Silicon	14	K-series	1,46	1,24
Aluminium	13	K-series	1,46	1,28
Sulfur	16	K-series	0,68	0,51
Mercury	80	M-series	0,62	0,07
Potassium	19	K-series	0,12	0,07
Total:			100,00	100,00

б

Рис. 16. Вторичные новообразованные микрокристаллические минеральные фазы железа, покрывающие обломочный материал на урзе воды р.Безымянка (а) и вторичные оолитовые минеральные формы железа, адсорбированные на нитевидных водорослях (б), содержащие ртуть.

Растительность в водотоке также содействует формированию новообразованных минеральных фаз и содержит ртуть (рис. 16 б). Исследования Трофимовой М.А., Бажина Л.В., Заделенова В.А. и др. в 2000 г. показали, что в руч. Безымянном в районе хвостохранилища и ниже вплоть до его устья содержания ртути превышало ПДК в 160 раз. При существующей антропогенной нагрузке вода в водотоке имела 6 – 7 класс качества, то есть является «очень грязной и чрезвычайно грязной» и не пригодна для всех видов водопользования. На участке руч. Безымянный вблизи хвостохранилища и ниже организмы зообентоса и ихтиофауны полностью отсутствуют. Негативное воздействие продолжается и в р. Огне от места впадения руч. Безымянный и ниже по течению. Численность биомассы зообентоса в створе ниже устья руч. Безымянном ниже фонового содержания в 17 - 31 раза.

Специфика ртутного загрязнения речных долин, обусловленная воздействием намывных новейших (современных) техногенных систем крупных горнообогатительных комбинатов, рассмотрена на примере намывной природно-технической системы Новоангарского ГОКа.

В хвостохранилище Новоангарского обогатительного комбината накоплено более 20 млн.т технологических отходов. Среднее содержание ртути в техногенных хвостах составляет 4г/т, общее количество составляет около 140 тонн ртути. Валовые содержания ртути тесно коррелируют с цинком и свинцом. В верхнем горизонте ртуть присутствует на уровне 8,5 мг/кг, на глубине ниже 5 м ее концентрации снижаются до 2,5 мг/кг. Энергодисперсионным анализом присутствие ртути установлено в зернах и субкристаллических выделениях сфалерита до 2,04 % и в галените до 2,51 % (рис. 17). Воды техногенного горизонта, развитые в хвостохранилище, инициируют трансформацию вещества. Разложению сульфидов способствует CaCO₃, который в качестве электролита присутствует в техногенных водах, что доказано исследованиями Академии наук СССР и ИМГРЭ. Во вторичных новообразованных формах, представленных землистыми карбонатно-сульфатно-железистыми массами, плотно купирующими первичные минеральные фазы, происходит накопление ртути до 9,58 % (рис. 18). Техногенные воды активизируют переход химических элементов из твердых фаз в растворы. С контурами

обводненного горизонта техногенных хвостов сопряжены максимальные содержания водорастворимых форм Fe, Mn, Zn, Pb, Co, Ni, Hg. Процессы техногенеза, протекающие в хвостохранилище Новоангарского обогатительного комбината, высвобождают из сульфидов свинца и цинка группу химических элементов, в том числе ртуть.



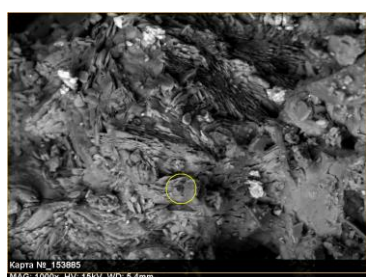
Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Lead	82	M-series	83,81	52,10
Sulfur	16	K-series	10,07	40,45
Mercury	80	M-series	2,51	1,61
Silver	47	M-series	2,26	2,70
Manganese	25	L-series	0,84	1,97
Iron	26	L-series	0,51	1,18
Total:			100,00	100,00

Рис. 17. Морфология и химический состав галенита из массива техногенных хвостов.

Ртутью заражены поверхностные воды р. Картичный, где содержание токсичного металла в воде в районе хвостохранилища превышает ПДК_{рыб хоз} в 35 раз, а также и поверхностные воды р. Ангары, где концентрация ртути превысило ПДК_{рыб хоз} в 11 раз. Повышенные концентрации ртути в поверхностных водах р. Ангары сопровождается и накоплением ее в донных отложениях. Расчет коэффициента донной аккумуляции ртути, выполненный в соответствии с методическим указаниями, утвержденными приказом Министерства природных ресурсов РФ от 24.02.2014 года № 112, составивший 9363 ед., показал, что накопление ртути в р. Ангаре свидетельствуют о высоком уровне хронического загрязнения водного объекта.

Анализ проведенных исследований показал, что суммарное поступление ртути в намывные природно-технические системы золотоизвлекающего и обогатительного производства Енисейской Сибири составило более 5000 тонн. Массивы горнопромышленных хвостов золотоизвлекающих фабрик и обогатительных ГОКов, ранее работавших с применением ртутных технологий добычи, являются не только потенциальными источниками токсичного воздействия на окружающую среду, но и активными ее загрязнителями вредным ингредиентом 1 класса опасности.

Кризис негативного воздействия на природную среду и население, обусловленный поступлением ртути из хвостохранилищ, наиболее остро проявляется в Орджоникидзевском районе на юге республики Хакасия, а также в северных районах Красноярского края, где расположены хвостохранилищ Советской ЗИФ, Олимпиадинского и Новоангарского ГОКов.



Element	AN	Series	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]
Calcium	20	K-series	44,06	43,16
Sulfur	16	K-series	26,81	32,82
Aluminium	13	K-series	11,30	16,44
Mercury	80	M-series	9,58	1,87
Iron	26	K-series	4,40	3,10
Copper	29	K-series	2,66	1,64
Titanium	22	K-series	1,19	0,98
Zinc	30	K-series	0,00	0,00
Total:			100,00	100,00

Рис. 18. Вторичные ртутьсодержащие новообразованные карбонатно-сульфатно-железистые землистые массы в нижнем горизонте техногенного массива хвостохранилища Новоангарского ГОКа.

Положение значительно усугубляется тем, что многие полигоны хранения ртутьсодержащих промышленных отходов располагаются на территории населенных пунктов. По результатам государственных докладов о санитарно-эпидемиологическом состоянии за период с 2017 по 2019 год доминирующие положение среди заболеваний в районах, как у

взрослого населения, так и у детей занимают болезни органов дыхания, представленные преимущественно астмой и бронхитом, органов пищеварения (гастриты, дуодениты), мочеполовой системы, болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ, болезни нервной системы, болезни системы кровообращения, психические расстройства и врожденные аномалии развития. Перечень болезней в районах, являющихся центрами золотодобычи, высоко коррелирует с результатами исследований заболеваний, полученных на Семеновской ЗИФ в 1998 -1999 гг.

Приведенные выше материалы исследований негативного воздействия ртути содержащих объектов на природную среду и человека свидетельствуют о наличии в регионе серьезной экологической проблемы. В целях минимизации и предотвращения вредного воздействия на окружающую среду на территории Енисейской Сибири было бы рационально выполнить целевую государственную программу по оценке масштабов, видов и степени опасности техногенного загрязнения ртутью районов традиционной золотодобычи и районов полиметаллического горно-обогатительного производства как действующих, так и перспективных для разработки.

При подготовке программы необходимо учесть следующие факторы и критерии оценки экологической опасности природно-технической системы «намывной накопитель отходов – природные воды». К основным факторам относятся:

- вещественный состав техногенных образований;
- химический состав технических и техногенных вод в намывных накопителях отходов;
- гидрохимический состав природных вод водотоков.

Вещественный состав техногенных образований. Степень экологической опасности техногенных образований, размещаемых в намывных накопителях, определяется классом их опасности. Повышение класса опасности определяется техногенными процессами вторичного преобразования вещественного состава, что приводит к разрушению первичных минеральных форм и образованию вторичных минеральных фаз. При формировании своей структуры новообразованные минералы, концентрирующие в своем составе рассеянные элементы, влияют на изменение класса опасности отходов. В связи с этим наличие процессов техногенеза, протекающих внутри массивов, можно отнести к критериям, которые характеризуют неоднородность техногенных массивов, как по вещественному составу, так и по распределению загрязняющих компонентов.

Химический состав технических и техногенных вод в намывных накопителях отходов.

В природно-технических системах «намывной накопитель отходов – природные воды» происходит существенное изменение химического состава водной среды как внутри массива, так и за его пределами. Качественный состав вод внутри природно-технических систем не однородный. На химический состав техногенного водоносного горизонта большое влияние оказывают процессы взаимодействия техногенных отложений с техногенным водоносным горизонтом. При разрушении минеральных форм и комплексов в нижних горизонтах техногенных осадков происходит высвобождение подвижных водорастворимых элементов и соединений, которые существенно меняют химический состав водной среды. Поскольку техногенный водоносный горизонт, циркулирующий в основании намывных накопителей, создает постоянно действующий напор на водоохраные защитные конструкции (экраны, дамбы и др.), именно он является источником возникновения техногенного фильтрата из накопителей. Деструкция минералов приводит к высвобождению тяжелых металлов, которые в растворенном виде существенно обогащают воды техногенного водоносного горизонта. Таким образом, процессы техногенеза, происходящие внутри техногенных массивов являются косвенными критериями формирования группы маркерных микроэлементов – загрязнителей, способных мигрировать в водорастворимом состоянии в окружающую природную среду из намывных накопителей горнопромышленных отходов.

Гидрохимический состав водной фазы техногенного фильтрата и природных водотоков.

При определении уровня загрязнения природных вод основное внимание уделяется их микроэлементному составу. Загрязнения природных вод оцениваются по принципу прямого воздействия содержащихся в пульпе микроэлементов на природный водоток. Однако, как показано в главе 4, маркерные микроэлементы формируются в техногенном водоносном горизонте, фильтрат из которого поступает в природный водоток. Содержание микрокомпонентов в водной фазе зависит от способности их дальнейшей миграции за пределы промышленных накопителей. А также зависит от интенсивности действия геохимических барьеров: окислительного (атмосферного), где происходит их выпадение в составе новообразованных кристаллических минеральных фаз и сорбционного (природный водоток), где поллютанты аккумулируются новообразованными аморфными минеральными фазами в илистых фракциях речных осадков.

В этой связи взаимодействие водной фазы техногенного фильтрата и природного водотока является двигателем процесса техногенеза, в результате которого формируется связь промнакопителя с окружающей средой. Показатели подвижности маркерных микрокомпонентов техногенного фильтрата могут служить критериями оценки экологической опасности эксплуатируемых намывных хранилищ горнопромышленных отходов.

Полученные критерии рекомендуется учитывать при ежегодном подтверждении природопользователями информации о классах опасности содержащихся в хвостохранилищах отходов, а также использовать ее в качестве обоснования для прогноза степени негативного воздействия промнакопителей на природную среду и расчета экологических платежей.

Для оценки экологической опасности объектов хранения горнопромышленных отходов необходимо задействовать комплексный мониторинг природно-технических систем «намывной накопитель отходов – природные воды», в основу которого, должны быть положены факторы и критерии оценки экологической опасности накопителей, учитывающих процессы техногенеза происходящие в намывных техногенных системах.

Заключение

1. Рассмотрены вопросы, касающиеся фундаментальных проблем взаимодействия техногенных объектов и природных компонентов в природно-технических системах **«намывной накопитель отходов – природные воды»**. Исследованы процессы техногенеза, формирующие развитие природно-технических систем, поскольку именно они создают уровень опасности промнакопителей, как источников загрязнения природной среды. Составными параметрами систем являются: намывной накопитель горнопромышленных отходов; техногенный массив твердых отходов; технические поверхностные воды; циркулирующий внутри накопителя техногенный водоносный горизонт; техногенный фильтрат, дренирующий за пределы накопителя; природный водоток, в который происходит разгрузка техногенного фильтрата.

2. Массивы техногенных отложений отходов обладают зональным строением, обусловленным процессами вторичного преобразования осадков. Выделяется два осадочных горизонта, различающихся между собой по содержанию и спецификации вещественного состава. В верхнем горизонте формируются ассоциации, генетически связанные с первичным минеральным составом отходов от промышленных объектов. В нижнем геотехногенном горизонте характер ассоциаций меняется, первичные связи распадаются и формируются новые группы элементов, образование которых определяется процессами замещения первичных минералов на вторичные формы и появлением новообразованных минеральных фаз. Изменение минерального состава осадков нижнего горизонта сопровождается накоплением элементов опасного и умеренно опасного классов.

3. Зональное строение техногенных отложений обусловлено свойствами технических вод, оказывать деструктивное воздействие на осадкообразующие минералы и минеральные комплексы, содержащиеся в техногенном массиве накопителей, и переводить в растворенное состояние целый ряд элементов, находящихся в составе минеральных зерен, образуя геотехногенную среду, в которой происходит формирование техногенного водоносного горизонта. Данные процессы развиты в основании техногенных массивов, где в условиях застойного водообмена проявлена трансформация техногенных осадков, повышается солевой показатель вод, меняется их кислотно-щелочной баланс. Модификации минерального состава осадков выражаются в виде замещения первичных минеральных

форм вторичными образованиями, в формировании новообразованных тонкокristаллических и аморфных минеральных фаз, включающих гидрокарбонаты, водные сульфаты и сульфоарсенаты, гидроксиды железа. Процессы гидролиза сопровождаются высвобождением из минеральных комплексов в поровые растворы химических элементов и соединений, изменяющих химическую формулу технических вод, что приводит к появлению техногенного водоносного горизонта и образованию новых корреляционных связей между элементами.

4. Совокупность слагающих внутренний этап техногенеза процессов растворения, разложения и окисления вещества, ионного обмена, сорбции, переноса вещества водными растворами определяет физико-химический тип техногенных осадков, геохимическую специфику техногенного водоносного горизонта и его производных – растворов техногенного фильтрата. Техногенный фильтрат играет ведущую роль в загрязнении природных вод. Анализ химического состава фильтрационного раствора свидетельствует о его тесной связи с техногенным водоносным горизонтом.

5. При высачивании фильтрата за контуры накопителей прослеживаются два рубежа, определяющих подвижность растворенных в фильтрате токсичных ингредиентов. Первый рубеж выстраивается в зоне разгрузки фильтрационных растворов в нейтральные природные воды. На участках их взаимодействия создается встречный геохимический барьер. При нейтрализации фильтрата, атмосферным кислородом на береговой зоне водотоков вблизи уреза вод происходит выпадение вторичных новообразований с развитием, ярко выраженным кристаллическим обликом. Второй рубеж ограничения подвижности токсичных ингредиентов зависит от способности ионных форм элементов, в составе смешанных природно-техногенных вод переносится природными водотоками на значительные расстояния. Большую роль в ограничении подвижности элементов играет сорбционный барьер, который создают иловые фракции донных речных отложений, в которых микрокомпоненты связываются в аморфных новообразованных минеральных фазах.

6. В техногенном процессе основным компонентом является водная фаза, содержащая подвижные компоненты, являющаяся двигателем процесса техногенеза и обеспечивающая связь промнакопителей с внешней средой. От химического состава техногенных вод, от уровня содержания в них токсичных ингредиентов, от их подвижности зависит степень экологической опасности эксплуатируемых намывных хранилищ горнопромышленных отходов.

7. Процессы техногенеза, происходящие в природно-технических системах, вызывают региональные изменения природной среды Енисейской Сибири, обусловленные загрязнением ртутью. Источниками токсичного воздействия на окружающую среду элементом 1 класса опасности являются промнакопители ЗИФ, образованные в результате применения ртутных технологий, и хвостохранилища ГОКов, обогащающих руды свинцово-цинковых месторождений. Загрязнение природной среды осуществляется техногенными водами, образующимися внутри накопителей отходов. Состав и насыщенность их ртутью определяется процессами техногенеза, развивающимися в природно-технических системах, что создает кризис ртутного загрязнения рек и селитебных зон. На многих объектах отмечаются превышения концентрации ртути над санитарно-гигиеническими нормами, что является причиной характерных заболеваний населения в условиях воздействия токсичного вещества.

8. Научное обоснование процессов техногенеза, оказывающих существенное влияние на функционирование природно-технических систем «намывной накопитель отходов – природные воды», а также обоснованные факторы и критерии оценки экологической опасности накопителей промышленных отходов рекомендуется использовать для прогноза уровня негативного воздействия промнакопителей на природную среду и проведения комплексного экологического мониторинга.

Список публикаций

Статьи опубликованные в журналах ВАК

1. Целюк Д.И. Типизация золошлаковых отходов Красноярского края // Разведка и охрана недр. – № 8. – 2009. – С 52-57.
2. Целюк Д.И. Особенности минерального состава золотых отложений из золоотвалов Средней Сибири. // Разведка и охрана недр. – № 1. – 2010.

3. Целюк Д.И. Технологические особенности и перспективы извлечения золота из отходов хвостохранилища ООО «Соврудник». / Целюк И.Н., Целюк Д.И. // «Вестник СибГАУ». – 2010. – №6 (32).
4. Целюк Д.И. Особенности вещественного состава хвостов из хвостохранилища ООО «Соврудник» / И.Н. Целюк, Д.И. Целюк // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 9 – С. 37 – 41.
5. Целюк Д.И. Особенности вещественного состава намывных лежалых хвостов железорудных объектов юга Красноярского края /Целюк И.Н., Целюк Д.И.// «Вестник СибГАУ». – 2011. – №7 (40).
6. Целюк Д.И. Перспективы переработки отходов обогащения золотоизвлекательных фабрик Восточной Сибири /И.Н. Целюк, Д.И. Целюк// Изв. вузов. Горный журнал. – 2011. – № 7, с. 31 – 37.
7. Целюк Д.И. Система комплексного анализа намывных техногенных сооружений горнодобывающих предприятий как основа прогноза и оценки их техногенного воздействия на окружающую среду/ И.Н. Целюк, Д.И. Целюк// Вестник КрасГАУ – 2011. – № 10.
8. Целюк Д.И. Системный подход при оценке воздействия на природную среду намывных техногенных сооружений горнодобывающих предприятий /Д.И. Целюк, О.И. Целюк// Вестник КГПУ им. В.П. Астафьева – 2011. – №3.
9. Целюк Д.И. Минералогические особенности магнетита лежалых хвостов горнорудного производства Красноярского края./ В.Е. Жукова, Д.И. Целюк, Е.Г. Ожогина, И.Н. Целюк// Разведка и охрана недр. – 2012. – № 6 – С. 58 –60.
10. Целюк Д.И. Комплексная оценка техногенного воздействия намывных хвостохранилищ железорудных объектов Восточной Сибири на окружающую среду/ Целюк Д.И., Целюк И.Н.// Вестник КГПУ им. В.П. Астафьева – 2012. – №3.
11. Целюк Д.И. Перспективы освоения промышленных отходов железорудного производства Восточной Сибири / Целюк Д.И., Целюк И.Н.// Известия сибирского отделения секции наук о земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – Иркутск: Изд-во НИ ИрГТУ, 2012. – № 2 (41).
12. Целюк Д.И. Оценка технологических свойств лежалых хвостов мокрой магнитной сепарации железорудных ГОКов Восточной Сибири для вовлечения в промышленную переработку /Целюк Д.И. Целюк И.Н.// «Вестник СибГАУ». – 2012. – №6 (46), С. 223–228.
13. Целюк Д.И. Перспективы применения кучного выщелачивания золота для вовлечения в промышленное освоение лежалых хвостов золотоизвлекающих фабрик Восточной Сибири /Целюк О.И., Целюк Д.И.// Известия сибирского отделения секции наук о земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – Иркутск: Изд-во НИ ИрГТУ, 2013. – № 1 (42).
14. Целюк Д.И. Минералого-технологические особенности хвостов мокрой магнитной сепарации железных руд и перспективы извлечения из них железа./Целюк Д.И., Жукова В.Е., Ожогина Е.Г., Якушина О.А., Целюк И.Н.// Журнал СФУ. Техника и технология. – Красноярск: Изд-во Сибирский Федеральный университет, 2013 – №4, С. 412-424.
15. Целюк Д.И. Лежалые хвосты обогащения железных руд – резерв сырьевой базы черной металлургии/ Д.И. Целюк, И.Н. Целюк// Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2019. – № 1.
16. Целюк Д.И. Экологические проблемы вторичного использования золошлаковых отходов/ Д.И. Целюк, И.Н. Целюк// Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2019. – № 2.
17. Целюк Д.И. Техногенные хвосты золотодобычи: промышленный потенциал и перспективы вторичного освоения/Д.И. Целюк, И.Н. Целюк// Разведка и охрана недр. – 2019. – № 8 – С. 41 –41.
18. Целюк Д.И. Техногенное экологическое наследие горнодобывающего золоторудного комплекса Восточной Сибири/ Д.И. Целюк, И.Н. Целюк// Разведка и охрана недр. – 2019. – № 12 – С. 48 –58.

19. Целюк Д.И. Техногенная эмиссия ртути в окружающую среду при хранении хвостов обогащения свинцово-цинковых руд/Д.И. Целюк, И.Н. Целюк// Разведка и охрана недр. – 2020. – 12 С. 51-57.

Монографии

20. Целюк, Д. И. Особенности развития техногенеза в намывных накопителях промышленных отходов/Д. И. Целюк, О. И. Целюк. - Красноярск : КНИИГиМС, 2018. - 358 с.

Патенты на изобретения

21. Патент на изобретение от 27.11.2012 № 2468103 «Способ извлечения золота из лежалых хвостов намывных хвостохранилищ».

22. Патент на изобретение от 22.04.2014 № 2520229 «Способ извлечения железорудного концентрата из лежалых намывных хвостов мокрой магнитной сепарации железных руд скарново-магнетитового типа».

Статьи в сборниках и материалах научных конференций

23. Целюк Д.И. Особенности минерального состава золотых отложений из золоотвалов Средней Сибири// Тезисы докладов Второй научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Геология, поиски и комплексное изучение и оценка месторождений твердых полезных ископаемых»». – М: ВИМС – 2009. С. 127-129.

24. Целюк Д.И. Ресурсный потенциал золота лежалых хвостов Восточной Сибири /И.Н. Целюк, Д.И. Целюк// материалы научно-практической конференции «Создание новых горнорудных районов в Сибири и на Дальнем Востоке: проблемы и пути решения» – М.: РИС «ВИМС». – 2011.

25. Целюк Д.И. Геохимия тяжелых металлов в намывных техногенных системах горнопромышленных комплексов Восточной Сибири/ И.Н. Целюк Д.И. Целюк// Материалы IV Международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов» - Хабаровск: Институт горного дела ДВО РАН – 2011.

26. Целюк Д.И. Перспективы золотоносности лежалых хвостов ЗИФ Центральной Сибири / И. Н. Целюк, Д. И. Целюк // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр : материалы X Междунар. конф. (Москва - Махачкала, 12-18 сент. 2011 г.). - М., 2011. - С. 81-83.

27. Целюк Д.И. Современный подход к исследованию промышленных отходов, как к объекту техногенной нагрузки на окружающую среду //Д.И. Целюк, О.И. Целюк/ Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования». – М: РУДН – 2011 г.

28. Tselyuk D.I. Resource potential of the stale tails iron ore deposits at Eastern Siberia/ I.N. Tselyuk, D.I. Tselyuk// Baikal international conference “Geology of mineral deposits”. Ulan-Ude, 2012. p. 12-13.

29. Целюк Д.И. Особенности поведения геохимических элементов в намывных системах золоторудных горнопромышленных комплексах Красноярского края/ И.Н. Целюк, Д.И. Целюк// Третья Всероссийская научно-практическая конференция Минерагения Северо-Восточной Азии - Улан-Удэ: Бурятский госуниверситет – 2012.

30. Целюк Д.И. Минералого-технологические особенности отходов переработки железных руд месторождений Красноярского края/ В.Е.Жукова, Д.И. Целюк// Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии – М: ВИМС – 2012.

31. Целюк Д.И. Особенности поведения химических элементов в намывных системах золоторудных горнопромышленных комплексах Красноярского края// И.Н. Целюк, Д.И. Целюк – М: ИМГРЭ – 2012.

32. . Целюк Д.И. Роль вторичного преобразования вещественного состава намывных лежалых хвостов в процессе техногенного воздействия на водную среду/ Целюк О.И., Целюк Д.И // Сборник докладов четвертой международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования». – М: РУДН – 2013 г.

33. Целюк Д.И. Перспективы вовлечения лежалых хвостов золотоизвлекающих фабрик Восточной Сибири/ Целюк О.И., Целюк Д.И. // Тезисы докладов ХLI Международной конференции «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе» Гурзуфе (Украина): – 2013 г.

34. Целюк Д.И. Оценка ресурсного потенциала золотоносности лежалых хвостов Центральной Сибири для промышленного освоения /Целюк О.И., Целюк Д.И.// Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр : материалы XII Междунар. конф. (Москва - Иран, 16-21 сент. 2013 г.). - М., 2013. - С. 399-401.

35. Целюк Д. И. Влияния процессов техногенеза на формирование рудных залежей в намывных лежалых хвостах / Целюк О.И., Целюк Д.И.// Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: материалы Шестнадцатой Междунар. конф. (Москва - Донецк, 18-22 сент. 2017 г.). - М., 2017. - С. 119-121, 145-147.