

*На правах рукописи*



**ЮРКЕВИЧ** Наталия Викторовна

**ТЕХНОГЕННЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ: ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ И  
РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ (НА ПРИМЕРЕ ХРАНИЛИЩ  
ОТХОДОВ ГОРНОРУДНОГО ПРОИЗВОДСТВА В КЕМЕРОВСКОЙ  
ОБЛАСТИ И ЗАБАЙКАЛЬСКОМ КРАЕ)**

1.6.4. – «Минералогия, кристаллография.  
Геохимия, геохимические методы поисков  
полезных ископаемых»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН)

Научный консультант:

**Бортникова Светлана Борисовна**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией геоэлектрохимии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Удачин Валерий Николаевич**, д.г.-м.н., доцент, директор Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, (3513) 298098, e-mail: udachin@mineralogy.ru

**Плюснин Алексей Максимович**, д.г.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (3012) 434708, e-mail: plusnin@ginst.ru

**Лолаев Алан Батразович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования Северо-Осетинского государственного университета, заместитель директора Владикавказского научного центра РАН, (8672) 72-67-88, e-mail: info@vncran.ru

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН), (г. Иркутск)

Защита состоится «18» октября 2024 года в 14.00 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.050.02, созданного на базе ФГБУН ИГМ СО РАН, в конференц-зале (630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3).

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Гаськовой О.Л. Тел./факс: +7 (383) 373-03-28; +7(383) 373-05-61 e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИГМ СО РАН [https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles\\_dzubenko/urkevich/dis-Urkevich.pdf](https://www.igm.nsc.ru/images/diss/loadfiles_dzubenko/urkevich/dis-Urkevich.pdf).

Автореферат разослан «10» сентября 2024 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета,  
д.г.-м.н.



О.Л. Гаськова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность диссертационного исследования** продиктована необходимостью выявления закономерностей геохимической эволюции техногенных экосистем для определения механизмов воздействия на окружающую среду и изменения ресурсного потенциала. Под техногенной экосистемой в данной работе понимается система, состоящая из сульфидсодержащих отходов обогащения полиметаллических руд и компонентов окружающей природной среды, которые находятся во взаимосвязи и образуют целостность путем обмена веществом и энергией.

В ходе бурного развития добывающей промышленности, с конца XIX века в результате разработки рудных месторождений по всему миру образовались отходы, отличительной чертой которых являются высокие концентрации кислотопродуцирующих сульфидных минералов (до 25 мас. % пирита), сульфидов тяжелых и благородных металлов (до 10 мас. % Cu, Zn, Cd, Pb, Ag, Au) и токсичных элементов (As, Be, Tl). За счёт тонкого измельчения на производстве отходы обладают развитой удельной поверхностью и высокой реакционной способностью. Наиболее актуальны исследования таких объектов для оценки возможности их вторичной переработки как техногенных месторождений, а также при выявлении рисков для окружающей среды. Основные исследования прошлых лет проводили в США, Канаде и Великобритании; они были сосредоточены на описании аномалий в почвах и растениях в районе складированных отходов (Briggs, 1972; John, VanLaerhoven, 1972; Blowes et al., 1978), вопросах трансформации складированных отходов горнорудного производства, состава связанных с ними потоков кислого дренажа (Acid Mine Drainage). Вопрос миграции химических элементов из хранилищ отходов горнорудного производства освещается в зарубежной литературе с конца семидесятых годов в работах R. Borman, D. Watson (1976), R. Blair (1980), R. Smith (1980). С конца 80-х – начала 90-х годов прошлого века получила активное развитие тема математического моделирования для расчета преобразования сульфидного вещества и транспорта химических элементов за пределы хранилищ (Ball & Nordstrom, 1991; Chudnenko et al., 1995). Новый век принес развитие множества направлений в исследовании техногенеза: кинетика окисления основного кислотопродуцирующего минерала пирита (Holmes et al., 2000); оценка опасности отходов горнорудного производства и кислого дренажного потока, выносящего металлы из хранилищ отходов (Liu et al., 2003; Gueguen et al., 2004; Hoth et al., 2001; Freire et al., 2005; Gaskova et al., 2019; Артамонова, 2020, 2022; Abrosimova et al., 2017; Abrosimova et al., 2015; Бортникова и др., 2018; Bortnikova et al., 2018); определение форм миграции токсичных элементов и их влияния на окружающую среду (Salomons, 1995; Nordstrom et al.,

2000; Dinelly et al., 2001; Brown et. al., 2005; Густайтис и др., 2016, 2020; Хусаинова и др., 2023; Лазарева и др., 2023); разработка рекомендаций по очистке техногенных потоков при помощи геохимических барьеров и извлечению ценных компонентов (Чантурия и др., 2003; Винокуров, 2005; Чантурия и др., 2006; Алешин и др., 2007; Бортников и др., 2010; Трубецкой и др., 2010; Гурбанов и др., 2012; Бортников и др., 2013; Богатиков и др., 2009, 2014; Винокуров и др., 2016, 2017; Минаев, 2017). В исследованиях последних лет получило развитие направление использования геофизических методов для мониторинга техногенных объектов (Pellerin, 2002; Murciego et al., 2011; Mele et al., 2013; Levei, 2013; Acosta et al., 2014; из соотечественников - Ерохин, 2012; Манштейн, Балков, 2014, Оленченко и др., 2016; Эпов и др., 2017; Карин и др., 2017, Yurkevich et al., 2022), количественные определения скорости диффузии кислорода как основного окисляющего агента (Elberling, 2005; Awoh et al., 2013), оценки скорости выщелачивания металлов из хвостов обогащения Су-руд (Guo et al., 2013). Важны в практическом плане вопросы нейтрализации и очистки техногенных потоков от токсичных элементов (Miller et al., 1996; Shevnell, 1999; Castro et al., 1999, 2000; Ramstedt et al., 2003; Howell, 2003; Simmons et al., 2004; Uhlmann et al., 2004; Johnson et al., 2005; Но, 2006; Kurniawan et al, 2006; Mohan et al., 2007; Kumpiene et al., 2008; Pant et al, 2010; Fu et al., 2011; Liu et al., 2015; Kuppusamy, et al., 2016; Choi, J et al., 2016; Han et al, 2016).

На фоне бурного роста публикаций по проблеме геохимии природно-техногенных систем остаются малоизученными такие важные вопросы, как закономерности трансформации сульфидсодержащих отходов горнорудного производства в зависимости от их физического строения и химического состава. Понимание механизмов эволюции техногенных экосистем необходимы для разработки комплекса мероприятий по их вторичной переработке, минимизации их влияния на окружающую среду и рекультивации нарушенных территорий.

**Цель работы** заключается в получении количественной информации о строении, составе и ресурсном потенциале техногенных экосистем и выявлении закономерностей миграции вещества с водными и воздушными потоками под воздействием факторов долговременного химического выветривания с помощью комплекса современных методов (на примере складированных сульфидных отходов Кемеровской области и Забайкальского края).

**Основные задачи** исследования, решаемые для достижения поставленной цели, представляют собой основные этапы работы.

1. Установить численные взаимосвязи между электрофизическими и геохимическими параметрами среды, разработать

комплексную геохимико-геофизическую методику исследования состава техногенных систем с использованием методов электротомографии, геохимической и газоаналитической съемки.

2. Определить строение техногенных экосистем и основные закономерности их трансформации с течением времени.

3. Определить основные механизмы преобразования вещества техногенной экосистемы под воздействием факторов окружающей природной среды.

4. Оценить экологический ущерб и ресурсный потенциал техногенных экосистем (на примере отвалов и хвостохранилищ Кемеровской области и Забайкальского края).

**Фактический материал.** В основу диссертационной работы положены результаты исследований по тематике геохимии техногенеза и экологической геофизики, проводимых с 2003 года автором лично в составе научного коллектива ОИГГМ, а затем ИГМ и ИНГГ СО РАН под руководством д.г.-м.н. С.Б. Бортниковой, в тесном сотрудничестве и при непосредственном участии коллег-геохимиков к.г.-м.н. Саевой О.П., к.г.-м.н. Еделева А.В., к.г.-м.н. Корнеевой Т.В., к.г.-м.н. Абросимовой Н.А., д.г.-м.н. Шевко Е.П, к.т.н. А.Л. Макася, геофизиков к.г.-м.н. В.В. Оленченко, д.т.н. А.К. Манштейна, д.т.н. Е.В. Балкова, к.т.н. Ю.А. Манштейна, Ю.Г. Карина, П.С. Осиповой, С.П. Кохановой и экономистов д.э.н. И.В. Филимоновой, к.э.н. И.В. Проворной, к.э.н. М.В. Мишениным.

В основу работы положены результаты анализов более 340 проб водных вытяжек, поровых, дренажных и поверхностных вод, 832 образцов вещества отходов из 85 шурфов, 92 геоэлектрических разреза, 44 пробы атмосферного воздуха на шести хвостохранилищах в Кемеровской области и Забайкальском крае.

#### **Методы исследований**

Методология работы базируется на трех основных блоках: 1) полевые геохимические и геофизические исследования; 2) лабораторные анализы химического состава вещества и растворов; 3) эксперименты и расчёты.

Аппаратурно-методическое обеспечение исследований техногенных экосистем развивалось в течение 20-ти лет благодаря совместной работе специалистов геохимиков, геофизиков и экономистов, сотрудников ИНГГ и ИГМ СО РАН. Синергетическое взаимодействие стало возможным за счёт применения методов разных областей наук к исследованию техногенных объектов. В соответствующих разделах третьей главы диссертации приведена последовательность работ по каждому из трех вышеприведенных блоков с указанием методов,

оборудования и программного обеспечения, а также подробно описаны авторский алгоритм геохимических и геофизических исследований, схемы расстановок профилей электротомографии и заложения шурфов работ на каждом из объектов в отдельности, методы анализа состава вещества и растворов, методы постановки, реализации и интерпретации экспериментов и расчётов.

### **Научная новизна**

1. Показана взаимосвязь между геохимическими, электрофизическими параметрами техногенного тела и факторами окружающей природной среды (температура, влажность), оценена суточная и сезонная вариабельность системы.

2. На основании данных комплексного применения электротомографии с верификацией геохимическим опробованием определено строение техногенных экосистем с выявлением зон окисления, геохимических барьеров и зон фильтрации дренажных растворов.

3. Установлены закономерности эволюции техногенных экосистем Сибири.

4. Показано, что техногенные экосистемы являются источниками серо-, селен-, азот- и углеродсодержащих газов за счёт ряда биотических преобразований. Впервые обнаружено формирование сероуглерода, газа второго класса опасности, в приповерхностном слое воздуха над отвалами. Доказан механизм метилирования серосодержащих соединений бактериями *Bacillus Mycoides* с образованием диметилсульфида.

5. Предложена методология оценки объемов техногенных тел, ресурсов ценных и токсичных компонентов, расчета экологического ущерба и рентабельности переработки отходов цианирования, флотации и гравитационного обогащения барит-полиметаллических, полиметаллических и золотоносных руд.

### **Защищаемые научные результаты**

1. Применение методов электроразведки позволяет визуализировать и количественно описать строение техногенных систем, поскольку геохимическая дифференциация вещества за время хранения сульфидсодержащих отходов обогащения приводит к формированию градиентной зональности удельного электрического сопротивления (УЭС): значения УЭС 1-20 Ом·м соответствуют слабо-окисленным тонкозернистым отложениям, а гипергенно-трансформированные горизонты характеризуются УЭС 21-300 Ом·м.

2. Процессы окислительного выщелачивания металлов и металлоидов из вещества отходов интенсифицируются в зоне гиперкриогенеза на границе техногенных отложений и мёрзлых пород за счёт сезонного колебания температур. С дренажными потоками

химические элементы попадают в горизонты подземных вод и далее – в поверхностные водотоки, в результате чего формируются гидрохимические аномалии на расстоянии до 10 км от хранилищ.

3. Сезонные и суточные колебания температуры способствуют продукции серо-, азот- и углеродсодержащих газов из вещества сульфидсодержащих отходов. Под снежным покровом при низких положительных температурах генерация газов интенсифицируется по сравнению с открытыми участками. За эмиссию метилированных форм серосодержащих соединений (диметилсульфид – до 420 мкг/м<sup>3</sup>) отвечают бактерии *Bacillus Mycooides*.

4. Сопоставление объемов техногенных экосистем, ресурсов цветных и благородных металлов в каждом из объектов, полученных в результате применения авторской геохимико-геофизической методики, с экологическими ущербами от загрязнения водных и земельных ресурсов и стоимостью природовосстановительных мероприятий указывают на целесообразность переработки с извлечением золота и барита (на примере Комсомольского хвостохранилища и Урских отвалов в Кемеровской области).

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы связана с разработкой концепции комплексного изучения техногенных экосистем, которая позволила выявить закономерности их эволюции во времени и в разных климатических условиях. Практическая значимость работы для РФ заключается в создании научно обоснованной схемы экспертной оценки экологической опасности складирования отходов при добыче сульфидсодержащих руд с учетом экономической составляющей. Разработанная геохимико-геофизическая методика была использована для определения геоэлектрической зональности Гайского хвостохранилища (Оренбургская область) по заказу ООО «Рециклинг» для оценки объемов техногенного тела и ресурсов ценных компонентов. Информация о составе отходов Урских отвалов, в частности концентрации в них барита с предложениями по технологии обогащения была учтена при расчёте технико-экономического обоснования по заказу «Газпромнефти» с целью производства буровых растворов. Продолжаются работы по выделению минералов с минимальным количеством примесей. Комплекс мероприятий по оконтуриванию зон фильтрации дренажных вод в теле хвостохранилища был проведен по заказу ГК ПАО «Норникель». Научно-обоснованные рекомендации по паспортизации заброшенных хранилищ горнодобывающей промышленности и составлению реестра предложены в качестве поправок к «Стратегии социально-экономического развития Сибири и Арктики» и предложены в резолюции правительству РФ по

итогах заседания научного совета по глобальным экологическим проблемам (НС ГЭП РАН) в 2023 г.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач, создании системы наблюдений за техногенной экосистемой при помощи геофизических, геохимических и газоаналитических методов, отборе проб для лабораторных анализов, проведении полевых измерений физико-химических параметров техногенного вещества, порового и дренажного растворов, расчете форм нахождения элементов в системе раствор – твердая фаза, постановке лабораторных и численных экспериментов по моделированию геохимических барьеров, интерпретации полученной информации.

**Апробация работы и публикации.** Основные результаты научной работы докладывались на российских и международных научных конференциях в Новосибирске (2006, 2017, 2020, 2021, 2023), Санкт-Петербурге (2006, 2007), Екатеринбурге (2006), Ярославле (2006), Кёльне (2007), Томске (2007), Рудном (2008), Гуанаято (Мексика, 2010), Александрии (Египет, 2011), Варне (Болгария, 2011), Скиатосе (Греция, 2011), Марракеше (Марокко, 2012), Томске (2012), Бодруме (Турция, 2012), Эворе (Португалия, 2017), Бостоне (США, 2018), Вене (Австрия, 2018), Альбене (Болгария, 2018, 2020), Владивостоке (2019), Иркутске (2019), Тюмени (2022, 2023), Москве (2023).

Соискатель руководила проектами *РНФ*, *ФНИ* и *РФФИ* по тематике эколого-экономических проблем природно-техногенных систем с оценкой накопленного ущерба, ресурсов, возможностей переработки и рекультивации, а также *фонда президента РФ* по тематике миграции и осаждения химических элементов по геохимическим данным и результатам электроразведки.

По теме диссертации опубликовано 30 статей в ведущих российских и зарубежных журналах, входящих в перечень ВАК и международные базы данных WoS и Scopus квартилей Q1-Q4 («Water», «Chemical Geology», «Environmental Science and Pollution Research», «Science of the Total Environment», Q1; «Applied Sciences», «Journal of Environmental and Engineering Geophysics», «Water, Air, & Soil Pollution», «Mine Water and the Environment», «Minerals», «Applied Geochemistry»; «Journal of Geochemical Exploration», Q2; «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов», «Геология и геофизика», «Toxicological & Environmental Chemistry»; «Известия РАН. Серия физическая», «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования»; «Химия в интересах устойчивого развития», Q3; «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири», Q4), одна глава в монографии, 21 тезисов и статей в сборниках зарубежных конференций,

входящих в международные базы данных WoS и Scopus, 13 тезисов и статей в сборниках отечественных конференций, входящих в базы данных WoS, Scopus и РИНЦ.

**Объем работы** составляет 291 страница, включая 49 таблиц и 80 рисунков. Список литературы состоит из 204 наименований.

**Структура диссертации.** Диссертационное исследование состоит из введения, шести глав и заключения. **Введение** содержит обоснование актуальности темы исследования, цели, задач, объектов и предмета исследования, научной новизны и защищаемых положений, теоретической и практической значимости, методологии исследований, апробации полученных результатов.

**В первой главе** «Общая характеристика техногенных экосистем, сформированных в результате складирования сульфидсодержащих отходов переработки полиметаллических руд» рассмотрены общие вопросы преобразования вещества сульфидных отходов, формирования кислых дренажных потоков, увеличения подвижности химических элементов и образования зон геохимических аномалий в районах хранилищ отходов. Описывается определение техногенной экосистемы и гиперкриогенеза. Рассматривается проблема загрязнения окружающей среды в результате деятельности горнорудных производств. Освещаются вопросы расчетов экологических ущербов и подсчета ресурсов, критерии отнесения техногенных экосистем к месторождениям, современное состояние техногенных экосистем в России, основные направления рекультивации нарушенных земель и переработки техногенного сырья.

**Во второй главе** «Характеристика объектов исследования» содержится общая характеристика хранилищ отходов Салаирского рудного поля (Дюков Лог, Талмовские Пески), отвалов Ново-Урского месторождения, хвостохранилищ Комсомольского золотоизвлекательного завода (Кемеровская область), Шахтаминского молибденового месторождения и Дарасунского рудного узла (Забайкальский край).

Объекты исследования были выбраны таким образом, чтобы охватить техногенные системы разного возраста (40-92 года), кислотности (от ультра-кислых до нейтральных-субщелочных), степени рекультивации на территории с резкоконтинентальным климатом (Кемеровская область, Забайкальский край). Оба региона характеризуются значительным количеством техногенных объектов, являющихся наследием разработки месторождений и переработки руд. Описывается история возникновения и основные характеристики техногенных экосистем, сформировавшихся в результате гиперкриогенных трансформаций, изучаемых хвостохранилищ и отвалов. Обзор современных исследований техногенных экосистем за рубежом и в России, в частности, на территории Кемеровской области и

Забайкальского края, показывает, что они характеризуются недостаточной изученностью внутреннего строения и геоэлектрической зональности, химического состава, объемов отложений, а также ресурсов ценных и токсичных компонентов в них.

**В третьей главе** «Методология исследований» освещается алгоритм исследований.

Перечисленные ниже полевые и лабораторные геохимические, геофизические и эконометрические исследования легли в основу авторской методики исследования техногенных экосистем:

1. Геофизические исследования с использованием метода электротомографии с помощью станции «Скала-48» (разработка ИНГГ СО РАН). На первом этапе предварительно исследуется геоэлектрическая зональность объекта, его границы. Данные о распределении электрического сопротивления в пределах объекта позволяют выбрать оптимальные точки для последующего геохимического опробования вещества отходов, подземного дренажа и загрязняемых грунтовых вод (Bortnikova, Yurkevich et al., 2016).

2. Геохимические и гидрохимические полевые исследования:

- *опробование*

- вещества отходов по поверхности и в вертикальных разрезах по стенкам шурфов в выборочных зонах с контрастными электрическими сопротивлениями;

- дренажа, поверхностных и грунтовых вод на участках с наибольшей электропроводностью;

- речных вод в реках, принимающих дренаж, а также наиболее удаленных от зоны техногенного воздействия (в 5 км выше по рельефу), по ходу течения через каждые 100-500 м за пределы населенных пунктов (20 км от объекта);

- *полевые потенциометрические и кондуктометрические измерения* значений pH, Eh, электропроводности дренажных растворов, грунтовых и речных вод на месте, фильтрование и консервирование проб для последующего анализа на содержание микроэлементов;

- *газоаналитические исследования с применением портативного газоанализатора ГАНК-4 по методике, описанной в работе (Bortnikova et al., 2018).*

3. Анализ твердого вещества рентгенофлуоресцентным (РФА) методом, рентгенофлуоресцентным методом с синхротронным излучением (РФА-СИ) и масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой с предварительной пробоподготовкой (Юркевич и др., 2008), на содержание серы сульфидной, сульфатной и карбонатной углерода методами классической аналитической химии для определения

кислотопродуцирующего и кислотнейтрализующего потенциалов вещества сульфидных отходов.

4. Определение влажности, гранулометрического состава, пористости и проницаемости твердого вещества.

5. Измерение концентраций

- анионов и катионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ) в растворах титриметрическими, потенциометрическими и турбидиметрическими методами;

- макро- (Ca, Mg, K, Na, Al, Si) и микроэлементов (Mn, Fe, Cu, Zn, Cd, Ni, Co, Pb, As, Sb, Sn, U, Th, Bi, Ga, Ge, P, S, Se, Hg) в растворах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в водных пробах: поровых растворах, подземных и речных водах.

6. Определение минерального состава твердого вещества, сухих остатков с использованием рентгеноструктурного анализа (РСТА) и электронно-сканирующей микроскопии (Jeol JSM-6380LA).

7. Лабораторные геохимические эксперименты

- по извлечению водных вытяжек из вещества отходов;

Определяется подвижность элементов при переходе в водной раствор на основании экспериментальных данных по методике, адаптированной коллективом авторов с учетом кислотопродуцирующего потенциала (Abrosimova et al., 2015). При этом если поведение As, Au, Ag в системе отходы - вода освещено в некоторой степени в работах последних лет, то о подвижности и формах перехода в раствор соединений Ga, In, Tl, Bi данных почти нет, поскольку обнаружение этих элементов имеет аналитические ограничения, а концентрации выше установленных пределов в природе встречается редко. Выбранный нами фактический материал в этом смысле уникален.

- по газогенерации веществом отходов с участие биоты. Для изучения роли бактериальной микрофлоры в изменении химического состава отвалов было проведено культивирование выделенного из отвала штамма *Vacillus tyucoides* с последующим анализом состава накопившихся на культуральной жидкостью соединений с помощью газовой хромато-масс-спектрометрии. Методика проведения эксперимента описана в работе (Юркевич и др., 2019).

8. Термодинамическое моделирование химических форм нахождения элементов в растворе при помощи программы и базы данных WATEQ4F с учетом электрической проводимости растворов (McCleskey, et al., 2012) и PHREEQC (Parkhurst & Apello, 2013).

9. Полученные данные служат основой для построения объемных моделей техногенных экосистем, карт геохимических аномалий элементов, в радиусе 10-30 км от предполагаемого источника загрязнения

по методике, разработанной авторами в предыдущих работах для металлов и As (Yurkevich et al., 2015, 2020, 2021, 2022, 2023).

10. Эколого-экономические расчёты (ущербы, ресурсы, рентабельность переработки). При проведении оценки экологического ущерба был использован ряд методических подходов, в частности методика Министерства природных ресурсов РФ «О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами», а также методика оценки ущерба, наносимого окружающей среде сбросами загрязняющих веществ в водоемы, рекомендованная Президиумом Академии наук СССР в 1983 г. Расчёты ресурсов проводились с использованием информации об общем объеме отходов, концентрациях ценных компонентов в них с примерной оценкой их рыночной стоимости без учета затрат на извлечение. Для Комсомольской золотоизвлекательной фабрики сделаны расчёты стоимости извлечения золота и для Урских отвалов - барита и оценена рентабельность проектов.

**В четвертой главе** «Оценка строения и состава техногенных экосистем по данным геохимических и геофизических исследований» рассматриваются результаты определения состава техногенных экосистем с применением электротомографии и химических анализов вещества, опробованного в шурфах в зонах с контрастными электрическими сопротивлениями; обосновывается взаимосвязь электрофизических и геохимических параметров среды.

**В пятой главе** «Обоснование механизмов миграции вещества из техногенных экосистем с водными и газовыми потоками» освещается миграция растворов из межпорового пространства за пределы техногенной системы, выщелачивание металлов по ходу фильтрации, формирование подземных потоков и их попадание в горизонты подземных вод или природные водные объекты. Рассмотрена суточная и сезонная динамика концентраций газов в приповерхностном слое воздуха над отвалами, описано так называемое «дыхание техногенных систем», рассмотрена роль биотического фактора в формировании состава серо- и углеродсодержащих летучих соединений.

**В шестой главе** «Расчет объемов техногенных экосистем, ресурсов ценных и токсичных элементов, экологических ущербов и рентабельности переработки» освещает результаты расчётов объемов изученных техногенных тел, ресурсов металлов в твёрдом веществе и их подвижных форм на основании комплексной геохимической и геофизической схемы исследований, предлагаемой автором. Приводится описание схем исследований, алгоритм и результаты расчётов объемов и ресурсов металлов для каждого объекта в отдельности с учётом индивидуальных особенностей их строения. Приводится оценка

экологических ущербов, ресурсов, обосновывается целесообразность переработки и технико-экономический план работ по рекультивации техногенных объектов.

**Благодарности.** Автор искренне благодарит заведующего лаборатории геоэлектрохимии, своего первого научного руководителя, д.г.-м.н., профессора Светлану Борисовну Бортникову за внимание и помощь при проведении исследований, мудрость и поддержку на протяжении совместной работы. За создание научного направления «геоэлектрохимия» в ИНГГ СО РАН и поддержку всех геофизических исследований техногенных систем автор благодарен академику РАН Михаилу Ивановичу Эпову. За конструктивную критику и ценные рекомендации автор признателен академику РАН Алексею Эмильевичу Конторовичу, чл.-корр. РАН Вячеславу Николаевичу Глинских, д.т.н. Игорю Николаевичу Ельцову, д.г.-м.н. Ольге Лукиничне Гасковой, д.г.-м.н. Эллине Владимировне Сокол, д.э.н. Ирине Викторовне Филимоновой. Проведение экспедиционных работ не было бы возможным без к.т.н. Н.В. Юркевича, к.г.-м.н. В.В. Оленченко, к.г.-м.н. А.Я. Шевко, к.г.-м.н. О.П. Саевой, к.г.-м.н. А.В. Еделева, к.г.-м.н. Т.В. Корнеевой, к.г.-м.н. Н.А. Абросимовой, П.С. Осиповой, Ю.Г. Карина, С.С. Волюнкина, Д.О. Кучера, С.П. Кохановой, И.И. Фадеевой, к.г.-м.н. Л.В. Цибизова, к.г.-м.н. Е.В. Цибизовой. Эколого-экономические расчёты были проведены совместно с к.э.н. И.В. Проворной и к.э.н. М.В. Мишениным. Анализ химического состава образцов воды, вещества хвостов, почв проведены в сотрудничестве с коллективами лабораторий ХАЦ «Плазма» и НОЦ «Вода» (г. Томск) при активной помощи Т.А. Глуховой и К.Ю. Тулисовой. Благодарю д.г.-м.н. Е.П. Шевко и к.г.-м.н. Т.В. Корнееву за помощь при решении задач термодинамического моделирования.

Особую благодарность выражаю своему супругу, Николаю Викторовичу Юркевичу, за мудрые советы, конструктивную критику, помощь в организации научных исследований. Благодарю своих родителей, Виктора Юрьевича Ожерельева, Ольгу Владимировну Ожерельеву, и дочерей, Ирину и Марию Юркевич, за всестороннюю поддержку и терпение.

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**1. Применение методов электроразведки позволяет визуализировать и количественно описать строение техногенных систем, поскольку геохимическая дифференциация вещества за время хранения сульфидсодержащих отходов обогащения приводит к формированию градиентной зональности удельного электрического**

**сопротивления (УЭС): значения УЭС 1-20 Ом·м соответствуют слабо-окисленным тонкозернистым отложениям, а гипергенно-трансформированные горизонты характеризуются УЭС 21-300 Ом·м.**

Развитие направления комплексных исследований техногенных экосистем Западной Сибири с применением геофизических и геохимических методов началось с отвала отходов Салаирской свинцово-цинковой обогатительной фабрики Дюков Лог в 2005 году. Предпосылки успешного применения метода электротомографии для выявления границ техногенной системы заключаются в том, что тонкоизмельченные отходы, пропитанные высокоминерализованным поровым раствором, обладают удельной электрической электропроводностью существенно выше, чем электропроводность вмещающей среды. Задача, которая была решена при изучении хранилища Дюков Лог, сводилась к локализации подземных путей фильтрации дренажного раствора, которые визуализируются на геоэлектрическом разрезе сопротивлениями ниже, чем материал отходов. Кроме того, впервые на примере хранилища Дюков Лог была установлена взаимосвязь электрических сопротивлений, получаемых с применением метода электротомографии, с химическим составом и петрофизическими параметрами среды. Аналогичные построения выполнены для остальных исследуемых объектов.

По результатам работ были определены геоэлектрические свойства, химический состав и физические свойства вещества отходов до глубины 3 м. Определена геоэлектрическая зональность объекта до глубины 40 м (Рисунок 1) [Эпов, Юркевич и др., 2017]. Показано, что существует обратная корреляция между УЭС паст, содержанием сульфатной серы в твердом веществе, суммарными концентрациями металлов (Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Cd, Pb) и цинка в водных вытяжках (Рисунок 2). Это свидетельствует о приуроченности зон с низкими значениями УЭС к горизонтам интенсивного окисления сульфидного вещества с образованием вторичных сульфатных минералов. Данные рентгеноструктурного анализа подтверждают образование ярозитов, гипса, англезита, водные вытяжки содержат концентрации сульфат-анионов до 2 г/л.

Результаты геохимического анализа вертикальных шурфов до глубины 2 м свидетельствуют о приуроченности зон низких УЭС на геоэлектрических разрезах к обводненным горизонтам, поровые воды которых представляют собой высокоминерализованные растворы.

Расчетную минерализацию порового раствора при известном УЭС сравнили с измеренной химическими методами минерализацией водной вытяжки. Для расчетов были взяты значения УЭС, измеренные методом резистивиметрии на приборе Miller 400D в лабораторных условиях. Для расчета минерализации флюида при заданном УЭС использовано

соотношение (1) для изотропной гомогенной среды при постоянном давлении, мощности и проницаемости коллектора [Yao, Holditch, 1996; Zhang et al., 1998]. Сделано предположение, что электропроводность отходов Дюкова Лога обусловлена только минерализацией порового раствора.

$$A_w = \left[ \left( 0.0123 + \frac{3647.5}{c^{0.955}} \right) \frac{82}{1.8T + 39} \right] \quad (1),$$

где  $C$  — минерализация флюида, мг/л;  $T$  — температура, °C;  $\rho$  — УЭС среды, Ом·м; 0.0123 и 3647.5 — коэффициенты, полученные эмпирическим путем [Zhang et al., 1998].

Измеренная минерализация водных вытяжек (по данным химических анализов) оказалась почти в 3 раза выше расчетной величины (Рисунок 3, коэффициент в уравнении равен 2.8), что свидетельствует о существенном вкладе в УЭП исследуемых отходов минерального скелета [Эпов, Юркевич и др., 2017]. Поскольку его величина не учтена в соотношении (1), то получаются существенно заниженные значения минерализации раствора. Поэтому для расчетов минерализации флюида в сложных гетерогенных хвостохранилищах необходимо использовать более сложные зависимости, например, для низкоомных коллекторов с учетом глинистости [Глинских и др., 2014; Мельник, Ерофеев, 2014].

Полученные результаты определения объёмов среды положили начало исследованиям по разработке методики, позволяющей, с одной стороны, подсчитать ресурсы ценных компонентов в хвостах и, с другой стороны, оценить экологическую опасность хранилища при подтоплении сезонными потоками и грунтовыми водами.

Произведены измерения методом электротомографии с детальностью 15 см, для чего был использован подход «микро-электротомография»: длина профиля 14.1 м, шаг между электродами – 30 см. Серия работ на хранилищах Талмовские Пески, Урские отвалы, Комсомольский гидроотвал, Шахтаминское и Дарасунское хранилища позволил получить качественное сопоставление геоэлектрических разрезов и вертикальной геохимической зональности вещества с выделением геохимических барьеров – концентраторов металлов, а также получить количественные взаимосвязи между УЭС среды, физико-химическими параметрами и химическим составом вещества [Yurkevich et al., 2019; Yurkevich, Bortnikova et al., 2021; Yurkevich, Olenchnko et al., 2021].

На примере Дарасунского хранилища показан фрагмент геоэлектрического разреза (Рисунок 4 а, б) в сопоставлении с данными опробования шурфа, выкопанного на глубину сезонно-талого слоя (глубина сезонного промерзания – 1.4 м). Верхние слои до глубины ~ 50 см

в зоне активного криогенеза подвергаются интенсивному выветриванию за счёт сезонных колебаний температур и влажности, происходит выщелачивание химических элементов [Yurkevich et al., 2021]. Такие слои характеризуются более крупным размером частиц, меньшей влажностью (5-10 %), чем остальные горизонты, значениями электропроводности, окислительно-восстановительного потенциала существенно ниже по сравнению с нижележащим пылеватым материалом, маркируются на геоэлектрических разрезах как зоны с сопротивлениями 200-300 Ом·м (вкладка 4б).

В промежуточном горизонте располагается пылеватый влажный материал (влажность 25-30 %) со значениями  $E_h +600+700$  мВ, в котором накоплены мышьяк (4800 г/т), селен (6.1 г/т), сурьма (170 г/т), золото (1.1 г/т), серебро (7.7 г/т) и широкий спектр элементов рудной ассоциации. Этот горизонт, с одной стороны, защищен от действия прямых солнечных лучей, вымывания поверхностными потоками и высыхания, а с другой – находится в пределах сезонного талого слоя, то есть подвергается криогенным изменениям под воздействием температурных колебаний. Здесь вещество словно законсервировано, однако, в нём протекают процессы окисления (о чём говорят высокие  $E_h$  пасты) и преобразования твердого вещества с формированием подвижных комплексов химических элементов в поровых растворах, готовых к транспорту при помощи капиллярного поднятия и подземных дренажных просачиваний. Такие горизонты отвечают зонам с сопротивлениями 10-20 Ом·м (см. Рисунок 4). Со временем эти слои по аналогии с вышележащими будут подвергаться окислению, выветриванию и выносу химических элементов с водными потоками. Именно в пределах этого активного слоя обнаруживаются геохимические барьеры с резким скачком значений  $E_h$  (Рисунок 5) и концентраций химических элементов.

Ещё один геохимический барьер, концентрирующий химические элементы, определяется на границе с мерзлым грунтом. Горизонты, расположенные глубже, представлены зоной относительного «химического покоя» с низкими скоростями химических реакций, что находит своё отражение в пониженной электропроводности среды по сравнению с зоной активного выщелачивания. Важно, что активный слой с точностью до 15 см трассируется методом микроэлектротомографии, что позволяет и в дальнейшем использовать данный подход для оконтуривания горизонтов выщелачивания и концентрирования вещества.

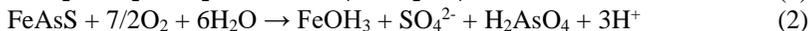
Итак, применение метода электротомографии позволяет определить границу техногенных отложений, их геоэлектрическую зональность и выделить зоны большей и меньшей степени гипергенной трансформации,

локализовать места предполагаемых утечек дренажа за пределы хранилища.

**2. Процессы окислительного выщелачивания металлов и металлоидов из вещества отходов интенсифицируются в зоне гиперкриогенеза на границе техногенных отложений и мёрзлых пород за счёт сезонного колебания температур. С дренажными потоками химические элементы попадают в горизонты подземных вод и далее – в поверхностные водотоки, в результате чего формируются гидрохимические аномалии на расстоянии до 10 км от хранилищ.**

На примере вещества, складированного в Дарасунском хранилище, рассмотрены механизмы гиперкриогенной трансформации сульфидсодержащих отходов, выщелачивания химических элементов и их переноса с водными потоками [Yurkevich et al., 2021].

После окисления сульфидные минералы (преимущественно пирит) разрушаются с образованием кислот в сезонно-талом слое, так как активная зона гиперкриогенеза образуется за счет многократного замерзания и оттаивания воды при перепадах температур. Металлы и металлоиды выщелачиваются и из других сульфидных минералов (арсенопирит, галенит, сфалерит) [Смирнов, 1955; Плюснин и др., 1997; Parbhakar-Fox and Lottermoser 2015; Hawkins, 2014; Acero et al., 2007]:



Протекает окислительная реакция пирита с остатками цианидных реагентов с образованием тиоцианат-иона [Breuer et al., 2008; Parbhakar-Fox, 2016]:



Благородные металлы (Ag, Au) и медь вступают в реакцию с цианид-анионом с образованием подвижных растворимых цианидных комплексов [Marsden and House, 2006; Parbhakar-Fox, 2016; Ghasemi et al., 2018]:



Длительное взаимодействие тиоцианат-иона с кислородом воздуха приводит к его разложению с образованием сульфат-, бикарбонат-ионов и аммиака [Treatment, 2020]:



Выявлены три группы гидрохимических аномалий в районе Дарасунской геотехногенной системы [Yurkevich et al., 2021]:

1) Pb-Co-Ni-Zn-Cd-Cu-Fe-Al-Tl-Be-In – типичные рудные металлы и элементы-примеси (Tl, Be, In). Выход этих элементов в раствор связан с

окислением сульфидов и образованием сульфатных растворов, а дальнейшее поведение в водном растворе определяется кислотностью среды и сорбцией на Fe (III), Mn (IV), Al (III) гидроксидах;

2) Au-Ag-As-Sb-Se – благородные металлы и металлоиды, концентрация которых в водном растворе регулируется комплексообразованием с  $\text{CN}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  анионами;

3) Bi-Sn-Te – постпереходные металлы и металлоиды, поведение которых контролируется растворимостью собственных минералов:  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ,  $\text{SnTe}$ ,  $\text{SnS}$ .

Повышенные в сравнении с региональным фоном концентрации всех вышеперечисленных элементов обнаружены в поверхностных водотоках, в том числе в р. Дарасун ниже техногенной системы на расстоянии до 5 км (т. Д-15, Рисунок 6). Например, концентрация золота в этой точке (2.3 мкг/л) превышала фон в 460 раз (вкладка 6) [Yurkevich et al., 2021].

На примере Урской техногенной системы показано растекание подземных вод, подпитывающих озеро на северо-востоке от объекта, в направлении с севера на юго-восток (отмечается на глубинах до 15.5 м, Рисунок 7). Проводящая зона, прослеженная до гл. до 20 м юго-западного направления сформирована путем проникания дренажных вод по природному разлому, откуда далее высокоминерализованные воды поступают в подземные горизонты.

Существование зон фильтрации дренажных вод в ослабленных (трещиноватых) грунтах, в том числе, с прониканием в горизонт подземных вод доказано при помощи электротомографии с верификацией данными опробования скважин для всех исследованных техногенных объектов, в частности, хранилищ Талмовские Пески [Bortnikova et al., 2013], Шахтаминское [Yurkevich et al., 2023; Yurkevich et al., 2017], Дарасунское [Yurkevich et al., 2021], Дюков Лог [Юркевич и др., 2015] и Комсомольское [Bortnikova et al., 2018].

Комплексирование данных дистанционного зондирования и геохимического анализа позволила создать модель водного переноса химических соединений. Окисление сульфидных минералов на Урских отвалах приводит к образованию кислых стоков (зона I, Рисунок 8). Грунты в зоне окисления до глубины 5 м имеют значения УЭС до 10 Ом·м, характеризуются низкими значениями модуля вектора магнитной индукции и прогревом (Рисунок 9) [Yurkevich et al., 2022]. В зоне (II) (см. Рисунок 8), кислый дренажный поток разрушает корневые системы деревьев, растворяет минеральные комплексы почвы, вымывает и выносит с водным потоком породообразующие элементы. В зоне III (см. Рисунок 8), происходит смешение с естественным ручьем, а затем с

рекой Ур, образуется первый природный геохимический (физико-химический) барьер при контакте с грунтами, на глубине 100 см формируется восстановительная среда, широкий спектр цветных, благородных металлов, мышьяк, сурьма и ртуть концентрируются в почвах [Yurkevich et al., 2022].

Таким образом, показано, что процессы гиперкриогенеза, протекающие на границе техногенных отложений и мёрзлых пород приводят к выщелачиванию металлов и металлоидов из вещества отходов и формированию гидрохимических аномалий в поверхностных и подземных водах. Подвижными оказываются не только металлы рудной ассоциации, в том числе благородные, но и токсичные элементы-примеси, например, талий, бериллий и мышьяк. Техногенное воздействие отмечается на расстоянии до 10 км от хранилищ.

**3. Сезонные и суточные колебания температуры способствуют продукции серо-, азот- и углеродсодержащих газов из вещества сульфидсодержащих отходов. Под снежным покровом при низких положительных температурах генерация газов интенсифицируется по сравнению с открытыми участками. За эмиссию метилированных форм серосодержащих соединений (диметилсульфид – до 420 мкг/м<sup>3</sup>) отвечают бактерии *Bacillus Mycoides*.**

Техногенные экосистемы являются источниками контрастных аномалий серо-, углерод- и азотсодержащих соединений. В воздухе над поверхностью ряда изучаемых объектов (Урские отвалы, Комсомольское хвостохранилище, Талмовские Пески) обнаружены диоксид серы, карбонилсульфид, сероуглерод, диметилсульфид, диметилсульфоксид, диметилселенид в концентрациях, существенно превышающих фоновые значения.

Впервые серосодержащие газы в концентрациях выше фоновых были зарегистрированы нами в атмосфере над Комсомольским хвостохранилищем, что инициировало исследование механизмов образования летучих характерных соединений при трансформациях других сульфидсодержащих отходов.

При первичном обследовании Урских отвалов летом 2018 г. при помощи портативного газоанализатора ГАНК-4 в приземном слое воздуха были обнаружены диметилсульфид (ДМС, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>S), диметилсульфоксид (ДМСО, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>SO), диоксид серы (SO<sub>2</sub>) и сероуглерод (CS<sub>2</sub>) во всех точках профилей и диметилселенид (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>Se) в воздухе над пиритовым отвалом (Рисунок 10). Впервые серосодержащие газы в концентрациях выше фоновых были зарегистрированы нами в воздухе над Комсомольским хвостохранилищем, с чего и начались исследования механизмов

образования летучих характерных соединений при трансформациях сульфидсодержащих отходов.

На Урском отвале наиболее активное газовыделение происходит на участках локального разогрева зоны окисления, в том числе, газов биотического происхождения ( $C_2H_6S$ ) за счет метилирования сульфидсодержащих соединений бактериями *Bacillus Mycooides*, а также  $CS_2$  и целого спектра серо-, углерод- и азотсодержащих газов [Yurkevich et al., 2019]. В этой зоне обнаружен разогрев грунта под шапкой снега до  $+5\text{ }^\circ\text{C}$  при исследованиях отвала в феврале (при температуре окружающей среды  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ ) и зафиксирован максимум эманаций  $C_2H_6S$  по сравнению с бесснежными участками отвала [Yurkevich et al., 2019; Юркевич и др., 2019].

При газовой съемке поверхности Комсомольского хвостохранилища были определены контрастные аномалии  $SO_2$  в воздухе (Рисунок 11). Практически везде над поверхностью хвостохранилища концентрации  $SO_2$  превышают ПДК [ГН 2.1.6.1338-03, 2003] особенно в южной части, где складированы кеки цианирования сульфидного флотоконцентрата Бериккульского золотоизвлекательного завода. Содержание  $SO_2$  в воздухе в 12:00 колебалось от 0.011 до 0.079  $\text{мг}/\text{м}^3$ . Эта съемка была повторена для тех же точек в 18:00, что дало совершенно разные результаты: все измерения содержания  $SO_2$  дали значительно более высокие концентрации (т.е. от 3 до 460 раз выше). Следует отметить, что температура поверхности хвостохранилища в 12:00 составляла  $12\text{-}14\text{ }^\circ\text{C}$ , а температура окружающего воздуха –  $24\text{-}26\text{ }^\circ\text{C}$ . При следующем обследовании в 18:00 температура поверхности повысилась до  $20\text{-}22\text{ }^\circ\text{C}$ , а температура воздуха снизилась до  $15\text{-}16\text{ }^\circ\text{C}$ . Таким образом, разница температур окружающего воздуха и хвостохранилища оказывает существенное влияние на газовыделение.

Предположительно, это связано с: 1) меньшей растворимостью  $SO_2$  в поровых жидкостях и 2) ускорением реакций при более высоких температурах. Вечером поверхность еще теплая и температура воздуха снижается, что приводит к значительному увеличению скорости поступления диоксида серы по сравнению с наблюдаемой в дневное время. Это подтвердили полевые опыты, в которых содержание  $SO_2$  измерялось в замкнутом объеме под почвенным кольцом несколько раз в течение суток. В первом измерении, проведенном в 11:30, содержание  $SO_2$  составило 0.063  $\text{мг}/\text{м}^3$ . Эти значения постепенно увеличивались до 6.5  $\text{мг}/\text{м}^3$  (в 18:30), а затем снижались до 0.96  $\text{мг}/\text{м}^3$  к концу дня.

Основными причинами наблюдаемых во времени изменений содержания  $SO_2$ , вероятно, являются суточные колебания температуры и различные режимы охлаждения вещества отходов и воздуха. Последняя

причина не только приводит к газовой выделению из межпорового пространства, но и изменяет активность бактериальных сообществ, трансформирующих минеральную матрицу хвостохранилищ [Bortnikova et al., 2018]. Пространственные колебания выбросов SO<sub>2</sub> могут быть связаны с вариациями влажности и проницаемости отходов [Hale, 1993, 2010], но в основном, обусловлены неоднородным составом материала, а именно, различиями в содержании сульфидов. Например, в южной части хвостохранилища аномалии более контрастны из-за высоких концентраций сульфидных минералов, что отражается в накоплении сульфат-ионов в поровых растворах.

Изучение сезонной и суточной динамики процессов, протекающих в системе «отходы – поровый раствор – атмосферный воздух», при помощи геохимических и геофизических методов позволил сформулировать основные закономерности формирования ряда соединений в приповерхностном слое воздуха над сульфид-содержащими отходами. Согласно экспериментальным исследованиям [Taylor et al., 1982; Hinkle & Lovell, 2000], сероуглерод (CS<sub>2</sub>) и карбонилсульфид (COS) абиогенно генерируются при разложении сульфидных минералов (в основном пирита) в неравновесных условиях.

При этом, образование диметилсульфида ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S) предположительно может являться результатом жизнедеятельности микроорганизмов, а метилсульфид (CH<sub>3</sub>SH) может иметь как биогенное, так и абиогенное происхождение. На основе результатов предшествующих исследований [Heinen & Lauwers, 1996; Rickard & Luther, 2007] предполагается, что для системы FeS/FeS<sub>2</sub> следующие взаимодействия в восстановительной обстановке приводят к образованию серосодержащих газов на примере CS<sub>2</sub> и COS [Бортникова, Юркевич и др., 2021]:



Стоит отметить, что непосредственно механизм данных реакций не до конца раскрыт, и система FeS/FeS<sub>2</sub> (равновесие 8) является важным участником абиогенной продукции CS<sub>2</sub> и COS, что подтверждается снижением количества генерируемых газов при переходе от пирита к другим сульфидным минералам [Taylor et al., 1982], и её можно рассматривать не только, как восстановительную систему для запуска

реакций 10-14, но и катализатор для этих реакций [Бортникова, Юркевич и др., 2021].

Оксид серы (IV) является промежуточным продуктом окисления сульфидных минералов. Из-за высокой летучести он образует реакционные зоны. Предполагаемый механизм окисления [Nordstrom, 1982; Rimstidt and Vaughan, 2003; Descostes et al., 2004] в кислых условиях (pH <3) включает несколько стадий. Сначала сульфидная сера гидратируется на поверхности пирита и окисляется до тиосульфата (S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>), который диспропорционирует до серы (4S<sub>4</sub>O<sub>(s)</sub>) и тетрагидратата (S<sub>4</sub>O<sub>6</sub><sup>2-</sup>); затем они окисляются до ионов сульфата (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) через сульфит (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). Этот механизм подтверждается обнаружением элементарной серы, сульфита (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), тиосульфата (S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>) и полигидрататов (S<sub>n</sub>O<sub>6</sub><sup>2-</sup>) в опытах по окислению пирита [Nordstrom, 1982; Moses et al., 1987] и природными условиями [Lindsay et al., 2009], а также обнаружением сульфитных и тиосульфатных минералов как продуктов выветривания сульфидов в зонах окисленных сульфидных и пиритных месторождений [Chandra and Gerson, 2010].

Формаид, N,N-диметил занимает третье место по уровню содержания среди всех сероорганических газов в воздухе над барит-пиритовым Урским отвалом (после C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>Se и CS<sub>2</sub>) (Таблица 1). Вероятно, оба соединения также являются участниками одного и того же биотического цикла с метилированием, о котором мы писали выше. Кроме того, интересно, что формаиды являются промежуточными продуктами в цикле метаногенеза и могут быть источником высокотоксичного цианистого водорода HCN [Birr, Kieczka, 2012].

Формаид является безопасным продуктом ферментативной конверсии токсичного цианида, например, фитопатогенными грибами с использованием цианидгидратазы по реакции [Mansfield, 2000; Gupta et al., 2010]:



Помимо детоксикации цианида, ряд грибов осуществляет реакцию превращения цианида в формаид с целью использования цианида в качестве источника азота. Перейра и коллеги [Pereira et al., 1996] идентифицировали три гриба из промышленных сточных вод, которые росли на цианиде как единственном источнике азота: *F. oxisporum*, *Trichoderma koningii* и *Gliocladium virens*.

Ряд азотсодержащих соединений, находящихся в воздухе над отвалами, например, упомянутые выше производные формаида, являются продуктами биотического превращения цианидов и роданидов. Дальнейшее изучение сезонной динамики азотсодержащих газов может дать информацию об интенсивности биодеградации отходов цианирования

в зависимости от времени года, что является актуальной задачей в условиях сибирского климата.

В результате трансформации остатков цианидов, входящих в состав отходов, формируются ароматические соединения: бензамид, N,N-диметил, фенол, бензонитрил,  $C_6H_5CN$ , бензилнитрил,  $C_7H_7CN$ , бензолпропаннитрил  $C_8H_9CN$ . Нитрилы ядовиты для человека из-за нарушения действия цитохромоксидазы и угнетения функции переноса кислорода из крови к клеткам. Токсическое действие проявляется как при вдыхании паров нитрила, так и при попадании внутрь через кожу или желудочно-кишечный тракт. Безусловный интерес вызывают механизмы образования таких соединений, сезонные колебания их концентраций, локализация зон наиболее активного дыхания, их связь с параметрами окружающей среды.

Описанные выше процессы необходимо учитывать при анализе состава воздуха над хвостохранилищами и прилегающими к ним территориями. Это важно из практических соображений с эколого-геохимической точки зрения, поскольку отвалы отходов добычи и переработки часто располагаются внутри населенных пунктов. Данные о составе воздуха (наивысшие измеренные значения) необходимо учитывать при разработке рекомендаций по безопасному обращению с этими и подобными отходами [Bortnikova et al., 2018].

Итак, показана сезонная и суточная вариабельность состава техногенной системы под воздействием факторов окружающей природной среды и биотических преобразований, определены основные закономерности эволюции экосистем Сибири.

**4. Сопоставление объемов техногенных экосистем, ресурсов цветных и благородных металлов в каждом из объектов, полученных в результате применения авторской геохимико-геофизической методики, с экологическими ущербами от загрязнения водных и земельных ресурсов и стоимостью природовосстановительных мероприятий указывают на целесообразность переработки с извлечением золота и барита (на примере Комсомольского хвостохранилища и Урских отвалов в Кемеровской области).**

Исследования подтвердили, что, во-первых, за внешним благополучием природно-техногенной системы стоят экологические риски. Несмотря на нейтральную среду стоков, концентрации токсичных элементов в таких растворах существенно выше нормативных, а потребление рыбы из таких водоёмов представляет опасность для здоровья (примером служат Комсомольское и Дарасунское хранилища). А во-вторых, степень трансформации техногенной системы и перехода к

природно-техногенной почти не коррелирует с потенциалом объекта в плане ресурсов ценных компонентов. Зачастую в рекультивированных естественным образом хранилищах перезахоранивается целый спектр цветных и благородных металлов, а также токсичных элементов (например, мышьяк и ртуть).

Объемы хранилищ варьируют от 720 (ТП) до 1800 (Шахтама) тыс. м<sup>3</sup>, в них содержится от 1.1 до 4.7 млн. тонн отходов, а их химический состав разнится, в первую очередь, за счёт специфики обрабатываемых руд (Таблица 2). Поэтому каждый из рассмотренных объектов уникален. Хвостохранилища переработки полиметаллических руд Салаирского рудного поля (Талмовские пески, ТП и Дюков Лог, ДЛ) характеризуются наиболее высокими суммарными концентрациями Cu, Zn, Cd, Pb, на этом же уровне (около 25 тыс. тонн) – суммарные ресурсы меди, цинка, кадмия и свинца – в Шахтаминском хранилище. Отличительная особенность хранилища Талмовские Пески – высокая концентрация цинка (19 тыс. т), в Дюковом Логу преобладает свинец (20 тыс. т), для Шахтаминского хранилища характерны большие ресурсы молибдена (4200 т.).

Хранилище первой стадии трансформации, Талмовские Пески – относительно небольшой объект (всего 1.6 млн. т), содержащий, однако, свыше 25 тыс. тонн Cu, Zn, Cd, Pb и 46 тонн золота и серебра суммарно [Юркевич и др., 2023]. Кислая реакция среды, минерализованные сульфатные растворы способствуют выщелачиванию спектра химических элементов, формированию геохимических аномалий в объектах окружающей среды (подземные воды, почвы, воды реки Малая Талмовая, снеговой покров). Хранилища первой стадии рекультивации (Дарасунское, Шахтаминское, Дюков Лог) содержат 2.3–4.7 млн. тонн отходов, их специфика – высокие суммарные концентрации Cu, Zn, Cd, Pb, Au, Ag. Дарасунское хранилище может рассматриваться как техногенное месторождение цветных и благородных металлов. Хранилище третьей группы, Комсомольское, относительно небольшое по объему, однако, отличается ресурсами золота, серебра, мышьяка, индия и ртути.

За внешним благополучием объекта, с нейтральной реакцией среды дренажных вод, невысокими концентрациями сульфатных ионов в поровых растворах, стоят значимые ресурсы как токсичных, так и ценных компонентов, что позволяет относить его к перспективным техногенным месторождениям.

Информация о доле водорастворимых форм элемента (Таблица 3) (на основании результатов лабораторных экспериментов) и его массе в хранилище позволяет оценить общий годовой сток с дренажными водами в речную сеть или подземные воды, что, в свою очередь, становится основой для расчёта ежегодного экологического ущерба. Например, в

Комсомольском хранилище содержится 1.2 т золота и 9135 т мышьяка, масса водорастворимого мышьяка - 1 тонна, ежегодный ущерб от загрязнения речных вод – 54 млн. руб. [Provornaya et al., 2020].

Стоимостная оценка природовосстановительных мероприятий в районе Комсомольского хвостохранилища с учетом дисконтирования составила 717 млн руб. При этом доходы от реализации оборудования и добытого золота составили 3.9 млрд руб. Суммарный экологический ущерб от деятельности Комсомольской золотоизвлекательной фабрики – 458.1 млн. руб. (2020 г.). Накопленный экологический ущерб от загрязнения р. Воскресенка составляет 294 млн руб. Экологический ущерб, нанесенный почвам, составил 164 млн руб. [Provornaya et al., 2020, 2021].

Результаты экономической оценки экологического ущерба от загрязнения подземных и поверхностных вод вследствие попадания в них дренажных вод с Урского отвала показали ежегодный ущерб в размере 243 млн. руб. Накопленный ущерб территории по причине загрязнения земельных ресурсов составляет 129 млн. руб. [Проворная и др., 2023].

Производство баритового концентрата из вещества Урских отвалов при помощи гравитации, обоснованных вариантах транспортировки и реализации конечным потребителям в принятых ценовых и налоговых условиях экономически эффективно [Мишенин, Юркевич и др., 2023].

Технико-экономический план работ по рекультивации техногенных объектов, предлагаемый в рамках этого исследования, состоит из следующих этапов [Еделев, Юркевич и др., 2022]:

- извлечение грунта, содержащего ценный компонент (золото или серебро), с поверхности объекта (глубина извлечения – 3 м);
- доставка извлеченного грунта на модульный обогатительный комплекс для извлечения золотого концентрата;
- выполаживание и террасирование, планировка дна котлована;
- выкладка 25 см плодородного слоя земли и выравнивание поверхности;
- внесение в почву дополнительных компонентов для более эффективной детоксикации почв и увеличения ее плодородия (биоугля, гидрогеля, бентонитов);
- создание защитного экрана.

В качестве решения задач по восполнению субстратов в почве было предложено нанесение гидропосевной смеси. Средний расход на 10000 м<sup>2</sup> – 140 кг. Стоимость внесения 1 кг эквивалента 679 руб. Следует отметить, что для начала проведения работ требуется урегулировать проблемы, связанные с отсутствием необходимой инфраструктуры. Такими ограничениями являются: отсутствие системы электроснабжения, водного канала и прожекторного освещения хвостохранилища. Ещё одним

обязательным пунктом в технико-экономическом обосновании рекультивационных мероприятий являлся расчет затрат на воспроизводство трудовых ресурсов.

Дополнительно требуется учесть и транспортные затраты, возможные расходы на ремонт оборудования (резерв составляет в среднем 10 % от первоначальной стоимости оборудования). В соответствии с технологией, определённой стандартом ГОСТ в качестве наилучшей, был составлен технико-экономический план рекультивационных работ [Еделев, Юркевич и др., 2022].

Таким образом, комплексный подход с применением геофизических, геохимических и эконометрических методов позволил определить объемы, рассчитать ресурсы и ущербы, соотнести эти величины и дать рекомендации по целесообразности переработки.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результатами работы являются: методика комплексного исследования хранилищ отходов горнорудного производства с применением геофизических и геохимических методов, научно-обоснованные рекомендации по оценке экологических ущербов, целесообразности переработки с извлечением ценных компонентов и перезахоронением токсичных остатков, рекультивации нарушенных земель, реестр хранилищ отходов горнорудного производства в Кемеровской области и Забайкальском крае с указанием местоположения, объемов, ресурсов ценных компонентов. Разработки направлены на решение фундаментальных вопросов миграции химических соединений в природно-техногенных системах, их гипергенной трансформации. Значимость работы для РФ заключается в создании научно обоснованной схемы экспертной оценки экологической опасности складирования отходов при добыче сульфидсодержащих руд с учетом экономической составляющей. Найденные новые решения имеют ряд преимуществ и выгодно отличаются от известных.

Предложенный оригинальный подход к изучению техногенных экосистем позволяет описать их латеральную зональность по степени окисленности вещества и сделать оценку опасности объектов. Основным фактором потенциальной опасности отвала и вероятности его естественной рекультивации является кислотность и уровень минерализации стоков, которые в свою очередь зависят от исходного состава руды (соотношение содержания сульфидной серы и карбонатного углерода), добавок химических реагентов при обогащении руд и тех мер, которые были приняты на производстве при проектировании хранилищ отходов.

Существует слабая обратная корреляционная взаимосвязь степени трансформации отвала с его возрастом. Так, один из самых старых из рассмотренных Урской отвала (1920-30 гг.), складированный стихийно в берёзовой роще, без противодиффузионных или рекультивационных мер в наименьшей степени подвергся естественной ремедиации, и на сегодняшний день подножье отвала и дренажная долина выглядят как изъеденная кислотой заболоченная плоскость с остатками корневой системы деревьев. Одно из самых «молодых» хранилищ – Комсомольское (1990-е гг.) – пример «визуально благополучных», поросших растительностью техногенных объектов.

Авторский алгоритм, основанный на комплексировании геохимических и геофизических методов анализа, позволяет достоверно описать вертикальную зональность техногенной экосистемы, оценить распределение валовых и подвижных форм элементов, что в свою очередь используется для установления механизмов миграции вещества. Применение метода электротомографии позволило оконтурить техногенные системы, определить их геоэлектрическую зональность, выявить пути фильтрации дренажных вод за пределы дамб и рассчитать объемы техногенного материала в хранилищах. Так, например, совокупный объем хвостов в хранилище Дюков Лог составляет 1600000 м<sup>3</sup> или 4.1 млн. тонн. Общий ресурс мышьяка в хранилище - 23000 тонн. Масса водорастворимого As, то есть подвижного при взаимодействии с атмосферными водами, составляет 35 тонн, то есть именно такое количество мышьяка потенциально перейдет в раствор под воздействием окислительных факторов, что будет способствовать загрязнению окружающей среды в течение длительного времени.

Предложенный подход позволил впервые провести сравнительный анализ ресурсов ценных и токсичных компонентов в разновозрастных хранилищах отходов. Показано, что хранилища отходов переработки руд Салаирского рудного поля (Талмовские Пески и Дюков Лог) и Комсомольской золотоизвлекательной фабрики (пос. Комсомольск) общей массой 7 млн. тонн содержат широкий спектр цветных и благородных металлов с отношениями концентраций элемента к таковой в полиметаллических рудах в диапазоне от 10 до 100, в том числе (тонн): 27000 - Zn, 50 - In, 33 - Hg, 22 - Se, 9.6 - As, 8.4 - Sb. Сравнивая содержание этих элементов с их годовой добычей (Annual Production, <https://www.usgs.gov/centers/nmic/commodity-statistics-and-information>), получаем цифры, свидетельствующие о потенциальной возможности рентабельного извлечения полезных компонентов. По самым скромным подсчетам, три небольших заброшенных хранилища отходов на

территории Кемеровской области содержат до 26 % мышьяка от его годовой добычи и 7,6 % In.

Предложенный эконометрический подход позволяет производить расчёт экологического ущерба и рентабельности вторичной переработки отходов. Так, впервые установлено, что общая оценка экологического ущерба со стороны складированных отходов Комсомольского золотоизвлекательного завода составляет 464 млн. рублей. Ресурсы пяти ценных компонентов в Комсомольских отходах составляют (тонн): 4300 Cu, 1900 Zn, 1240 Pb, 87 Ni, 9.9 Ag, что при современных ценах на эти цветные металлы составляет около 4 млрд. рублей, что в 10 раз превышает накопленный экологический ущерб. Стоимость рекультивационных мероприятий с применением комплекса мер составит 717 млн. рублей, стоимость очистки воды реагентными методами – 0.5-4.1 млн. рублей, ожидаемая прибыль -3.2 млрд. рублей.

Комплексный подход на основе геофизических методов (электротомография, аэрофотосъемка, построение цифровой модели рельефа) с верификацией гидрохимическим, геохимическим опробованием и результатами термодинамического моделирования позволил повысить точность определения объёмов техногенных тел и описания процессов переноса химических элементов с водными потоками: растворение минеральной матрицы отходов, выщелачивание химических соединений, формирование дренажа и, как следствие, 1) его инфильтрация в грунты, поступление в горизонт грунтовых вод, 2) поверхностный сток в речную систему. Зачастую водный перенос элементов осуществляется сразу по двум механизмам.

Впервые проведен сравнительный анализ техногенных объектов в различных по степени трансформации группах, составлен реестр хранилищ с оценкой ресурсов токсичных и полезных компонентов (цветных и благородных металлов). Рассмотренные техногенные системы можно разделить на три группы по степени трансформации: 1) начальная - ярко выражена эрозия почв вблизи отвала, растительность уничтожена кислыми стоками, отсутствует естественное озеленение поверхности хранилища (Урской отвал, Талмовские пески); 2) первая - на поверхности объектов формируется почвенный слой (Дюков лог, Дарасунское, Шахтаминское); 3) вторая - на поверхности отвала хорошо развита растительность, но почвенный слой расположен в основном по бортам и дамбам хранилища (Комсомольский гидроотвал).

Рассмотрены основные факторы, влияющие на выбор рекультивационных мероприятий в районе складированных отходов горнорудного производства, расположенных в резко-континентальных климатических условиях, с учётом экономической эффективности. При

рекультивации складированных отходов целесообразно использовать подходы, направленные как на самовосстановление природы, так и на формирование нового ландшафта.

Дальнейшая работа в этом направлении связана с инвентаризацией и паспортизацией техногенных систем, расчетом экономической целесообразности и экологического ущерба для выбора будущей стратегии и технологий переработки и перезахоронения. Чрезвычайно актуальны работы по повышению точности экспертизы (установление класса опасности с прогнозными оценками), повышению эффективности технологий извлечения металлов с использованием экологически безопасных материалов, разработке проектов рекультивационных мероприятий с учетом экологических ущербов, ресурсов ценных и токсичных компонентов.

Подобного рода работы по комплексному применению геофизических, геохимических и эконометрических методов открывают перспективы изучения совокупного химического и теплового загрязнения окружающей среды в районе складированных отходов горно-обогатительных предприятий, что становится особенно актуальным для объектов, расположенных в зоне развития многолетнемерзлых пород, в решении задач промышленной и экологической безопасности, при изучении различных аспектов климатологических и экологических исследований.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи в рецензируемых журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы результаты диссертаций**

1. **Юркевич, Н.В.** Ресурсы барита, цветных и благородных металлов в хвостохранилище Талмовские Пески: минералого-геохимические и геофизические данные / Н.В. Юркевич, А.Ш. Хусаинова, С.Б. Бортникова, В.П. Бондаренко, Ю.Г. Карин, С.П. Коханова // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – № 3(55). – С. 105-114.
2. Черный, Н. К. Особенности подвижности меди при переходе из клинкеров Беловского цинкового завода (Кемеровская область) в водный раствор / Н.К. Черный, **Н. В. Юркевич**, С. Б. Бортникова, К. Ю. Тулисова, Т. А. Кулешова // Экология и промышленность России. – 2023. - № 27(6). – С. 24-29.
3. **Yurkevich, N.** Hydrochemical Anomalies in the Vicinity of the Abandoned Molybdenum Ores Processing Tailings in a Permafrost Region (Shahtama, Transbaikal Region) / N. Yurkevich, V. Olenchenko, A. Kartoziia,

- T. Korneeva, S. Bortnikova, O. Saeva, K. Tulisova, N. Abrosimova // *Water*. – 2023. – Т. 15. – № 8. – С. 1476.
4. Volynkin, S.S. Determination of Arsenic Species Distribution in Arsenide Tailings and Leakage Using Geochemical and Geophysical Methods / S.S. Volynkin, S.B. Bortnikova, **N.V. Yurkevich**, O.V. Shuvaeva, S.P. Kohanova // *Applied Sciences*. – 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 1067.
5. **Yurkevich, N.** Current State of the Gold Mining Waste from the Ores of the Ursk Deposit (Western Siberia, Russia) / N. Yurkevich, P. Osipova, L. Tsibizov, E. Tsibizova, I. Fadeeva, S. Volynkin, K. Tulisova, T. Kuleshova // *Applied Sciences*. – 2022. – Т. 12. – № 20. – С. 10610.
6. Бортникова, С.Б. Летучесть химических элементов при дегидрации вторичных сульфатов / С.Б. Бортникова, Н.А. Абросимова, А.Ю. Девятова, Е.П. Шевко, **Н.В. Юркевич**, Н.К. Черный, И.В. Даниленко, Н.А. Пальчик // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С.121-133.
7. **Yurkevich, N.** Modeling the Process of Thawing of Tailings Dam Base Soils by Technological Waters / N. Yurkevich, I. Fadeeva, E. Shevko, A. Yannikov, S. Bortnikova // *Applied Sciences*. – 2021. – Т. 11. – № 23. – С. 11089.
8. Бортникова, С.Б. Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область) / С.Б. Бортникова, **Н.В. Юркевич**, А.В. Еделев, О.П. Саева, С.П. Грахова, С.С. Волынкин, Ю.Г. Карин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 26-35.
9. **Yurkevich, N.V.** Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography and Soil-Gas Measurements on Abandoned Mine Tailings Under a Highly Continental Climate, Western Siberia, Russia / N.V. Yurkevich, S.B. Bortnikova, V.V. Olenchenko, T.A. Fedorova, Y.G. Karin, A.V. Edelev, P.S. Osipova, O.P. Saeva // *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. – 2021. – Т. 26. – № 3. – С. 227-237.
10. Bortnikova, S. Gas Anomalies in the Air Above the Sulfide Tailings and Adjacent Soils in Komsomolsk Settlement (Kemerovo Region, Russia) / S. Bortnikova, A. Devyatova, **N. Yurkevich**, S. Grakhova, A. Ogudov, N. Zubtsovskaya, A. Edelev, S. Volynkin // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2021. – Т. 232. – № 10. – С. 1-11.
11. **Yurkevich, N.** Cyanides, Arsenic, and Noble Metals in Abandoned Gold Ore Cyanidation Tailings and Surface Waters in a Permafrost Region (Transbaikal Territory, Russia) / N. Yurkevich, V. Olenchenko, S. Bortnikova, O. Saeva, T. Korneeva // *Mine Water and the Environment*. – 2021. – Т. 40. – № 4. – С. 943-955.

12. Bortnikova, S.B. Arsenic and metal quantities in abandoned arsenide tailings in dissolved, soluble, and volatile forms during 20 years of storage / S.B. Bortnikova, **N.V. Yurkevich**, O.L. Gaskova, S.S. Volynkin, A.V. Edelev, S.P. Grakhova, O.I. Kalnaya, A.Sh. Khusainova, M.P. Gora, A.A. Khvashchevskaya, O.P. Saeva, V.A. Podolynnaya, V.V. Kurovskaya // *Chemical Geology*. – 2021. – T. 586. – C. 120623.
13. Bortnikova, S.B. Element transfer by a vapor-gas stream from sulfide mine tailings: from field and laboratory evidence to thermodynamic modeling / S.B. Bortnikova, **N.V. Yurkevich**, O.L. Gaskova, A.Y. Devyatova, I.I. Novikova, S.S. Volynkin, A.V. Mytsik, V.A. Podolinnaya // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – T. 28. – № 12. – C. 14927-14942.
14. Olenchenko, V.V. Electrical Resistivity Dynamics Beneath the Weathered Mine Tailings in Response to Ambient Temperature / V.V. Olenchenko, P.S. Osipova, **N.V. Yurkevich**, S.B. Bortnikova // *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*. – 2020. – T. 25. - № 1. – C. 55-63.
15. Bortnikova, S. Chemical treatment of highly toxic acid mine drainage at a gold mining site in Southwestern Siberia, Russia / S. Bortnikova, O. Gaskova, **N. Yurkevich**, O. Saeva, N. Abrosimova // *Minerals*. – 2020. – T. 10. – № 10. – C. 867.
16. Bortnikova, S. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste / S. Bortnikova, **N. Yurkevich**, A. Devyatova, O. Saeva, O. Shuvaeva, A. Makas, M. Troshkov, N. Abrosimova, M. Kirillov, T. Korneeva, T. Kremleva, N. Fefilov, G. Shigabaeva // *Science of the Total Environment*. – 2019. – T. 647. – C. 411-419.
17. Bortnikova, S. Gas transfer of metals during the destruction of efforescent sulfates from the Belovo plant sulfide slag, Russia / S. Bortnikova, N. Abrosimova, **N. Yurkevich**, V. Zvereva, A. Devyatova, O. Gaskova, O. Saeva, T. Korneeva, O. Shuvaeva, N. PalChik, V. Chernukhin, A. Reutsky // *Minerals*. – 2019. – T. 9. – № 6. – C. 344-344.
18. **Yurkevich, N.** Sulfur and Nitrogen Gases in the Vapor Streams from Ore Cyanidation Wastes at a Sharply Continental Climate, Western Siberia, Russia / N. Yurkevich, S. Bortnikova, N. Abrosimova, A. Makas, V. Olenchenko, N. Yurkevich, A. Edelev, O. Saeva, A. Shevko // *Water, Air, and Soil Pollution*. – 2019. – T. 230. – № 12. – C. 307.
19. Bortnikova, S. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste / S. Bortnikova, **N. Yurkevich**, A. Devyatova, O. Saeva, O. Shuvaeva, A. Makas, M. Troshkov, N. Abrosimova, M. Kirillov, T. Korneeva, T. Kremleva // *Science of the Total Environment*. – 2019. – T. 647. – C. 411-419.
20. Bortnikova, S. Characterization of a gold extraction plant environment in assessing the hazardous nature of accumulated wastes (Kemerovo region,

Russia) / S. Bortnikova, V. Olenchenko, O. Gaskova, **N. Yurkevich**, N. Abrosimova, E. Shevko, L. Eder // *Applied Geochemistry*. – 2018. – Т. 93. – С. 145-157.

21. Bortnikova, S.B. Assessment of emissions of trace elements and sulfur gases from sulfide tailings / S.B. Bortnikova, **N.V. Yurkevich**, N.A. Abrosimova, A.Y. Devyatova, A.V. Edelev, A.L. Makas, M.L. Troshkov // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2018. – Т. 186. – С. 256-269.

22. Korneeva, T.V. Geochemical modeling of heavy metals behavior in technogenic systems / T.V. Korneeva, **N.V. Yurkevich**, O.P. Saeva // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 89-101.

23. Эпов, М.И. Определение состава горно-рудных отходов геохимическими и геофизическими методами (на примере хвостохранилища Салаирского горно-обогатительного комбината) / М.И. Эпов, **Н.В. Юркевич**, С.Б. Бортникова, Ю.Г. Карин, О.П. Саева // *Геология и геофизика*. – 2017. – Т. 58. – № 12. – С. 1944-1954.

24. Korneeva, T.V. Geochemical features of migration flows in the impact zone of mining technogenesis (Mednogorsk) / T.V. Korneeva, **N.V. Yurkevich**, P.G. Aminov // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. – 2017. – Т. 328. – № 2. – С. 85-94.

25. **Yurkevich N.V.** Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area / N.V. Yurkevich, N.A. Abrosimova, S.B. Bortnikova, Y.G. Karin, O.P. Saeva // *Toxicological & Environmental Chemistry*. – 2017. – Т. 99. – № 9-10. – С. 1328-1345.

26. **Yurkevich, N.V.** Geochemical anomalies in two sulfide-bearing waste disposal areas: Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, and As in contaminated waters and snow, Kemerovo and Chelyabinsk regions, Russia / N.V. Yurkevich, O.P. Saeva, Y.G. Karin // *Toxicological & Environmental Chemistry*. – 2015. – Т. 97. – № 1. – С. 1-14.

27. Саева, О.П. Определение эффективности нейтрализации кислого дренажа геохимическими барьерами на основе природных материалов с помощью метода РФА-СИ / О.П. Саева, **Н.В. Юркевич**, В.Г. Кабанник, Ю.П. Колмогоров // *Известия РАН. Серия физическая*. – 2013. – Т. 77. – № 2. – С. 236-239.

28. **Yurkevich, N.V.** As mobility in two mine tailings drainage systems and its removal from solution by natural geochemical barriers / N.V. Yurkevich, O.P. Saeva, N.A. Pal'chik // *Applied geochemistry*. – 2012. – Т. 27. – С. 2260-2270.

29. **Юркевич, Н.В.** Осаждение металлов, мышьяка и сурьмы из дренажного потока на карбонатном барьере по данным анализа РФА-СИ / Н.В. Юркевич, С.Б. Бортникова, С.А. Лапицкий, М.А. Фроликова,

Ю.П. Колмогоров, О.П. Саева // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2008. – № 11. – С. 52-56.

30. **Ожерельева\***, **Н.В.** Исследование взаимодействия воды с высокосульфидными отходами Карабашского медеплавильного комбината (Челябинская область) / Н.В. Ожерельева\*, С.Б. Бортникова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2006. – № 4. – С. 403-412.

### Монография / глава в монографии

31. Рихванов, Л.П. Биогеохимический мониторинг в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом микробиологических факторов трансформации минеральных компонентов / Л.П. Рихванов, Н.А. Абросимова, Н.В. Барановская, Л.Н. Белан, Т.С. Большунова, С.Б. Бортникова, Е.А. Горбатюк, М.А. Густайтис, А.В. Еделев, А.М. Межибор, И.Н. Мягкая, Б.Р. Соктоев, Д.В. Юсупов, С.М. Жмодик, Н.В. Ишук, И.С. Кириченко, Д.В. Наркович, Е.В. Лазарева, В.В. Оленченко, О.П. Саева, Ю. Сарыг-оол Багай-оол, Т.В. Усманова, **Н.В. Юркевич** – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 437 с.

### Материалы зарубежных конференций

32. **Yurkevich, N.** Electrical resistivity tomography at the "roll along" profile in comparison with geochemical testing of the tailing dump (Salair, Kemerovo region) / N. Yurkevich, S. Grakhova, T. Fedorova, D. Kucher // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (8-11 September, Online). – IOP Publishing, 2021. – Т. 823. – №. 1. – С. 012051.

33. Provornaya, I. Economic assessment of a complex of measures for the remediation of the territory from technogenic impact / I. Provornaya, I. Filimonova, **N. Yurkevich**, V. Nemov, M. Mishenin // E3S Web of Conferences. SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference, KOGS 2019 (13-16 October, Online). – EDP Sciences, 2021. – Т. 265. – С. 04017.

34. Osipova, P. Resource evaluation of valuable and toxic tailing components by electrotomography data and geochemical sampling / P. Osipova, **N. Yurkevich**, V. Olenchenko // EAGE. Engineering and Mining Geophysics 2021: Conference Proceeding (26-30 April, Online). – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – Т. 2021. – С. 1-5.

35. Karin, Y. Integration of electrical prospecting methods and geochemical testing for the construction of tailing dumps models / Y. Karin, S. Bortnikova, **N. Yurkevich** // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management (SGEM 2020) (16-25 August, Albena, Bulgaria): Conference Proceedings. – STEF92 Technology, 2020. – Т. 2020. – № 1.2. – С. 607-613.

36. **Yurkevich, N.** Abandoned mine wastes (Kemerovo region, Russia): Resources of toxic and valuable components / N. Yurkevich, S. Bortnikova, N. Yurkevich // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management (SGEM 2020) (18-24 August, Albena, Bulgaria): Conference Proceedings. – STEF92 Technology, 2020. – T. 2020. – № 5.1. – C. 19-25.
37. Provornaya, I.V. Mine Tailings: Environmental Damage and Resource Potential / I.V. Provornaya, **N.V. Yurkevich**, Y.A. Dzuba // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (8-11 September, Online). – IOP Publishing, 2021. – T. 459. – № 2. – C. 022084.
38. Provornaya, I.V. Economic assessment of environmental damage and recovery plan for gold mining wastes / I.V. Provornaya, **N.V. Yurkevich**, I.V. Filimonova, T.D. Kalgashkina // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management (SGEM 2020) (18-24 August, Albena, Bulgaria): Conference Proceedings. – STEF92 Technology, 2020. – T. 2020. – № 5.2. – C. 195-202.
39. **Yurkevich, N.** Electrical resistivity tomography at the “roll along” profile in comparison with geochemical testing of the tailing dump (Salair, Kemerovo region) / N. Yurkevich, S. Grakhova, T. Fedorova, D. Kucher // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (8-11 September, Online). – IOP Publishing, 2021. – T. 823. – № 1. – C. 012051.
40. Grakhova, S. Analysis of potentially hazardous gas concentrations near berikul dump reburial (Komsomolsk, Western Siberia, Russia) / S. Grakhova, S. Bortnikova, **N. Yurkevich**, A. Edelev // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying, Geology and Mining, Ecology and Management (SGEM 2020) (18-24 August, Albena, Bulgaria): Conference Proceedings. – STEF92 Technology, 2020. – T. 2020. – № 5.1. – C. 59-66.
41. Provornaya, I. Economic assessment of a complex of measures for the remediation of the territory from technogenic impact / I. Provornaya, I. Filimonova, **N. Yurkevich**, V. Nemov, M. Mishenin // E3S Web of Conferences (22-24 April, Moscow). – EDP Sciences, 2021. – T. 265. – C. 04017.
42. Osipova, P. Resource Evaluation of Valuable and Toxic Tailing Components by Electrotomography Data and Geochemical Sampling / P. Osipova, **N. Yurkevich**, V. Olenchenko // Engineering and Mining Geophysics 2021. European Association of Geoscientists & Engineers. (26-30 April, Online). – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – T. 2021. – №. 1. – C. 1-5.
43. Abrosimova, N. Treatment of neutral mine waters from metals and metalloids / N. Abrosimova, O. Saeva, **N. Yurkevich**, S. Bortnikova // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology

and Mining Ecology Management, SGEM (29<sup>th</sup> of June – 5<sup>th</sup> of July, Albena, Bulgaria). – STEF92 Technology, 2017. – T. 17. – № 51. – C. 1033-1040.

44. **Yurkevich, N.** A geophysical and geochemical study of the Shahtama molybdenum mine tailings deposit (Transbaikal kray, Russia) / N. Yurkevich, V. Olenchenko, O. Saeva, D. Manzirev // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM (29<sup>th</sup> of June – 5<sup>th</sup> of July, Albena, Bulgaria). – STEF92 Technology, 2017. – T. 17. – № 14. – C. 3-10.

45. **Yurkevich, N.** Study of water-rock interaction in sulfide mining tailings using geochemical and geoelectrical methods / N. Yurkevich, S. Bortnikova, V. Olenchenko, N. Abrosimova, O. Saeva, Y. Karin // 15th Water-Rock Interaction International Symposium, WRI-15 (16-21 October, Evora, Portugal). – Procedia Earth and Planetary Science, 2017. – T. 17. – C. 112-115.

46. **Yurkevich, N.V.** Geochemical Anomalies in Sulfide-Bearing Waste Disposal Areas, Kemerovo and Chelyabinsk Regions Russia / N.V. Yurkevich, O.P. Saeva, Y.G. Karin, I.V. Provornaya, D.O. Kucher // Proceedings of the International Conference Goldshmidt 2015 (16-21 August, Prague, Czech Rep.). – 2015.

47. Korneeva, T. A geochemical and geophysical characterization of acid mine drainage and sulfide tailings at Karabash mine site (South Ural, Russia) / T. Korneeva, **N. Yurkevich**, D. Kucher, O. Saeva // 18th International Conference on Natural Science and Environment (ICNSE) 2015 (25 August, Berlin, Germany). – Int. J. Adv. Sci. Eng. Technol., 2016. – T. 4. – C. 114-120.

48. **Yurkevich, N., Saeva, O.** Geochemical processes in mine tailings: modeling of water-rock interactions and ways of treatment // Proceedings of the 3rd International CEMEPE & SECOTOX Conference (19-24 June, Skiathos, Greece). – 2011. – C. 495-501.

49. Korneeva, T. Impact of acid and neutral mine drainages on the river basins of Mednogorsk geotechnical system (South Ural, Russia) / T. Korneeva, **N. Yurkevich**, P. Aminov // Proceedings of the 3rd International CEMEPE & SECOTOX Conference (19-24 June, Skiathos, Greece). – 2011. – C. 355-361.

50. **Yurkevich, N., Saeva, O.** Geochemical processes in mine tailings: modeling of water-rock interactions and ways of treatment // Proceedings of the international conference «Problems of ecology in mineral industry» (28<sup>th</sup> of August – 1<sup>st</sup> of September, Varna, Bulgaria). – 2011. – C. 384-389.

51. **Yurkevich, N.V., Saeva, O.P.** Pit lakes in Kuzbass, Russia: the ecological risk assesment and the ways of treatment // International Water Technology Conference (31<sup>st</sup> of March – 2<sup>nd</sup> of April, Alexandria, Egypt). – 2011. – C. 78.

52. **Yurkevich, N.V.**, Saeva, O.P. Water-rock interaction modeling for mine tailings in Kemerovo and Cheljabinsk regions, Russia // Water-Rock Interaction Conference (16-20 August, Guanajuato Mexico). – 2010. – С. 565-568.

### **Материалы российских конференций**

53. Проворная, И.В. Оценка экологического ущерба от загрязнения водных и земельных ресурсов на примере Урских отвалов Глобальные вызовы и национальные экологические интересы: экономические и социальные аспекты / Проворная, И.В., **Юркевич Н.В.**, Мишенин М.В. // Сборник материалов XVII международной научно-практической конференции Российского общества экологической экономики. (3-8 июля, г. Новосибирск) – ИЭиОП СО РАН, 2023. – С. 318-325.

54. Тулисова, К.Ю. Моделирование процесса растворения грунтов основания дамбы гидротехнического сооружения атмосферными водами / К.Ю. Тулисова, Т.А. Кулешова, А.М. Янников, **Н.В. Юркевич** // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVII международной научной конференции (19-21 мая г. Новосибирск). – ИНГГ СО РАН, 2021. – Т. 2. – № 3. – С. 10-15.

55. Карин, Ю.Г., **Юркевич, Н.В.** Подход к обработке данных электротомографии для оценки объемов веществ хвостохранилищ. Интерэкспо ГЕО-Сибирь – "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVII международной научной конференции (19-21 мая, г. Новосибирск). – ИНГГ СО РАН, 2021. – Т. 2. – № 2. – С. 62-66.

56. Карин, Ю.Г. Геоэлектрические модели хвостохранилищ по геофизическим и геохимическим данным / Ю.Г. Карин, **Н.В. Юркевич**, П.С. Осипова, И.Н. Ельцов // Трофимуковские чтения-2017: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых (8-10 октября, г. Новосибирск). – ИНГГ СО РАН, 2017. – С. 249-252.

57. **Юркевич, Н.В.** Оценка современного состояния хвостохранилища золоторудного производства: ценные и токсичные компоненты / Н.В. Юркевич, С.Б. Бортникова, В.В. Оленченко, И.В. Проворная, О.П. Саева // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XIII международной научной конференции (17-21 апреля, г. Новосибирск). – ИНГГ СО РАН, 2017. – Т. 2. – № 4. – С. 113-117.

58. **Юркевич, Н.В.** Состав отвала Белоключевского месторождения золота по данным электромагнитного сканирования и геохимического опробования / Н.В. Юркевич, Ю.Г. Карин, Т.А. Кулешова // Труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных (3-7 апреля, г. Томск). – ТПУ, 2017. – Т. 1. – С. 853-855.
59. **Юркевич, Н.В.** Формы миграции химических элементов из сульфидных отходов горнодобывающей промышленности / Н.В. Юркевич, О.Л. Гаськова, О.П. Саева, Т.В. Корнеева // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы X международной научной конференции (8-18 апреля, г. Новосибирск). – ИНГГ СО РАН, 2014. – Т. 2. – № 3. – С. 163-169.
60. **Юркевич, Н.В.** Химический состав снегового покрова в зоне влияния промышленных предприятий: источники загрязнения и формы переноса элементов / Н.В. Юркевич, О.П. Саева, Е.П. Бессонова, С.Б. Бортникова, Н.А. Абросимова, А.Ю. Девятова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы X международной научной конференции (8-18 апреля, г. Новосибирск). – ИНГГ СО РАН, 2014. – Т. 2. – № 3. – С. 169-174.
61. **Юркевич, Н.В.** Направления подземного и поверхностного стоков с хвостохранилищ горнорудного производства по данным геофизических и геохимических исследований / Н.В. Юркевич, С.Б. Бортникова, О.П. Саева // Интерэкспо ГЕО-Сибирь – "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XI международной научной конференции (13-25 апреля, г. Новосибирск). – ИНГГ СО РАН, 2015. – Т. 2. – № 2. – С. 305-310.
62. Корнеева, Т.В. Характеристика осадкообразования в водотоках под воздействием отходов обогащения колчеданных руд (г. Карабаш, Южный Урал) / Т.В. Корнеева, **Н.В. Юркевич**, О.П. Саева // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам VIII науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых с междунар. участием) (23-26 апреля, г. Пермь). – ПГНИУ, 2015. – Т.2. – С. 285-288.
63. **Юркевич, Н.В.** Определение состава отходов горнорудного производства при помощи РФА-СИ и геофизических методов исследования / Н.В. Юркевич, С.Б. Бортникова, Ю.Г. Карин, О.П. Саева // Сборник XX Национальной конференции по использованию Синхротронного Излучения "СИ-2014" (7-10 июля, г. Новосибирск). – ИЯФ СО РАН, 2014. – С. 93-94.

64. Бортникова, С.Б. Исследование с использованием метода РФА-СИ взаимодействия «вода-отходы» на примере трех контрастных хвостохранилищ Хову-Аксинское – Комсомольское – Карабашское / С.Б. Бортникова, О.Л. Гаськова, О.П. Саева, **Н.В. Юркевич** // Сборник XX Национальной конференции по использованию Синхротронного Излучения "СИ-2014" (7-10 июля, г. Новосибирск). – ИЯФ СО РАН 2014. – С. 69.

65. **Юркевич, Н.В.** Хвостохранилища горнорудного производства: построение связи между данными геофизической съемки и химическим составом (на примере отходов Салаирского горно-обогатительного комбината, г. Салаир) / Н.В. Юркевич, Ю.Г. Карин, О.П. Саева // Труды Всероссийской конференции с участием иностранных ученых "Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами" (1-5 октября, г. Томск). – Томск: Издательство научно-технической литературы, 2012. – С. 283-287.

Технический редактор Т.С. Курганова

---

Подписано в печать 02.07.2024

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 2,0. Тираж 115. Зак. № 231

---

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3.

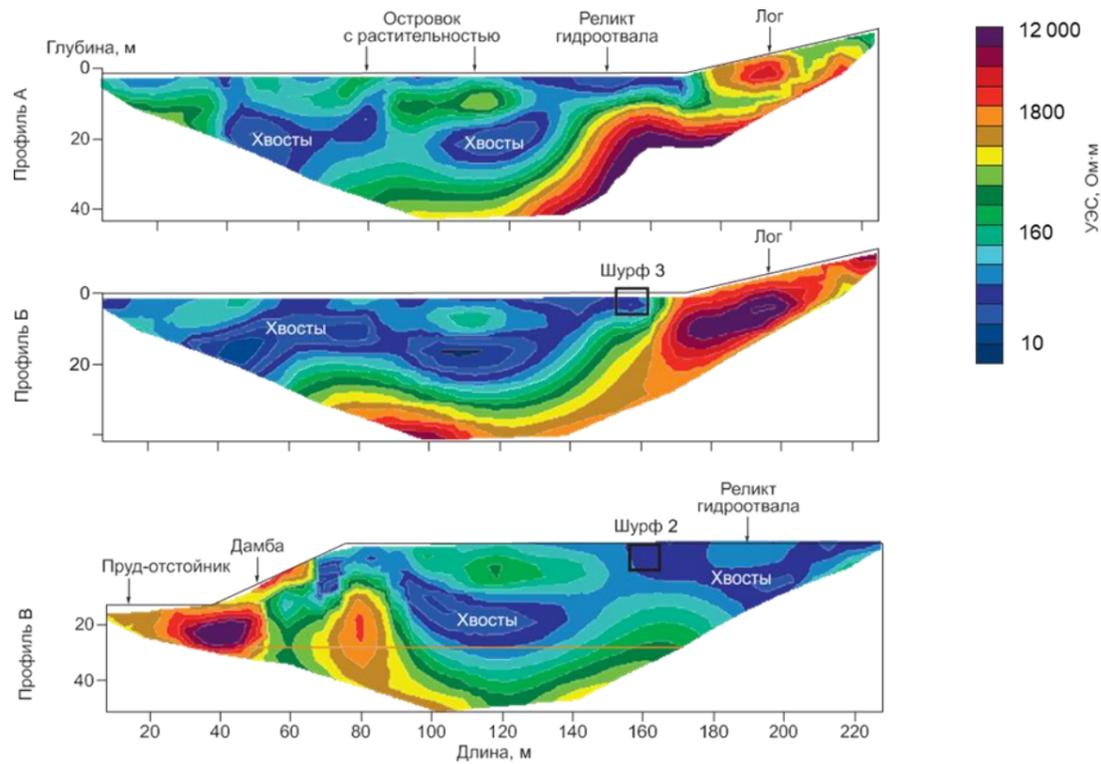


Рисунок 1 – Геоэлектрические разрезы отвала Дюков Лог по профилям электротомографии

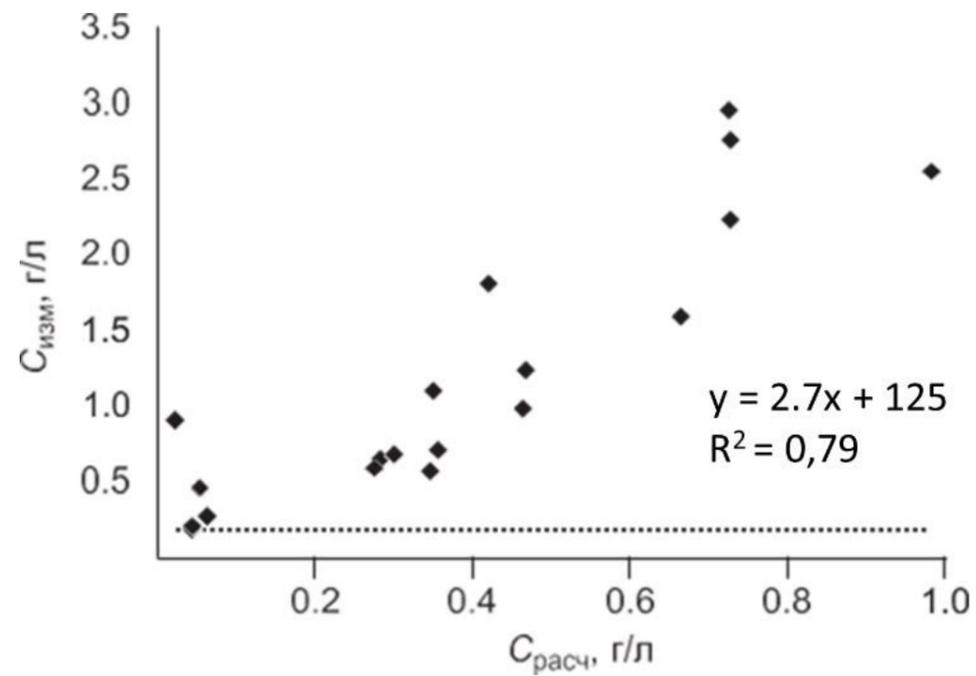


Рисунок 3 – Сопоставление расчетной ( $C_{расч}$ ) и измеренной ( $C_{изм}$ ) минерализаций водных вытяжек

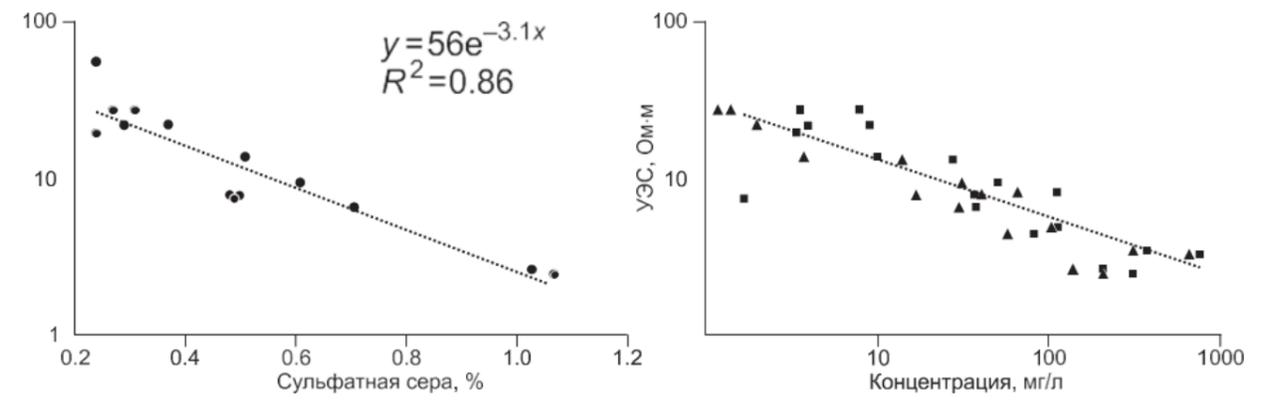


Рисунок 2 – Связь УЭС, содержания сульфатной серы в твердом веществе (1), суммарных концентраций металлов (2) и цинка (3) в водных вытяжках отходов хвостохранилища

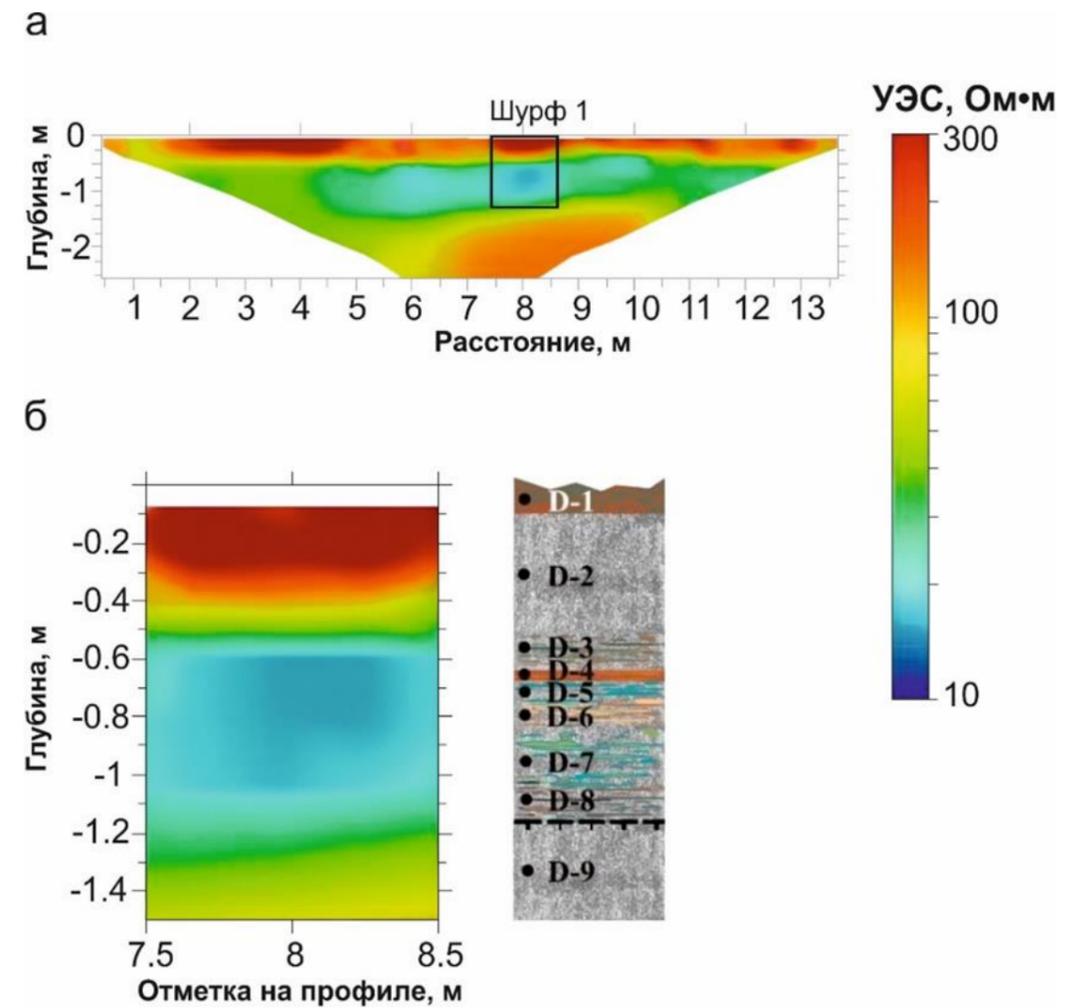


Рисунок 4 – Геоэлектрический разрез по профилю микроэлектротомографии (а), сопоставление фрагмента геоэлектрического разреза (б слева) с описанием шурфа (б справа)

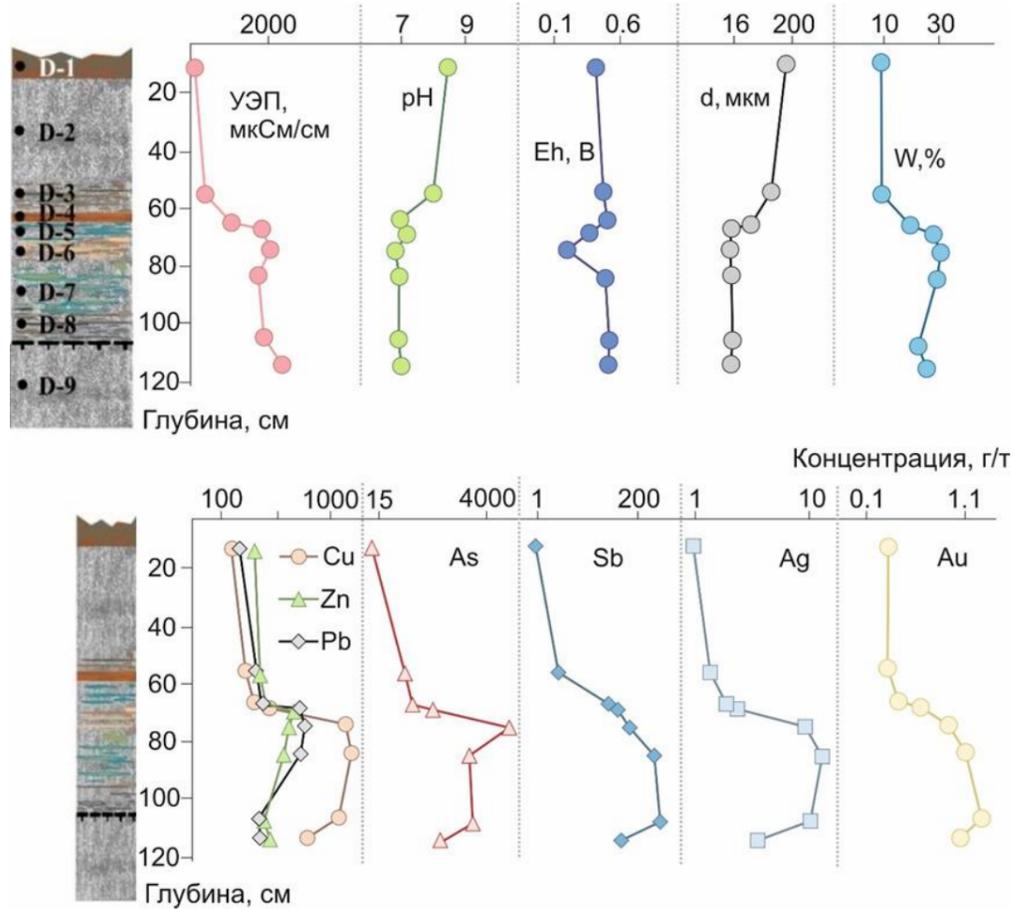


Рисунок 5 – Распределение физико-химических параметров, среднего диаметра частиц (d, мкм), влажности вещества (W, %) и концентраций химических элементов в твёрдом веществе по глубине шурфа из Дарасунского хвостохранилища



Рисунок 8 – Принципиальная схема строения Урской дренажной системы: распределение зон окисления, выщелачивания и смешения

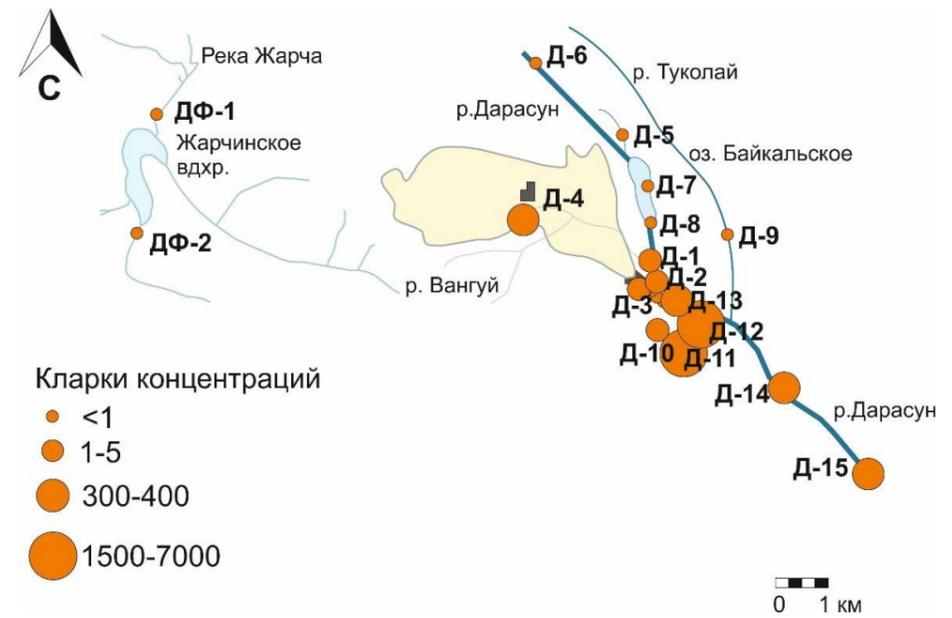


Рисунок 6 – Кларки концентраций (КК) растворенного Au в дренаже (D-1 ÷ D-4), технологических прудах (D-11 ÷ D-13), р. Дарасун до (D-6 ÷ D-8, D-10) и после впадения дренажа (D-14 ÷ D-15), фоновые точки (DΦ-1 ÷ DΦ-2)

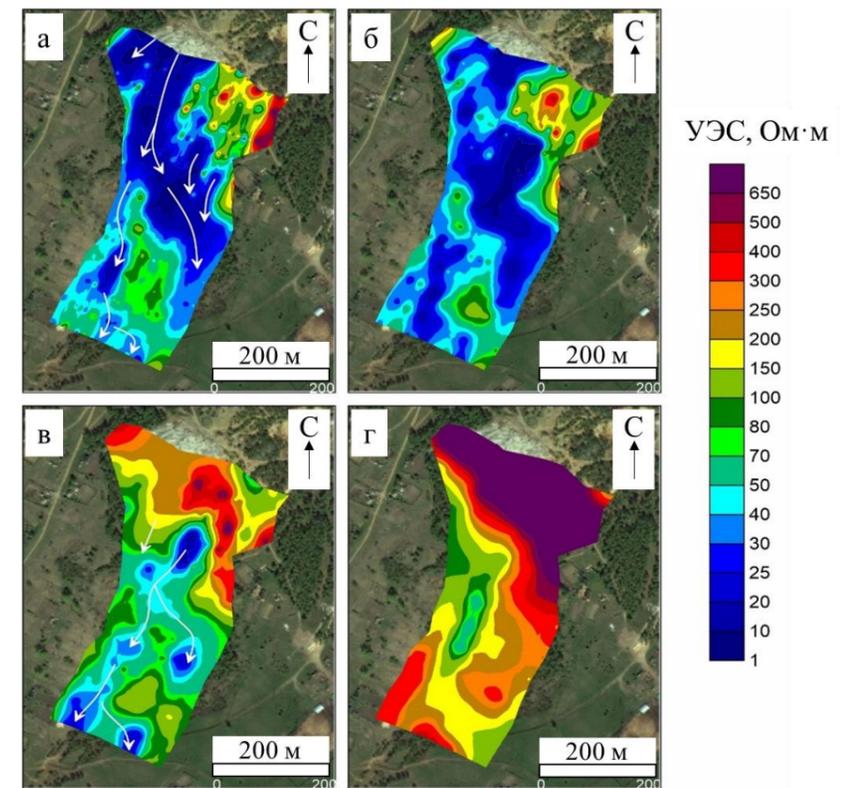


Рисунок 7 – Карты распределения УЭС среды в исследуемой области на глубине 1 (а), 8.5 (б), 15.5 (в) и 30.5 м (г). Белые стрелки означают направления поверхностного дренажа

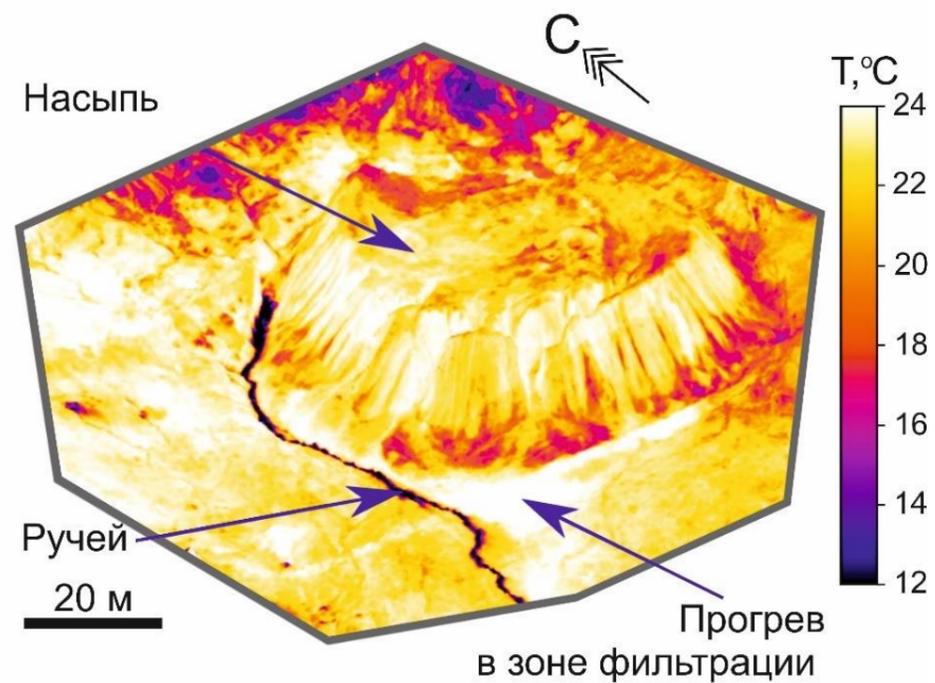


Рисунок 9 – Цифровая модель температуры поверхности Урского отвала

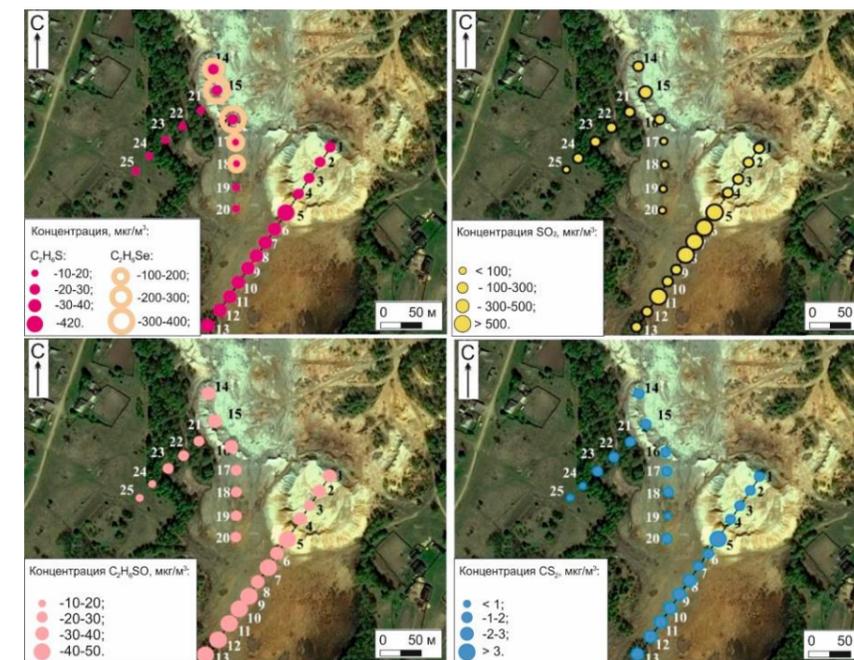


Рисунок 10 – Концентрации диметилсульфида, диметилселенида, диоксида серы, диметилсульфоксида и сероуглерода в приповерхностном слое воздуха над Урскими отвалами (Yurkevich et al., 2019)



Рисунок 11 – Концентрация  $SO_2$  в воздухе над поверхностью Комсомольского хвостохранилища в 18:00

Таблица 2 – Объемы, массы и ресурсы химических элементов в изученных техногенных экосистемах в Кемеровской области, Забайкальском крае. ДЛ – Дюков Лог, ТП – Талмовские Пески, Урск- Урские отвалы, Комс – Комсомольское хвостохранилище, ШХТ – Шахтаминское хвостохранилище, ДРС – Дарасунское хвостохранилище.

Объект	ДЛ	ТП	Урск	Комс	ШХТ	ДРС
Объем, тыс. м <sup>3</sup>	1200	720	1600	958	1800	1700
Масса, млн. т.	2.3	1.6	4.1	3.1	3.8	4.7
Ресурсы, тонн						
Cu	1000	1300	3100	4300	5300	4600
Zn	5100	19000	1300	1900	4600	2500
Cd	23	54	20	20	42	10
Pb	20000	4600	17000	1200	15000	2700
Au	0.85	1.6	0.41	1.2	0.72	5.2
Ag	85	45	25	10	91	36
Mo	28	30	45	2.8	4200	39
As	490	120	23000	9100	610	23000
Hg	1	6.9	82	26	1.0	8.5
Sb	530	110	560	7600	910	800
In	н.д.	н.д.	4.1	48	1.7	2.1
Sn	14	9.6	37	42	57	44
Te	н.д.	0.64	16	15	13	24
Se	н.д.	5.4	41	17	36	29
Bi	н.д.	1.3	1500	34	190	170
Ni	н.д.	67	130	87	160	1

Таблица 1 – Концентрации органических компонентов в приповерхностном слое воздуха над Урскими отвалами, мкг/м<sup>3</sup> (Yurkevich et al., 2019)

Компонент	Кварц-баритовый	Барит-пиритовый	Фон
Сероуглерод	31	43	93
Диметилсульфид	420	30	15
Диметилселенид	52	нпо	нпо
Диметилдисульфид	2.3	11	нпо
Диметилтрисульфид	0.3	0.2	нпо
Пиридин	15	нпо	нпо
Формамид, N,N-диметил-	45	нпо	нпо
N,N-диметилацетамид	4.2	нпо	нпо
Бензамид, N,N-Диметил-	6.0	нпо	нпо
фенол	3.0	0.4	0.2
Бензонитрил	17	0.2	нпо
Бензил нитрил	0.4	нпо	нпо
2-пиридинкарбонитрил	0.8	нпо	нпо
Бензенпропаннитрил	0.2	нпо	нпо
1,2-бензендикарбонитрил	1.0	нпо	нпо
Гексанал	3.2	8.0	0.8
Гептанал	0.9	3.4	0.9
Октанал	3.2	15	1.0
Нонанал	9.8	86	1.1
Деканал	4.0	9.1	1.0
1-октанола	нпо	3.8	нпо
1-нонанола	нпо	3.4	нпо
Триметил бутановая кислота	1.1	0.6	0.2
Пentanовая кислота	1.0	0.1	0.1
Бензеновая кислота	2.7	0.2	0.1
S6, S7, S8	1.6	0.2	нпо

нпо – ниже предела обнаружения.

Таблица 3 – Доля от общего содержания и масса водорастворимых форм Ba, Pb, Cu, Zn, As, Co, Ni, Mo, Au, Ag, Cd в изученных техногенных экосистемах. ДЛ – Дюков Лог, ТП – Талмовские Пески, Урск- Урские отвалы, Комс – Комсомольское хвостохранилище, ШХТ – Шахтаминское хвостохранилище, ДРС – Дарасунское хвостохранилище.

		Ba	Pb	Cu	Zn	As	Co	Ni	Mo	Au	Ag	Cd
ДЛ	%	0.0010	0.021	0.10	0.28	0.0020	0.39	0.29	н.д.	0.0030	0.0030	0.58
	тонн	1.6	1.3	0.48	12	0.010	0.0090	0.025	н.д.	9·10 <sup>-6</sup>	0.0010	0.11
ТП	%	0.0014	0.018	0.51	1.1	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	0.0054	0.00030	н.д.
	тонн	13	130	48	1300	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	0.00080	0.13	н.д.
Урск	%	0.002	0.011	2.4	6.0	0.25	5.3	н.д.	0.082	0.010	0.0088	0.93
	тонн	5.0	0.020	5.1	24	0.85	0.12	н.д.	0.0024	2.1·10 <sup>-5</sup>	3.5·10 <sup>-4</sup>	0.0091
Комс	%	0.0010	0.030	0.20	0.50	0.020	н.д.	0.29	0.030	0.010	0.020	0.58
	тонн	0.049	4.6	11	23	0.12	н.д.	0.45	1.3	0.000070	0.018	0.24
ШХТ	%	0.0010	0.030	0.20	0.50	0.020	н.д.	0.29	0.030	0.010	0.020	0.58
	тонн	0.049	4.6	11	23	0.12	н.д.	0.45	1.3	0.000070	0.018	0.24
ДРС	%	0.0020	0.020	0.50	0.70	0.030	н.д.	н.д.	0.040	0.0080	0.030	0.72
	тонн	0.060	0.55	23	18	6.8	н.д.	н.д.	0.020	0.00040	0.010	0.070

Примечание: н.д. – нет данных.