

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения
Российской академии наук

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)**

Специальность

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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Научный консультант:
Профессор, д.г.-м.н. Бортникова
Светлана Борисовна

Новосибирск
2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ	19
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	26
2.1. Дюков Лог	28
2.2. Талмовские Пески	30
2.3. Урские отвалы.....	32
2.4. Комсомольское хвостохранилище	34
2.5. Шахтаминское хвостохранилище	38
2.6. Дарасунское хвостохранилище	41
ГЛАВА 3. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	44
3.1. Описание алгоритма полевых геохимических и геофизических исследований	49
3.1.1. Геохимические и гидрохимические полевые исследования	49
3.1.2. Газоаналитические полевые исследования.....	50
3.1.3. Электротомография.....	51
3.2. Схема исследований хвостохранилища Дюков Лог (г. Салаир, рис. 3.1).....	53
3.3. Схема исследования хранилища Талмовские Пески (г. Салаир, рис. 3.2а).....	55
3.4. Схема исследования Урских отвалов (пос. Урск, рис. 3.3)	57
3.5. Схема исследования Комсомольского хвостохранилища (пос. Комсомольск, рис. 3.4)	62
3.6. Схема исследования Шахтаминского хвостохранилища, Забайкальский край (пос. Вершино-Шахтаминский, рис. 3.5).....	65
3.7. Схема исследования Дарасунского хвостохранилища (пос. Вершино-Дарасунский, рис. 3.6)	66
3.8. Методы анализа состава вещества и растворов.....	69
3.8.1. Анализ химического состава и петрофизических характеристик твёрдого вещества.....	69
3.8.2. Анализ химического состава растворов	70
3.8.3. Анализ состава газовой фазы методом ГХ-МС.....	70
3.9. Методы постановки, реализации и интерпретации экспериментов и расчётов	71
3.9.1. Определение форм переноса элементов с водными потоками	71
3.9.2. Определение форм переноса элементов с газовыми потоками	72
3.9.3. Термодинамическое моделирование химических форм нахождения химических элементов в водных растворах	75
3.9.4. Построение карт гидрохимических аномалий.....	76
3.9.5. Эколого-экономические расчёты (ресурсы, ущербы, рентабельность переработки).....	77

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА СТРОЕНИЯ И СОСТАВА ТЕХНОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО ДАННЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ .. 89

4.1. Дюков Лог	89
4.1.1. Состав вещества отходов	90
4.1.2. Состав водных вытяжек	96
4.1.3. Результаты эксперимента по измерению УЭС в отходах с различным водонасыщением	97
4.1.4. Связь геофизических данных и химического состава	99
4.2. Талмовские Пески	102
4.2.1. Состав вещества отходов, водных вытяжек и поровых растворов.....	102
4.2.2. Связь геофизических данных и химического состава	108
4.3. Урские отвалы.....	111
4.3.1. Состав вещества отходов и поровых растворов	111
4.3.2. Связь геофизических данных и химического состава	116
4.4. Комсомольское хвостохранилище	119
4.4.1. Состав вещества отходов	119
4.4.2. Связь геофизических данных и геохимического состава.....	123
4.5. Шахтаминское хвостохранилище	129
4.5.1. Состав вещества.....	129
4.5.2. Связь геохимических и геофизических данных	131
4.5.3. Состав поровых растворов	132
4.6. Дарасунское хвостохранилище	134
4.6.1. Состав вещества отходов	134
4.6.2. Сопоставление геофизических и геохимических данных	138
4.6.3. Состав поровых растворов	142

ГЛАВА 5. ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ МИГРАЦИИ ВЕЩЕСТВА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ С ВОДНЫМИ И ГАЗОВЫМИ ПОТОКАМИ... 146

5.1. Дюков Лог	146
5.2. Талмовские Пески	148
5.2.1. Состав подземных вод	148
5.2.2. Состав газов в поровом пространстве вещества отходов.....	149
5.2.3. Состав аномалий в поверхностных водах	151
5.3. Урские отвалы.....	155
5.3.1. Подземный дренаж.....	155

5.3.2. Механизмы гипергенных преобразований твёрдого вещества, дренажный сток, гео- и гидрохимические аномалии.....	156
5.3.3. Механизмы образования летучих серо-, селен- и углеродсодержащих соединений. Сезонные и суточные колебания УЭС, температуры и газов	168
5.4. Комсомольское хвостохранилище.....	185
5.4.1. Состав поровых и грунтовых вод	185
5.4.2. Состав газовых аномалий над поверхностью хвостохранилища	188
5.5. Шахтаминское хвостохранилище	192
5.5.1. Состав аномалий в поверхностных водах	192
5.6. Дарасунское хвостохранилище	206
5.6.1. Состав аномалий в поверхностных водах	206
5.6.2. Механизмы гиперкриогенной трансформации сульфидсодержащих отходов	213
ГЛАВА 6. РАСЧЕТ ОБЪЕМОВ ТЕХНОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ, РЕСУРСОВ ЦЕННЫХ И ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УЩЕРБОВ И РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ	223
6.1. Дюков Лог	225
6.2. Талмовские Пески	227
6.3. Урские отвалы.....	231
6.3.1. Оценка ресурсов	231
6.3.2. Оценка ущербов.....	235
6.3.3. Техничко-экономическое обоснование извлечения барита из Урских отвалов	238
6.4. Комсомольское хвостохранилище.....	248
6.4.1. Оценка ресурсов	248
6.4.2. Экономический расчёт экологического ущерба и рентабельности переработки отходов с извлечением полезных компонентов	250
6.4.2. Ущерб окружающей среде от загрязнения земельных ресурсов вокруг территории складированных отходов	251
6.4.3. Техничко-экономический план работ по рекультивации техногенных объектов	253
6.5. Шахтаминское хвостохранилище	254
6.6. Дарасунское хвостохранилище	256
6.7. Сравнительный анализ техногенных экосистем и реестр с оценкой ресурсов токсичных и полезных компонентов.....	258
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	262
ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	264
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	270

ВВЕДЕНИЕ

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 Cu-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; Bowell, 2003; Simmons et al., 2004; Uhlmann et al., 2004; Johnson et al., 2005; Ho, 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 *Baccilus 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/м³) 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 итогам 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 ультракислых 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 рентгенофлюоресцентным (РФА) методом, рентгенофлюоресцентным 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 карбонатного углерода методами классической аналитической

химии для определения кислотопродуцирующего и кислотонейтрализующего потенциалов вещества сульфидных отходов.

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

5. Измерение концентраций

- анионов и катионов (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- , 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-638OLA).

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 *Bacillus mycoides* 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 Гаськовой, 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. Волынкина, 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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Изучение механизмов миграции и осаждения химических элементов с водными потоками является одной из главных задач геохимии гипергенных и, в частности, техногенных процессов. Поведение химических элементов в техногенных системах, формирующихся в результате деятельности горнорудных производств, значительно отличается от такового в природных условиях. Объектами исследования данного проекта являются заброшенные сульфидсодержащие отходы переработки металлических руд, складированные в виде насыпных отвалов или в хвостохранилищах, сформированные в 1930-1970 гг. Технологии переработки руд в первой половине XX столетия позволяли извлекать лишь небольшую часть полезных компонентов, поэтому отходы производства содержали высокие концентрации рудных элементов в виде сульфидных минералов: пирита, халькопирита, сфалерита и попутно - целый спектр примесных элементов (As, Sb, Be, Hg, Tl). При стихийном размещении отходов с высокими содержаниями кислотпродуцирующих сульфидных минералов в руслах рек и естественных понижениях рельефа без противодиффузионных барьеров материал отходов активно окисляется кислородом воздуха и воды за счет большой удельной поверхности измельченного материала, формируются потоки рассеяния токсичных химических соединений.

Актуальность решения проблемы техногенного загрязнения определяется социальной значимостью охраны окружающей природной среды и, в частности, водных ресурсов. Существуют перспективы извлечения ценных компонентов из отходов, и зачастую высокие концентрации Cu, Zn, Ag, Au делают такую переработку рентабельной и позволяют рассматривать хвостохранилища в качестве «техногенных месторождений». И если Япония, США, Китай, страны ЕС активно используют технологии повторного вовлечения ценных компонентов из «хвостов» в производство, то в РФ, несмотря на то, что «Воспроизводство и использование природных ресурсов» и «Охрана окружающей среды» являются долгосрочными программами, принятыми Минприроды России, интерес к

технологиям глубокой переработки связан пока только со стремлением горнодобывающих, горно-обогатительных и перерабатывающих компаний снизить свои издержки. По факту обращение с заброшенными отходами в РФ на данный момент не регламентировано, вопрос остаётся открытым: не существует установленной методологии оценки ресурсов и обращения с отходами, хранящимися в старых, неучтенных хранилищах. А между тем, по некоторым оценкам объемы опасных сульфидсодержащих отходов горнорудного производства в необорудованных по современным стандартам хранилищах, на территории нашей страны достигают нескольких миллиардов тонн (данные федеральной службы государственной статистики, 2022 г.).

Проблема окисления сульфидов и кислого дренажа (AMD) является одним из основных направлений мировых исследований за последние 50 лет. Учёные заинтересовались проблемой загрязнения окружающей среды химическими элементами и влиянием токсикантов на здоровье человека еще в начале XX века. Одна из первых работ, зарегистрированная в базе данных Scopus, посвящена исследованиям денатурации белка под влиянием солей металлов, которые проводились Робертом Кехо (Robert A. Kehoe) в 1920 году для поиска лечения от отравления металлами. С начала семидесятых годов наблюдается лавинообразный рост количества статей, обсуждающих тему загрязнения токсичными элементами. К настоящему времени количество работ возросло на три порядка (с единиц работ в год до нескольких тысяч). Основные исследования прошлых лет проводили в США и Великобритании, описывали содержание свинца в почвах и растениях [Briggs D., 1972; John, VanLaerhoven, 1972]. 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]. Развитие методов аналитической химии, термодинамического и математического

моделирования привело к открытию новых направлений в области исследований техногенных систем: определение скорости окисления основного кислотопродуцирующего минерала пирита [Holmes et al., 2000; Плюснин и др., 2001], оценка и прогноз 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], определение форм миграции токсичных элементов, их биодоступности и токсичности [Salomons, 1995; Nordstrom et al., 2000; Dinelly et al., 2001; Brown et al., 2005].

Под *техногенной экосистемой* в данной работе понимается система, состоящая из сульфидсодержащих отходов обогащения полиметаллических руд и компонентов окружающей природной среды, которые находятся во взаимосвязи, образуют целостность путем обмена веществ и энергии. *Гиперекриогенез* – процессы химического и физического выветривания вещества, протекающие при отрицательных температурах.

Основные лидеры по проблематике техногенных экосистем представлены исследователями из Китая, США, Испании, Канады, Индии и Великобритании. Сейчас можно с уверенностью отметить, что Российская Федерация входит в десятку стран, в которых активно развивается научное направление «техногенез».

Главные отечественные «научные школы» по геохимии ландшафтов и окружающей среды, экологии и природопользования находятся в МГУ имени М.В. Ломоносова: проводятся исследования, посвященные экогеохимии ландшафтов [Касимов, 2014]; загрязнению почв и вод химическими элементами [Алехин, Ильина и др., 2010; Водяницкий, Савичев, 2014; Ilina, Viers, Pokrovsky, Lapitskiy, et al., 2015], в ГЕОХИ РАН изучаются особенности распределения химических элементов в почвах [Березкин, 2023]; в ГосНИИОХТ реализуются проекты, связанные с электрохимической, физико-химической очисткой и утилизацией мышьяксодержащих отходов [Томилов, Турыгин и др., 2008].

Проблема загрязнения окружающей среды в результате деятельности горнорудных производств активно исследуется в ВУЗах и институтах Сибирского и Уральского федеральных округов, что связано с приуроченностью к

добывающим и перерабатывающим предприятиям. Работы проводятся в Институте минералогии УрО РАН (Миасс, д.г.-м.н. В.Н. Удачин), Томском политехническом университете (д.г.-м.н. Е.Г. Языков), Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (Иркутск, к.б.н. Г.А. Белоголова), Институте природопользования СО РАН (Улан-Удэ, д.х.н. Н.М. Кожевникова), Институте неорганической химии СО РАН (Новосибирск, д.х.н. О.В. Шуваева), Институте геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск, к.г.-м.н. Е.В. Лазарева, к.г.-м.н. И.В. Мягкая), Институте горного дела (Новосибирск, д.т.н. Г.Р. Бочкарев).

На Урале учёные проводят мониторинговые работы по донным отложениям озёр и лишайникам, моделируют перенос металлов и мышьяка водами и аэрозольными частицами [Spiro, Udachin et al., 2013; Gashkina, Tatsii, et al., 2015]. В ИНХ СО РАН были проведены работы по определению форм мышьяка в поверхностных природных и техногенных водах [Shuvaeva, Bortnikova et al., 2000; Shuvaeva, Koshcheeva, 2002]. Коллеги из ИГД СО РАН оценивают эффективность различных материалов для извлечения мышьяка из техногенных вод [Bochkarev, Pushkareva, 2010]. Подробные описательные работы, посвященные Бериккульским и Комсомольским техногенным объектам, опубликовали исследователи ИГМ СО РАН [Gieré, Sidenko, Lazareva, 2003; Лазарева, 2006; Myagkaya et al., 2019].

Развиваются исследования по тематике техногенеза в Тихоокеанском государственном университете (Хабаровск, д.б.н. Л.Т. Крупская), ИППЭС КНЦ РАН (д.т.н. Д.В. Макаров).

В ИНГГ СО РАН под руководством д.г.-м.н. С.Б. Бортниковой, д.т.н. И.Н. Ельцова, д.э.н. И.В. Филимоновой с участием автора и коллективов лабораторий геоэлектрохимии и эколого-экономического моделирования техногенных систем развивается системный подход к исследованиям различных проявлений техногенеза с применением геохимических, геофизических и эконометрических методов.

Применение методов электроразведки для изучения состав техногенных систем впервые описано в единичных работах зарубежных исследователей [Oldenburg, 1996; Johnson et al., 2002; Berger et al., 2008]. Методы электроразведки

позволяют оптимизировать систему мониторинга техногенных систем, сократив число отбираемых проб для геохимических исследований, оценить ресурсы полезных компонентов и оконтурить зоны распространения подземных дренажных потоков [Burton & Ball, 2010; Tuller et al., 2011; Bortnikova et al., 2011; Bortnikova, Yurkevich et al., 2013; Yurkevich et al., 2015]. На сегодняшний день достаточно подробно освещены вопросы изучения состава техногенных образований в каждом конкретном случае, и такими изысканиями занимаются, как правило, геологические службы по заданию административных властей и фондов по защите окружающей среды, особенно принята практика комплексных исследований за рубежом (US Geological Survey, US Department of Interior, Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC)). Общепринятый подход – построение геоэлектрических разрезов и их интерпретация на качественном уровне с прогнозом существования проводящих зон, приуроченных к горизонтам высокоминерализованных поровых растворов. Пока нет методики четкого разграничения окисленных и неокисленных зон, водонасыщенных пиритных хвостов и подстилающих грунтов [Oldenburg, 1996; Burton & Ball, 2010; Tuller et al., 2011].

Остаются малоизученными электрохимические процессы перехода заряженных комплексов металлов и анионогенных элементов из отходов в раствор при взаимодействии с метеорными и грунтовыми водами, что позволило бы лучше судить о механизмах миграции элементов с поровыми растворами. Ведь при интерпретации геоэлектрических разрезов на сегодняшний день возможно достоверно выделить лишь высокопроводящие зоны, которые исследователи связывают с минерализацией порового раствора. Но полученные нами данные свидетельствуют о том, что при одной и той же водонасыщенности и литологической структуре сульфидсодержащие отходы из разных зон обладают электропроводностью, различающейся на порядок. Природа электропроводности сульфидных отходов до конца не ясна: малоизучен вклад вторичных сульфатных минералов в общую электропроводность за исключением единичных зарубежных работ [Blowes, 1997; Horton, 2003], мало исследований по проводимости

сульфидных минералов в теле отходов [Van Voorhis, 1983; Sheriff et al., 2008] с применением современных методов, нет работ по взаимосвязи между электропроводностью и степенью окисленности отходов. А между тем при изучении техногенных систем геофизическими методами (электромагнитное сканирование, электротомография) четко выделяются зоны низкой проводимости (низкой влажности), содержащие при этом высокие концентрации сульфидных минералов (например, пирита, арсенопирита), которые при изменении условий внешней среды (подъем грунтовых вод, увеличение количества атмосферных осадков) станут источниками кислоты и металлов [Placencia-Go'mez et al., 2010; Bortnikova et al., 2011, 2013; Yurkevich et al., 2015]. Понимание механизмов миграции и осаждения химических элементов внутри тела отходов и их выноса за пределы техногенной системы будет более ясным при правильной интерпретации данных электроразведки, а для этого нужны точные знания о природе электрической проводимости отходов, о вкладе в него проводимости минерального остова и порового раствора, что позволит на основе геофизических данных прогнозировать развитие техногенной системы. Кроме того, применение электроразведочных методов может быть полезным для выделения горизонтов, аккумулирующих металлы, так называемые «геохимических барьеров».

Формируются научные основы комплексного подхода к управлению отходами горнорудного производства в РФ с оценкой экологических ущербов, ресурсов ценных компонентов в «техногенных месторождениях» и экономической целесообразности их разработки. Особое внимание уделяется исследованиям техногенных объектов в Кемеровской области. На территории относительного небольшого по площади Кузбасса находится более тысячи производственных предприятий, область занимает восьмую позицию в рейтинге самых загрязненных регионов Российской Федерации. Длительное развитие в том числе горнодобывающей и перерабатывающей промышленности привело к формированию на территории Кемеровской области значительного накопленного экологического ущерба. Актуальной научной задачей является разработка методики расчёта экологического ущерба территории, подвергающейся

техногенному воздействию. Анализ качественных характеристик экологического состояния необходим для прогноза дальнейшего развития этих территорий и разработки рекомендаций по минимизации техногенного воздействия на окружающую среду.

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Глава содержит информацию об общей характеристике хранилищ отходов Салаирского рудного поля (Дюков Лог, Талмовские Пески), отвалов Урского месторождения, хвостохранилища Комсомольского золотоизвлекательного завода (Кемеровская область), Шахтаминского молибденового месторождения и Дарасунского рудного узла (Забайкальский край) (рис. 2.1). Объекты выбраны так, чтобы охватить хранилища, расположенные в районе с резкоконтинентальным климатом, разного возраста и химического состава. Хранилища наполнены отходами гравитационного обогащения, флотации и цианирования барит-полиметаллических, золотоносных и медно-молибденовых руд (табл. 2.1). Подробное описание методологии опробования, полевых и лабораторных исследований, а также схемы геохимического, гидрохимического, газоаналитического опробования и геофизических исследований объектов, проводившихся в разные годы, приводится в главе 3.



Рисунок 2.1 – Географическое положение объектов исследования

Таблица 2.1 – Общая характеристика объектов исследования. ДЛ – Дюков Лог, ТП – Талмовские Пески, Урск- Урские отвалы, Комс – Комсомольское хвостохранилище, ШХТ – Шахтаминское хвостохранилище, ДРС – Дарасунское хвостохранилище

Параметр	ДЛ	ТП	Урск	Комс	ШХТ	ДРС
Возраст, лет	65	92	90	40	50	50
Тип руд	Барит-полиметаллические	Барит-полиметаллические	Барит-полиметаллические	Золотоносные	Медно-Молибденовые	Золотоносные
рН паст	2.0-7.7	2.8-3.7	2.5-4.5	3.0-7.5	2.7-6.3	7.1-8.5
Основные компоненты минерального состава	Кварц, пирит, барит, галенит, халькопирит, сфалерит, кальцит, доломит, каолинит, к.п.ш., слюды	Кварц, пирит, барит, галенит, халькопирит, сфалерит, кальцит, доломит, каолинит, к.п.ш., слюды	Кварц, пирит, барит, кальцит, ангидрит, буковскит, гидроксо-сульфаты Al, Mg, Fe, Zn, Ni, к.п.ш.	Кварц, пирит, гипс, ангидрит, гидроксо-сульфаты K, Mg, Fe, Zn, As, арсенаты Mg, Zn, Cu, к.п.ш.	Молибденит, пирит, галенит, сфалерит, шеелит, халькопирит, кварц, кальцит, доломит, хлорит, серицит, к.п.ш.	Пирит, арсенопирит, халькопирит, сфалерит, галенит, сульфаты, оксиды и гидроксиды Fe, Pb, Zn, Cu
Тип переработки	Гравитация, флотация	Гравитация, флотация	Гравитация, цианирование	Гравитация, флотация, цианирование	Гравитация, флотация	Гравитация, флотация, цианирование
Сера сульфидная, мас. %	2.0-5.0	5.0-7.0	2.5-21	0.40-1.5	0.20-1.1	0.41
Сера сульфатная, мас. %	0.24-1.1	0.20-1.1	0.70-0.78	Н.д.	0.10-0.50	0.08

2.1. Дюков Лог

Разработка барит-полиметаллических месторождений Салаирского рудного поля в 1930-1980-х годах привела к образованию хранилищ отходов, до сих пор являющихся источниками поступления химических элементов (Zn, Pb, Cu, Cd, As, Sb, Co, Ni) в окружающую среду. Дюков Лог – хвостохранилище Салаирского горно-обогатительного комбината (СГОКа) образовалось в результате складирования отходов флотации и гравитации барит-полиметаллических рудных тел в 1942-1975 гг. Хвостохранилище расположено в естественном логу в черте г. Салаир (рис. 2.2а).

Отложения, слагающие хвостохранилище, поступали из природной зоны окисления рудных тел и поэтому состоят из сильноизмененных пород и минералов [Бортникова и др., 2003]. Первичные рудные минералы представлены пиритом (3.5 %), галенитом и сфалеритом (по 0.5 %). Сульфиды в среднем окислены на 30 %. Среди вторичных рудных минералов преобладают гидроксиды железа (1 %), англезит и смитсонит (по 0.3 %). Главные жильные минералы — кварц, барит и каолинит. На сегодняшний день размеры хвостохранилища – 400×300 м, на его поверхности находятся небольшие пруды, являющиеся реликтами гидроотвала, ниже дамбы по рельефу – пруд-отстойник, принимающий фильтрационные стоки с хранилища (рис. 2.2).

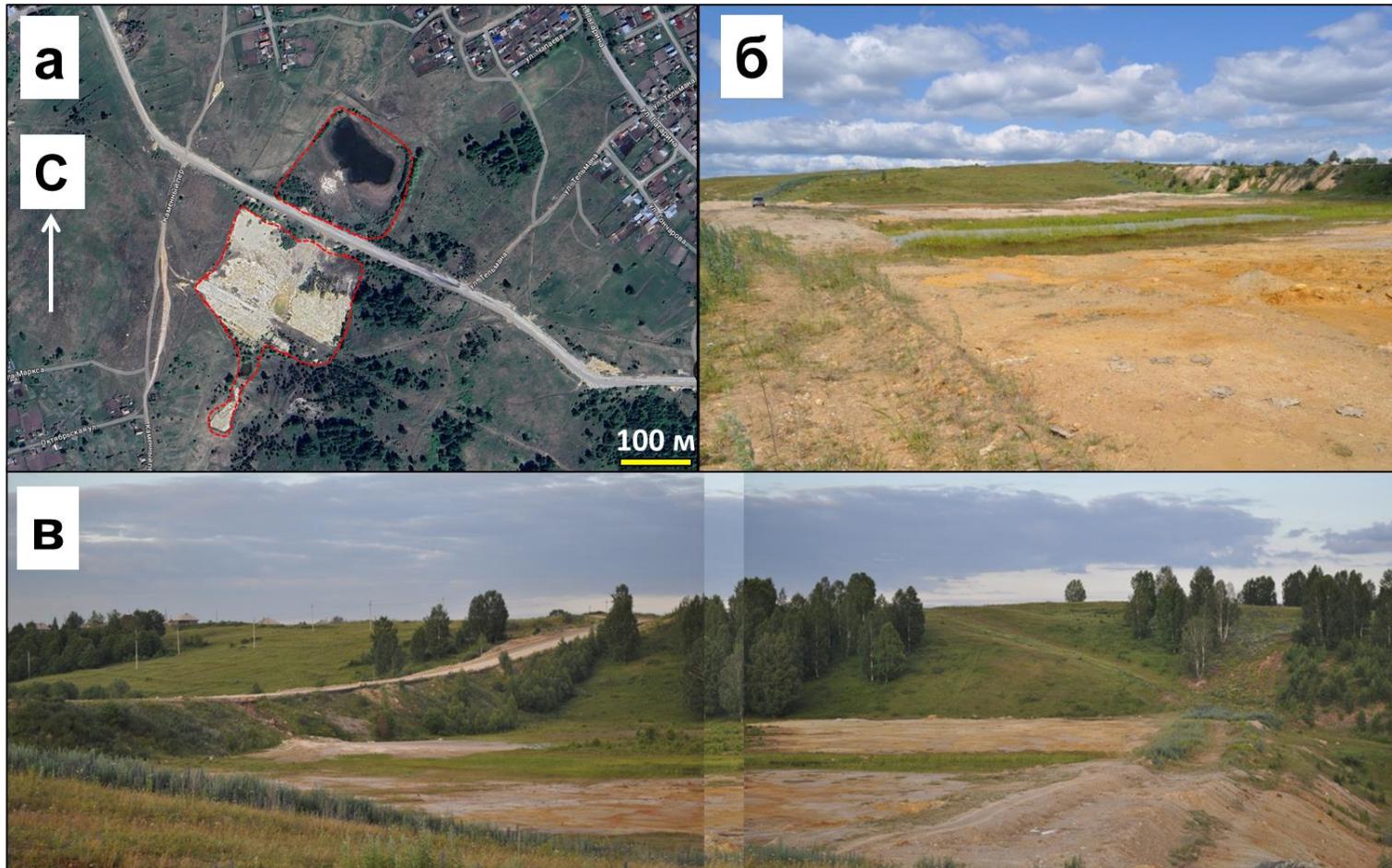


Рисунок 2.2 – Спутниковый снимок (а), фотографии северной (б) и южной (в) частей хранилища. Красной пунктирной линией обозначен контур хранилища Дюков Лог

2.2. Талмовские Пески

Талмовские Пески – первое хвостохранилище Салаирского горно-обогатительного комбината (СГОК), образовалось в 1932 по 1942 гг. за счет складирования отходов обогащения барит-полиметаллических руд в русле р. Малая Талмовая в виде ленты шириной 30 м и протяженностью 8 км [Бортникова и др., 2006] (рис. 2.3).

СГОК начал работать с 30-х годов прошлого века и разрабатывал золото- и серебросодержащие барит-полиметаллические руды месторождений Салаирского рудного поля, приуроченного к кембрийскому палеовулканическому куполу. Купол поднимается среди мощного комплекса известняков гавриловской свиты нижнекембрийского возраста (Є1gv). Сложен он порфирами риолит-дацитового состава, туфами, туффитами, андезитовыми порфиритами, дацитовыми порфирами. Рудные тела приурочены к нижнекембрийским субвулканическим кварц-плагиоклазовым порфирам печеркинской свиты (Є1рџ). Геологическое строение поля и минералогия рудных тел детально изучены и описаны многими сибирскими геологами [Лабазин, 1940; Зеркалов, 1962; Поспелов, Лапухов, 1971; Лапухов, 1975; Дистанов, 1977]. Рудные тела месторождения представляют собой гидротермально-метасоматические образования сливных и прожилково-вкрапленных руд. Сульфиды представлены пиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, блеклыми рудами (теннантит). К редким минералам рудных тел, обнаруженных в кварц-карбонатных штокверках, пересекающих барит-полиметаллические тела, относятся сульфосоли (пирсеит, полибазит), теллуриды серебра, золота и свинца (гессит, петцит, эмпрессит, алтаит), самородное золото и серебро [Бортникова, 1989]. Жильные минералы: кварц, барит, кальцит, серицит и хлорит.

В начале эксплуатации месторождения разрабатывались верхние, наиболее богатые части рудных тел из зоны окисления. Переработка руд производилась на золотоизвлекательной фабрике методами гравитации, цианирования и флотации.

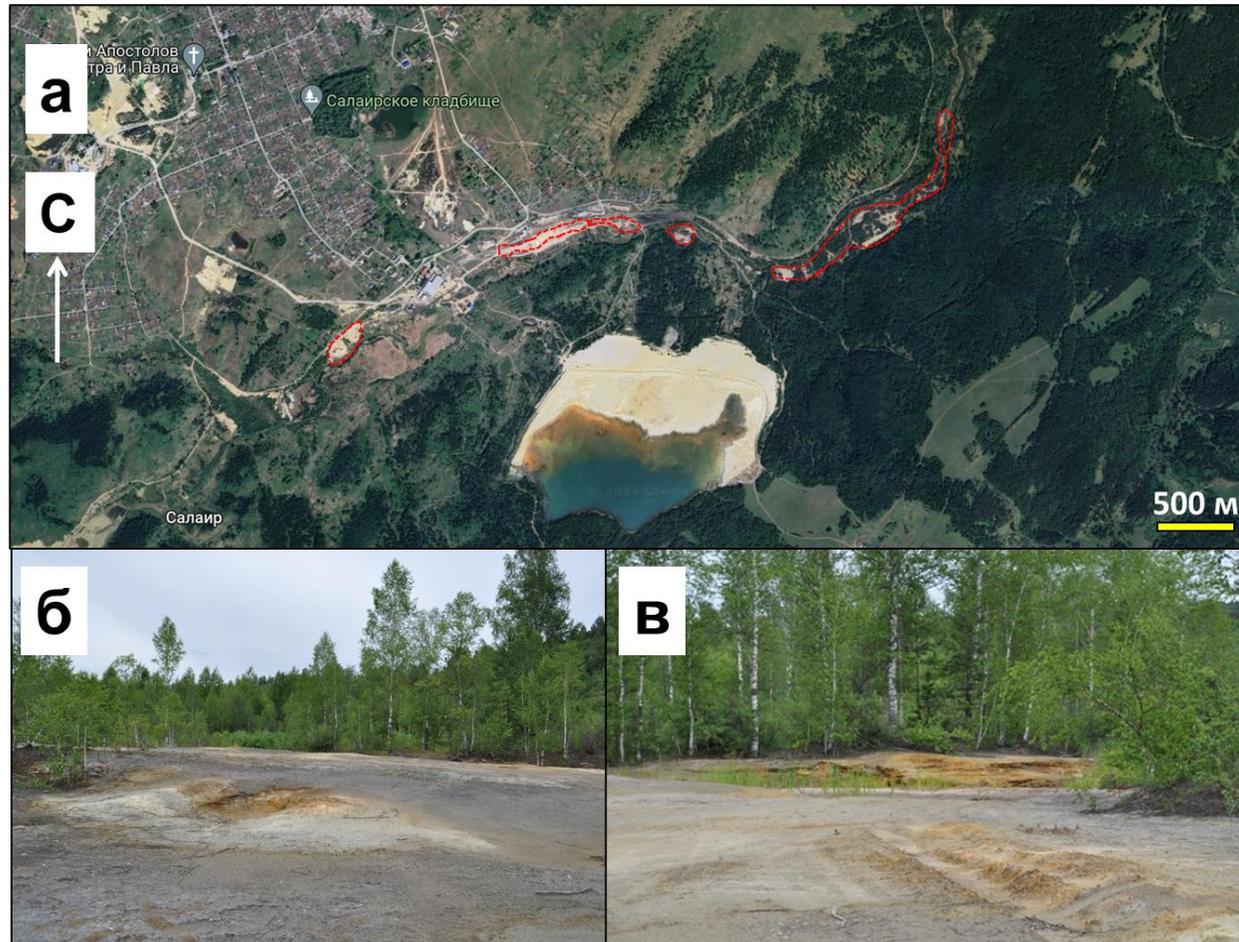


Рисунок 2.3 – Спутниковый снимок (а), фотографии хранилища на берегу р. М. Талмовая (б) и лесной (в) частей хранилища Талмовские Пески. Красной пунктирной линией обозначен контур хранилища

С 1932 по 1942 гг. отходы обогащения складировались в запруженное дамбой русло реки Малой Талмовой в виде ленты протяженностью 7 км и шириной ~ 30 м. После заполнения отходами получившегося искусственного пруда, ниже по течению сооружалась следующая дамба, и процесс повторялся. В настоящее время хвостохранилище Талмовские Пески представляет собой узкую (до 30 м) ленту песков протяженностью около 8 км, в непосредственной близости от которых протекает река Малая Талмовая. Вещество отходов подвержено интенсивному окислению за счет кислорода атмосферы и сезонных осадков, в результате чего сульфидные минералы подвержены значительному разрушению и преобразованию [Бортникова и др., 2006].

Преобразование сульфидсодержащего вещества в результате окисления кислородом воздуха и воды приводит к интенсивному выносу растворенных форм металлов в речную сеть [Salomons, 1995; Lottermoser, 2010; Мур, Рамамурти, 1987; Leybourne & Goodfellow, 2010; Teršič *et al.*, 2009]. Хвостохранилище Талмовские Пески представляет интерес и с точки зрения повторного извлечения ценных компонентов, и с позиций оценки экологических рисков.

2.3. Урские отвалы

Урской отвал расположен в пос. Урск Кемеровской области, образован в 1930-х годах после извлечения золота цианированием из зоны окисления колчеданного Ново-Урского месторождения (Урское рудное поле) (рис. 2.4). Ново-Урское месторождение было открыто в 1932 году как часть Урского рудного поля, объединяющего Ново-Урское, Белоключевское, Самойловское месторождения и ряд рудопроявлений. Полиметаллические месторождения Урской группы приурочены к комплексу метаморфических образований, первичный состав которых не всегда поддается точному определению. В массе же своей породы данной толщи представлены альбитофирами, кварцевыми порфирами, а в местах интенсивного проявления гидротермальных процессов – образованными за счёт их



Рисунок 2.4 – Спутниковый снимок (а), фотографии кварц-баритового (б) и кварц-пиритового (в) Урских отвалов.

Красной пунктирной линией обозначен контур отвалов

порфироидами, кварцево-серицитовыми и серицито-хлоритовыми сланцами [Болгов, 1937].

После открытия началась разработка зоны окисления Ново-Урского месторождения для добычи золота. С поверхности месторождение было представлено типичным госсаном с высоким содержанием барита и золота. Окисленные рудные тела были извлечены на глубину 40-50 м. Твердые руды почти полностью состояли из сульфидов: пирита, сфалерита, халькопирита, блеклой руды, галенита, арсенопирита, борнита, ковеллина, халькозина. Жильные минералы: кварц, серицит, барит, кальцит, гипс.

В результате сформированы насыпи высотой 10-12 м: кварц-баритовая и барит-пиритовая сыпучка (рис. 2.4 б, в). За последнее десятилетие отвал переработки рудных тел с преимущественным содержанием пирита (барит-пиритовый отвал) был в значительной степени переработан с целью извлечения барита. Второй, состоящий из отходов переработки руд зоны окисления (кварц-баритовый отвал), остался неизменным.

Выше по рельефу расположено карьерное озеро, вода из которого дренирует подножье отвала, в результате чего формируется кислый высокоминерализованный поток.

2.4. Комсомольское хвостохранилище

Описание Комсомольского месторождения приведено на основании данных, обобщенных Л.В. Алабиным и Ю.А. Калининским [Алабин, 1999] и затем приведённых в диссертации Е.В. Лазаревой (2003).

Комсомольское кварцево-жильное месторождение золота расположено в восточном фланге Кузнецко-Алтайского глубинного разлома. Рудное поле располагается в крупном штоке габброидов Бериккульского комплекса (Є2), прорывающего вулканогенно-осадочные (Є2), осадочные (V Є1) и интрузивные образования. Габбровый шток прорван линзообразными телами и дайками гранитов и аплитов, представляющими апофизы и дайки Дудетского гранитоидного интрузива (O-S) мартайгинского золотоносного комплекса.

Интрузивные породы Дудетского батолита обнажаются юго-восточнее рудовмещающего штока. Исследователи предполагают, что, судя по наличию в рудном поле апофиз и даек гранитов и аплитов, он подстилает Комсомольский шток габбро. В рудном поле распространены останцы вмещающих пород – метаморфизованные и скарнированные известняки [Рихванов и др., 2017].

На месторождении известно более 150 золото-сульфидно-кварцевых жил, которые приурочены к системе нарушений взбросо-сдвигового характера северо-восточного, северо-западного, субширотного направлений и к трещинам трех типов. Преобладающее количество жил (40-50 %) заполняет трещины отрыва северо-восточного простирания, сопровождающие региональный разрыв этого направления. Около 30-35 % жил приурочено к трещинам скола северо-западного простирания и 10-20 % жил располагается в субширотных трещинах отрыва. Падают жилы на северо-восток и юго-запад под углами 30-50°. Мощность жил – 0.1-1.0 м, протяженность по простиранию – 300 - 500 м [Рихванов и др., 2017].

Рудные жилы сложены кварцем (90-91 %) с незначительным количеством кальцита и анкерита, сульфидами (3-10 %): пиритом, пирротинном, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, арсенопиритом, реже – шеелитом, молибденитом, тетраэдритом. Золото находится в самородном виде. Руды обладают полосчатыми брекчиевидными текстурами Комсомольский золотоизвлекательный завод (КЗЗ, пос. Комсомольск, Кемеровская область) был введен в эксплуатацию в 1937-1940 гг. Золото-арсенопирит-кварцевые руды перерабатывались цианированием, производилось извлечение золота из сурьмяных кеков (продукт переработки антимонитовых концентратов выщелачиванием), отходы складировались в хвостохранилище (рис. 2.5). Твердое вещество отходов состоит из кварца, полевого шпата, кальцита и сульфидных минералов (пирит, сфалерит, галенит, пирротин и арсенопирит). В результате складирования отходов над поверхностью твердой части образовалось техногенное озеро площадью порядка 100 тыс. м², со средней глубиной около 2 м [Бортникова и др., 2006].

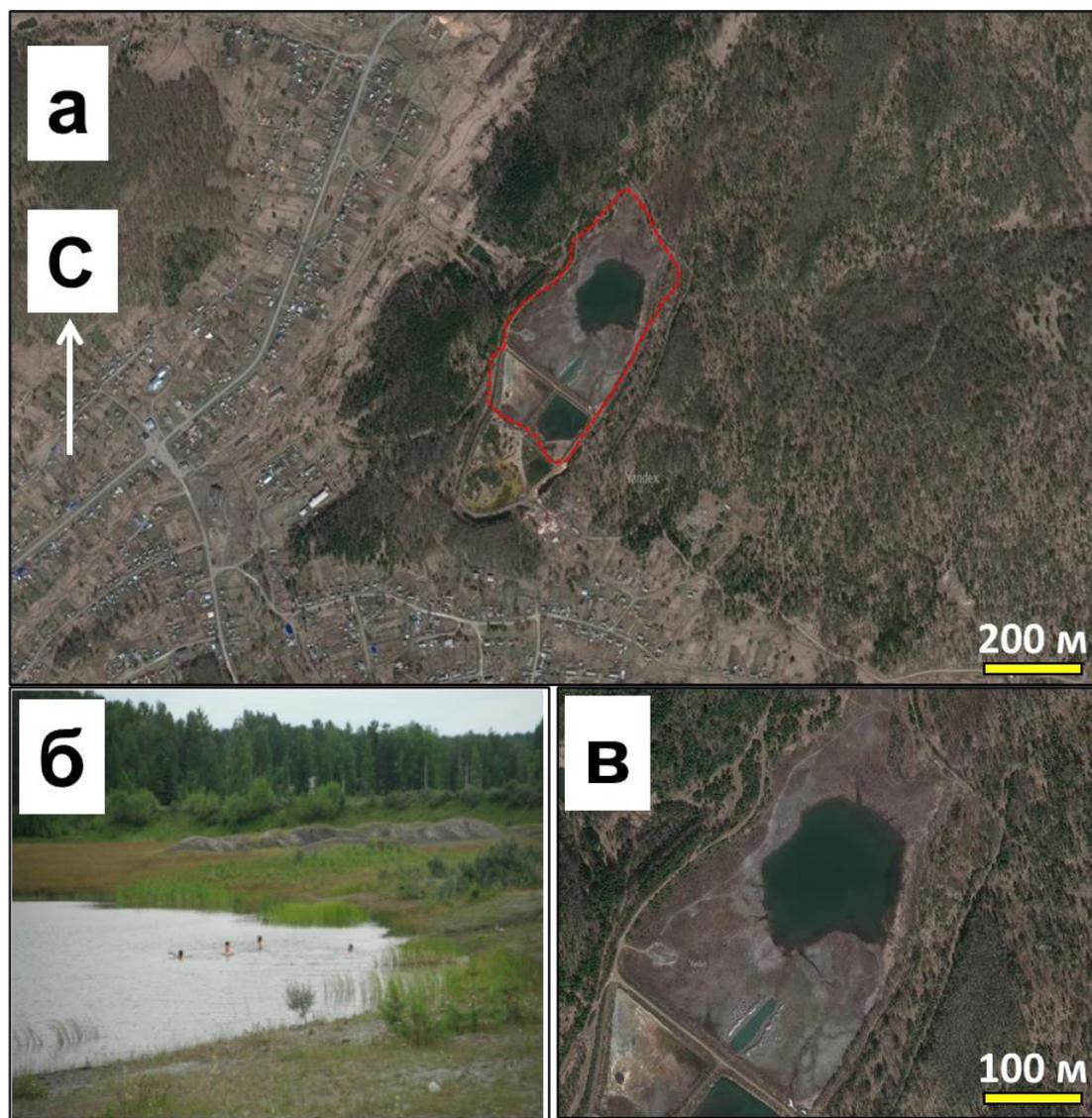


Рисунок 2.5 – Спутниковый снимок Комсомольского хвостохранилища (а, в), фотография пруда-отстойника на его поверхности (б). Красной пунктирной линией обозначен контур хвостохранилища

В связи с тем, что образование минеральных ассоциаций происходило в несколько стадий, в рудных жилах распространено несколько генераций главных нерудных и рудных минералов. Содержание золота в рудах изменяется от 1.2-3.5 до 20-35 г/т, достигая в отдельных пробах 150-300 г/т и более [Рихванов и др., 2017].

Важной особенностью Комсомольского месторождения является отсутствие вертикальной минеральной зональности. В пределах достигнутых горными выработками глубин (640 м по вертикали и 1500 м по падению жил) не наблюдается сколько-нибудь заметной смены минеральных ассоциаций [Рихванов и др., 2017].

Золото-сульфидно-кварцевые жилы в рудном поле пересекают габбро, норит-габбро, диориты Комсомольского штока, граниты и аплиты Дудетского интрузива мартайгинского комплекса. Околорудные метасоматические изменения вмещающих пород проявляются в интервале от 0.5-1.5 до 3.5-4.0 м от непосредственного контакта с кварцевыми жилами. Эти изменения выражаются в замещении во фронтальной метасоматической зоне фемических минералов вмещающих пород хлоритом, сиалических – серицитом; в тыловой зоне – серицитом, кварцем, кальцитом, пиритом. Околорудные изменения соответствуют листовенит-березитовой метасоматической формации [Рихванов и др., 2017].

Комсомольский золотоизвлекательный завод (КЗЗ) расположен в пос. Комсомольский Кемеровской области на территории шахты (в 20 км от райцентра – села Тисуль, в 65 км от железнодорожной станции Тяжин). Поселок расположен непосредственно на рудном поле Комсомольского месторождения вблизи от рудничных и заводских построек. Завод введен в эксплуатацию в течение 1937-40 годов. Согласно архивным данным общая масса отработанной руды за эти годы составила ~1 300 000 тонн. На заводе перерабатывались золото-арсенопирит-кварцевые руды Комсомольского месторождения, а в последние годы - штейн осадительной плавки сурьмяного концентрата Кадамджайского комбината [Мызенков, 1997]. Точные сроки включения в процесс переработки штейнов

неизвестны. Золото извлекалось методом цианирования из руды, предварительно измельченной на 72 % до -150 меш. Осаждение золота производится цинковой пылью, и основным продуктом является Au-шлам. До 1982 года на заводе использовалась также амальгамация [Рихванов и др., 2017].

2.5. Шахтаминское хвостохранилище

Хвостохранилище Вершино-Шахтаминского ГОКа расположено на окраине поселка Вершино-Шахтаминский в Шелопугинском районе Забайкальского края. Хвостохранилище представляет собой гидротехническое сооружение с отходами флотации, устроенное в межгорном распадке путем возведения дамбы (рис. 2.6а). Породы основания хвостохранилища представлены крупнозернистыми гранитами, меры гидроизоляции основания не предусмотрены. Отходы обогащения складировались в период с 1941 по 1993 годы [Энциклопедия Забайкалья, 2006]. В настоящее время объект законсервирован, рассматриваются различные варианты вторичной переработки хвостов. Хвосты флотации представлены тонкодисперсным материалом крупностью от -200 меш (содержание частиц размером равным или менее 0.074 мм более 50 %). Это продукт измельчения медно-молибденовой руды. Главные рудные минералы представлены пиритом, молибденитом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом [Месторождения Забайкалья, 1995]. Рудовмещающие породы – граниты шахтаминского комплекса. Кроме тонкой фракции в техногенных отложениях присутствуют пески от пылеватого до среднезернистого размера зёрен. Длительное время центральная часть хвостохранилища находилась под слоем воды глубиной до 1.5 м, что препятствовало доступу кислорода в разрез. По периферии хвостохранилища поверхность оставалась сухой, это способствовало активному переносу материала при ветровой эрозии, а также глубокому сезонному промерзанию, образованию морозобойных трещин. На участках, примыкающих к плотине, образовались эоловые формы рельефа – котловины выдувания, знаки ряби (рис. 2.6). Обводнённые грунты и их тонкий дисперсный состав создают благоприятные условия для процессов морозного пучения. По контуру затопленной части

хвостохранилища отмечаются растрескавшиеся бугры сезонного пучения высотой до 0.5 м. На момент проведения исследований вся вода из центральной части хвостохранилища была спущена через дренажный колодец (рис. 2.6б), на плотине развиты эоловые процессы (рис. 2.6в). Поверхность хвостохранилища разбита морозобойными трещинами и трещинами усыхания, имеющими полигональную структуру. Морозобойные трещины заполнены песчаным материалом и образуют грунтовые жилы (псевдоморфозы), которые несогласно секутся системой открытых трещин усыхания (рис. 2.6г).

На площади хвостохранилища в предыдущее время было пробурено четыре скважины для определения мощности отложений и отбора проб на различные виды анализа.

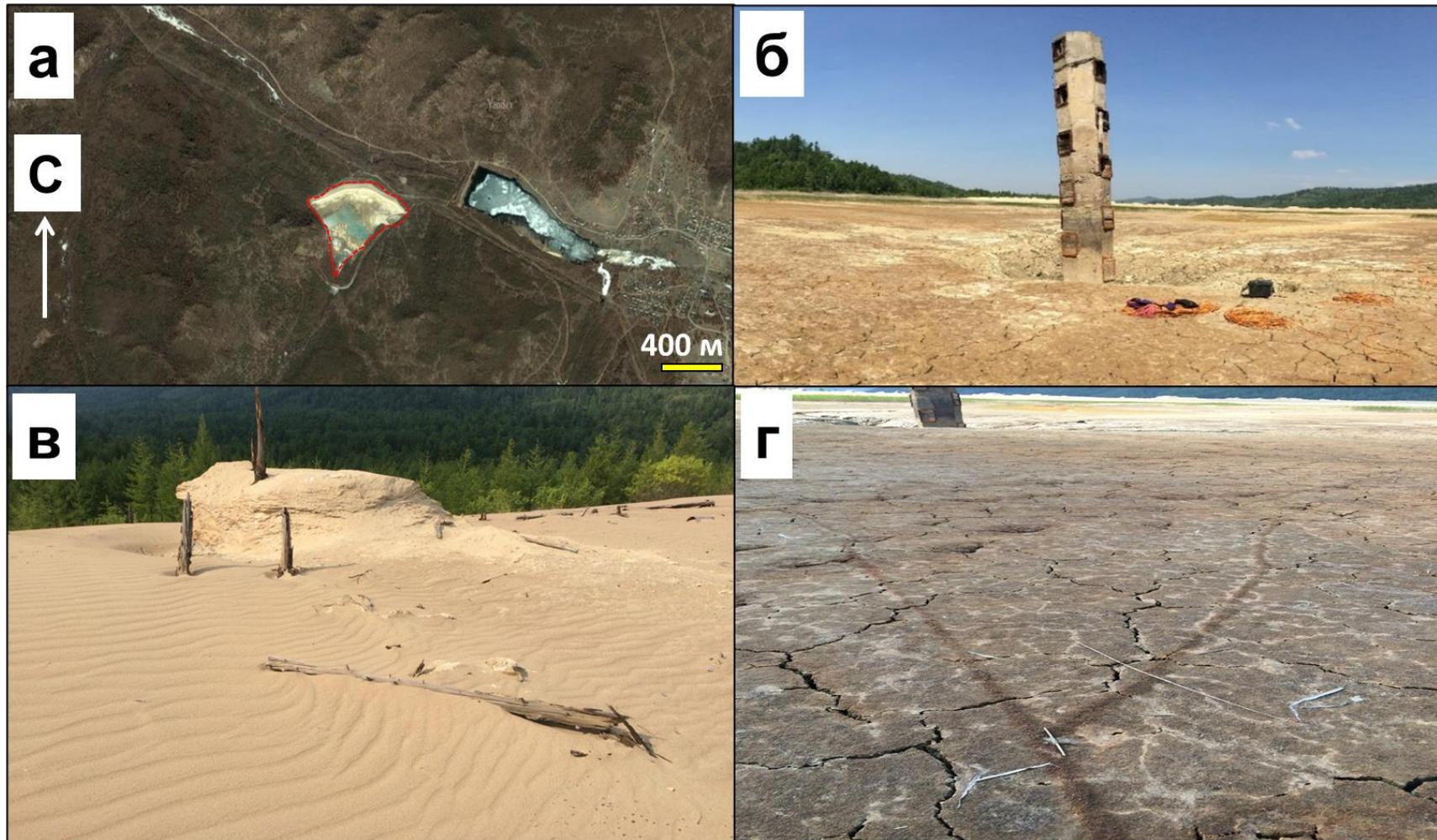


Рисунок 2.6 – Спутниковый снимок Шахтаминского хвостохранилища (а), фотографии дренажного колодца на площади хвостохранилища (б), эоловых процессов на плотине хвостохранилища (в), трещины усыхания и псевдоморфозы по морозобойным трещинам на поверхности хвостохранилища (г). Красной пунктирной линией обозначен контур хвостохранилища

2.6. Дарасунское хвостохранилище

В настоящее время в хранилищах Дарасунского рудного узла имеются три типа лежалых продуктов: огарки окислительного обжига арсенопиритных руд (50 тыс. т), кеки цианирования (100 тыс. т), хвосты флотации (около 4700 тыс. т). Рудные минералы огарков, кеков цианирования и хвостов флотации включают сульфиды, сульфаты, оксиды и гидроксиды железа, свинца, цинка и меди. В кеках цианирования доля сульфидов составляет около 46 % мас., на долю пирита приходится 86 % мас. В меньшей степени присутствует арсенопирит – 5.7 %. Массовая доля халькопирита, галенита и сфалерита составляют 0.3 %, 0.2 % и 0.1 % соответственно. Формы нахождения золота включают свободную, в сростках с рудными и породообразующими компонентами, а также тонковкрапленное в породообразующие минералы (архивные данные ОАО «Иргиредмет», 2012 г.).

На основании технологического регламента 27 мая 2010 г. была создана и запущена золотоизвлекательная установка (ЗИУ) по переработке Дарасунских огарков. На сегодняшний день работа предприятия приостановлена. В 2016 году огарки перерабатывались гравитацией, технологические воды производства поступали в дренажную канаву, протекающую рядом с предприятием. Хвосты флотации и цианирования руд золоторудного месторождения складированы в отвалы и гидроотвалы на границе с территорией поселка Вершино-Дарасунский (Тугокоченский район Забайкальского края) (рис. 2.7). Исследовалась осушенная часть хвостохранилища, перерабатываемая на момент 2016 г. на ЗИУ. Его поверхность покрыта морозобойными трещинами и трещинами усыхания (рис. 2.7б, в) Вдоль хранилища протянулись выработки старателей, извлекающих золото из россыпных месторождений при помощи промприборов (рис. 2.7а). К юго-западу от исследованного участка находятся гидроотвалы, содержащие жидкие отходы переработки руд и технологические стоки (рис. 2.7а, г). Ниже по рельефу протекает природный ручей и р. Дарасун. Обогащением руды на сегодняшний день занимается Дарасунская обогатительная фабрика, поставляющая пульпу с

отходами производства в гидроотвал. На этот же участок поступали отходы цианирования огарков от частного производства после 2010 г.

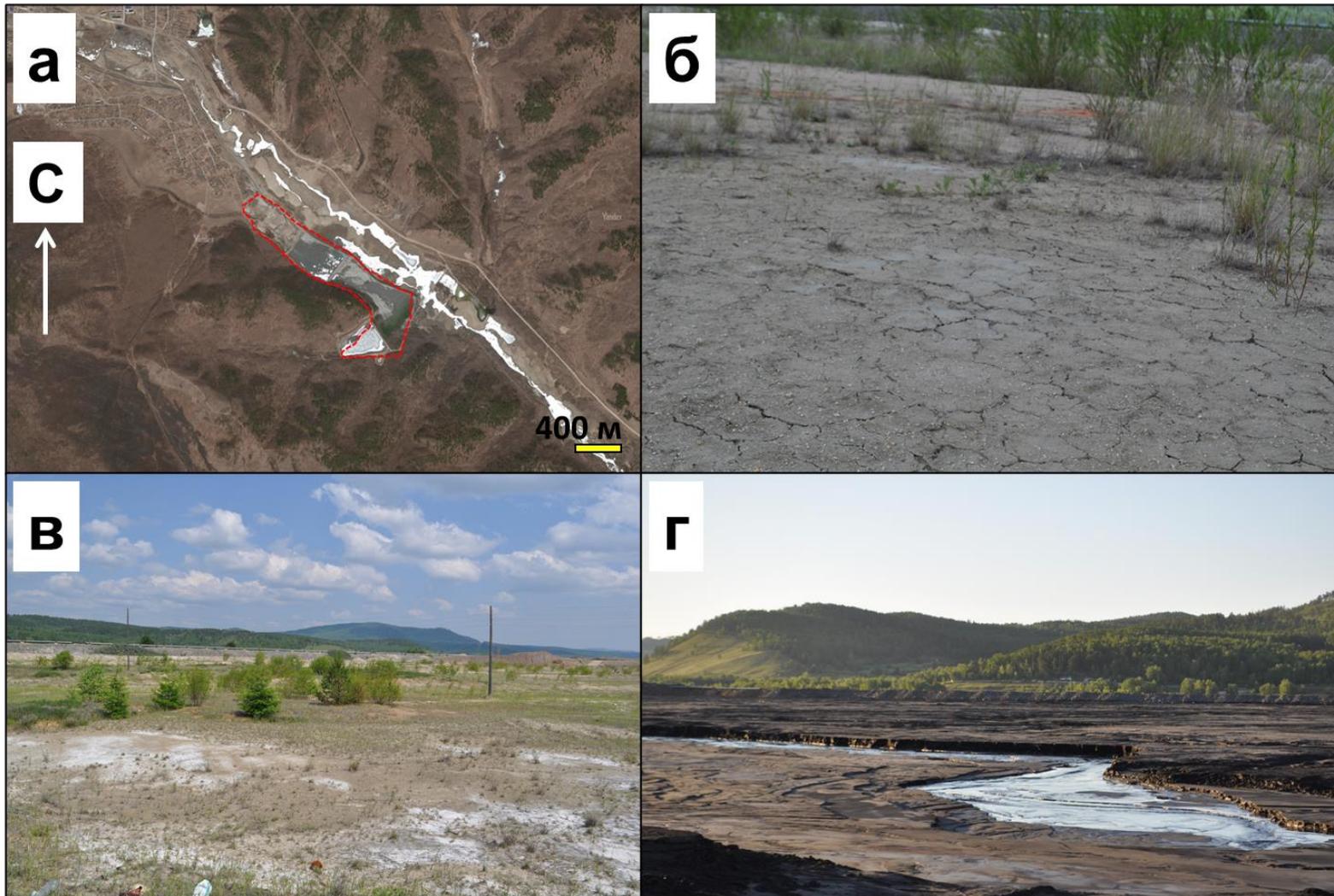


Рисунок 2.7 – Спутниковый снимок Дарасунского хвостохранилища (а), фотографии общего вида исследуемой площадки хвостохранилища с морозобойными трещинами на поверхности (б, в), общего вида действующей части хвостохранилища с поступающей в него пульпой (г). Красной пунктирной линией обозначен контур хвостохранилища

ГЛАВА 3. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Есть только одно благо — знание
и только одно зло — невежество.

Сократ

Логическая последовательность этапов работы сводится к выбору объектов и предмета исследования, постановке научной проблемы и конкретизации общей стратегии (методологии), которая в свою очередь определяет способ и методы проведения исследования.

Объекты исследования – техногенные экосистемы, образованные за счёт многолетней трансформации заброшенных отвалов и хвостохранилищ, расположенных в Западной Сибири и Забайкальском крае.

Предмет исследования - закономерности функционирования и эволюции техногенных экосистем.

Научная проблема была сформулирована после того, как в ходе многолетней работы по изучению техногенных экосистем и развития познания автора об этих объектах возникли следующие вопросы:

Что такое техногенная экосистема и как определить её границы?

Как изменяется состав и свойства техногенной экосистемы в ходе её эволюции?

Какую роль в трансформации техногенной экосистемы играют факторы гиперкриогенеза?

Каково соотношение ценных и токсичных компонентов и ресурсов в каждой изученной экосистеме и как оно меняется со временем?

На взгляд автора решение этих вопросов представляет существенный теоретический и практический интерес для развития науки, экономики и общества.

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. Ниже 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 (п. 3.1), схемы расстановок профилей электротомографии и заложения шурфов работ на каждом из объектов в отдельности (пп. 3.2 – 3.7), методы анализа состава вещества и растворов (п. 3.8), методы постановки, реализации и интерпретации экспериментов и расчётов (п. 3.9).

Полевые геохимические и геофизические исследования

1. *Геофизические исследования* проводились с использованием метода электротомографии. Измерения проводились с помощью станции «Скала-48». Аппаратура и методы интерпретации данных разработаны в ИНГГ СО РАН [Манштейн и др., 2002]. На первом этапе предварительно исследуется геоэлектрическая зональность объекта, его границы. Данные о распределении электрического сопротивления в пределах объекта позволяют нам 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 включают*
- *опробование*

- вещества отходов в выборочных шурфах в зонах с контрастными электрическими сопротивлениями;
- дренажа и подземных 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, фильтрацию 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].*

Анализ химического состава вещества и растворов

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 карбонатного углерода* методами классической аналитической химии для определения кислотопродуцирующего и кислотонейтрализующего потенциалов вещества сульфидных отходов.

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

5. *Измерение концентраций*

- анионов и катионов (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-) титриметрическими, потенциометрическими и турбидиметрическим 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) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в водных пробах: поровых растворах, грунтовых и речных водах. Результаты ИСП-МС позволяют обнаружить исследуемые элементы в концентрациях на уровне мкг/л. На основании данных о составе поровых растворов физико-химическим моделированием определяются соединения, в которых элементы находятся в поровом пространстве, оценивается их относительная подвижность при данных физико-химических условиях (значения рН и наличие комплексообразователей обусловлены преимущественно технологией переработки руд).

6. Определение *минерального состава* твердого вещества, сухих остатков с использованием рентгеноструктурного анализа (РСТА) и электронно-сканирующей микроскопии (Jeol JSM-638OLA).

Информация о минеральном составе сухих остатков дает представление о вторичных минеральных формах. Методика, примененная для Беловской техногенной системы, описана в работе [Bortnikova et al., 2019].

Эксперименты и расчёты

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 *Bacillus thuyoides* 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 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

золотоизвлекающей фабрики сделаны расчёты стоимости извлечения золота и для Урских отвалов – барита, и оценена рентабельность проектов.

3.1. Описание алгоритма полевых геохимических и геофизических исследований

3.1.1. Геохимические и гидрохимические полевые исследования

Опробование вещества отходов проводили в шурфах глубиной 1.5-2 м. Слои для опробования (5-15 см) выбирались на основе визуального осмотра (различия в грансоставе, цвете, запахе вещества). Пробу весом 500 г отбирали пластиковым совком.

На месте из части каждой пробы изготавливалась суспензия (паста), для чего к твердому веществу добавлялась дистиллированная вода в соотношении 2/1. Этот метод хорошо известен в зарубежной литературе [Smart et al., 2002] и дает первичную информацию о составе жидкой фазы, формирующейся при контакте вещества отходов с атмосферной водой. Другая часть пробы запаковывалась в герметичные полиэтиленовые пакеты для транспортировки таким образом, чтобы сохранить влагу.

Опробовались дренажные ручьи, а также речные воды в четырёх зонах: 1) принимающих дренаж, 2) удаленных от зоны техногенного воздействия (в 5 км выше по рельефу), 3) по ходу течения через каждые 100-500 м, 4) в 20 км от техногенного объекта. Подземные воды опробовались из скважин, предназначенных для питьевого водоснабжения и расположенных, как правило, в непосредственной близости от объекта (100-500 м). Для сравнения проводили опробование скважин, не испытывающих техногенную нагрузку, расположенных более чем в 2 км от объекта.

Пробы дренажных и речных вод брали с глубины 20 см, грунтовых вод из скважин с глубины 10-30 м, в стеклянные 1 л бутылки для анализа на основной

ионный состав, в пробирки 10 мл с фильтрованием через мембранный фильтр 0.45 мкм и подкислением перегнанной азотной кислотой (100 мкл на 10 мл пробы или до pH 2) для последующего определения микроэлементного состава. Пробы транспортировались в лабораторию в темных прохладных условиях (+4°C).

Величину удельной электропроводности (УЭП) в пастах и растворах определяли в полевых условиях прямым кондуктометрическим методом прибором Cond315i (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, Германия). Определение проводится в диапазоне 0-500 мСм/см с относительной погрешностью ± 0.5 %. Значения pH и окислительно-восстановительного потенциала (Eh) измерены прямым потенциометрическим методом при помощи портативного прибора Эксперт-001 («Эконикс-Эксперт», г. Москва) или pH/Т-метром HI 9025 С, HANNA Instruments, США. Перед измерением pH проведена калибровка прибора по стандартным растворам с известными значениями pH (3.56; 4.01; 6.86; 9.18). Точность измерений составляет ± 0.01 pH.

3.1.2. Газоаналитические полевые исследования

Измерение концентраций газов (CS_2 , SO_2 , H_2S , $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{SO}$) проводили при помощи портативного газоанализатора ГАНК-4 (Москва), оснащенного химической кассетой (SO_2) и оптическими детекторами (CS_2 , H_2S , $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{SO}$). Для этого на поверхности изучаемого объекта выкапывались лунки глубиной 20 см по регулярной сети опробования 50 x 50 м и измерялась концентрация газа следующим образом: в лунку устанавливалась пластиковая емкость без дна, в неё погружался измерительный зонд, соединенный силиконовым шлангом с измерителем ГАНК-4, так, чтобы высота зонда над поверхностью земли не превышала 10 см, в течение двух минут прокачивалось 5 л воздуха и фиксировалась концентрация определяемого газа. Измерения повторяли три раза, записывали среднее значение. Параллельно фиксировали температуру грунта и влажность воздуха.

При проведении динамических (time-lapse) электротомографических и газоаналитических измерений концентрации диметилсульфида C_2H_6S (DMS), диметилсульфоксида C_2H_6SO (DMSO), дисульфида углерода CS_2 , диоксида серы SO_2 в атмосферном воздухе над поверхностью земли определяли в безветренное солнечное время в период времени с 12.00 до 18.00. В каждой точке устанавливали «ловушку» из 5-литровой пластиковой бутылки с отрезанным дном и закрытым горлом. Спустя 1 час начинали измерение. Трубку газоанализатора погружали в бутылку через горлышко на расстояние 10 см от поверхности грунта, записывали по 3 параллельных показания с последующим усреднением.

3.1.3. Электротомография

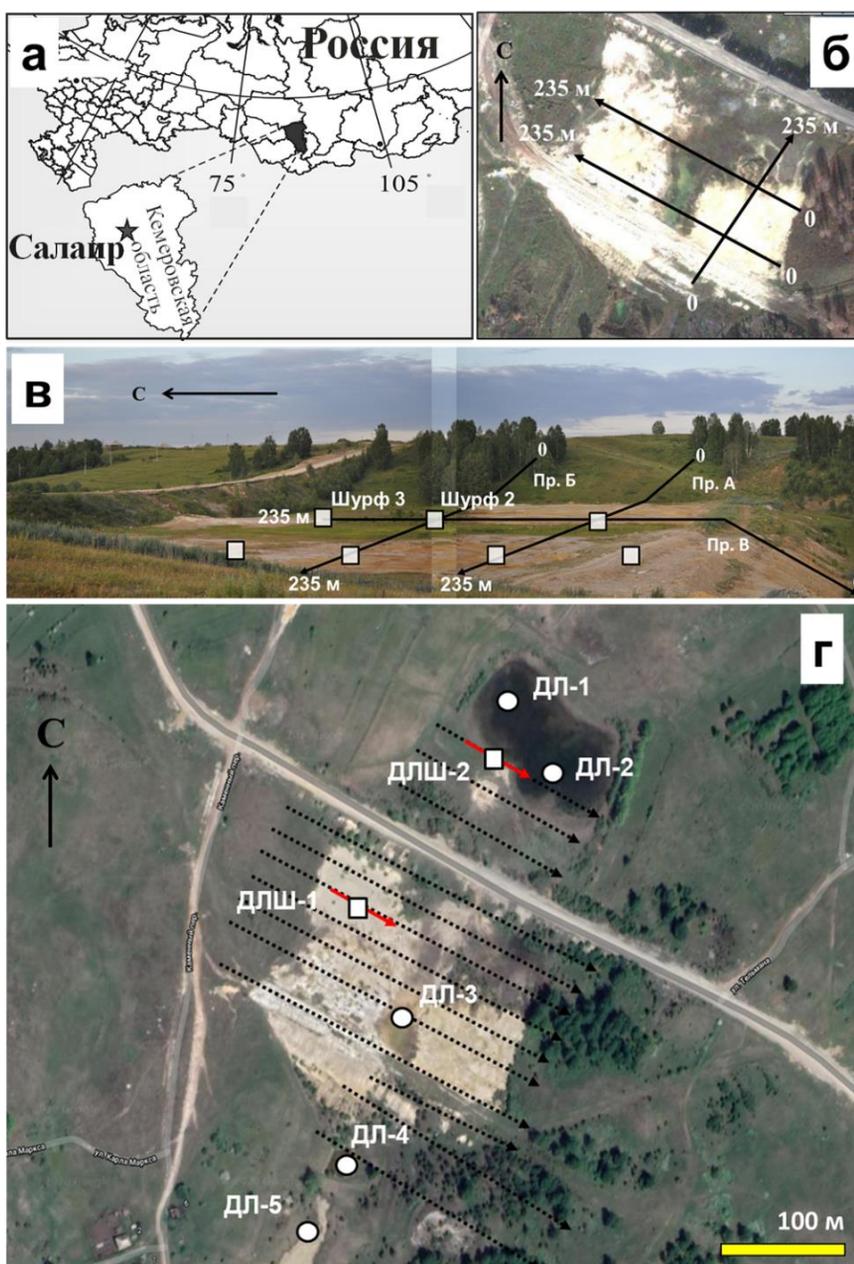
В ходе полевых работ на каждом из исследуемых объектов выбирались две площадки по данным визуального осмотра с ориентацией на цвет и влажность отложений. Измерения проводились, как правило, по нескольким параллельным профилям, расположенным на расстоянии 50 м друг от друга, и одному перпендикулярному. Шаг измерений по профилю составлял 5 м. При измерениях применялась последовательность подключения электродов, соответствующая установке Шлюмберже. Первичная фильтрация данных осуществлялась в программе Siber Tools (разработка ИНГГ СО РАН, ООО «Конструкторское Бюро Электротометрии», Новосибирск). Обнаружение границ смены удельного электрического сопротивления (УЭС) проводилось при помощи инверсии методом «robust», минимизирующей эффект влияния блоков данных друг на друга [программный продукт Res2DInv, Loke, 2009]. Для всех профилей ошибка решения обратной задачи на пятой итерации составляла 1.5-2 %. Визуализация результатов электротомографических измерений осуществлялась при помощи программы Surfer (Golden Software, LLC, США), в результате чего строились геоэлектрические разрезы, по которым можно судить о распределении электрического сопротивления. Результаты инверсии приведены к единой

шкале. При помощи программного продукта Voxler (Golden Software, LLC, США) проведена обработка данных для визуализации распределения удельного электрического сопротивления в объеме. Далее выбирались зоны с наиболее контрастными значениями УЭС, в них проводили дополнительные измерения по профилям длиной 14.1 м с расстановкой электродов с шагом 30 см, последовательность подключения электродов соответствовала установке Шлюмберже. Обработка данных проводилась с применением программ Res2DInv и Res3DInv [Loke, 2009]. В результате в полевых условиях были получены геоэлектрические разрезы, по которым можно судить о распределении УЭС по латерали и на глубину в пределах всего хранилища. Кроме того, геоэлектрические разрезы, полученные методом «микроэлектротомографии», позволяли получить представление о распределении УЭС в пределах 3 м от поверхности с детальностью около 15 см, что в свою очередь помогало выбрать места расположения шурфов для геохимического опробования и последующего выявления взаимосвязи удельного электрического сопротивления, состава и петрофизических характеристик вещества в каждом слое (размер частиц, влажность, проницаемость вещества, минерализация порового раствора, содержание железа, цветных металлов, серы сульфидной). Измерения, обработка и интерпретация данных проводились совместно с Ю.Г. Кариним (работы 2007-2015 гг.), В.В. Оленченко и П.С. Осиповой (2016-2022 гг.). Схема расположения профилей электротомографии и шурфов, а также некоторые нюансы обработки данных, отличающиеся от приведенных выше, приведена для каждого объекта в отдельности в разделах 3.2-3.7.

Метод электромагнитного сканирования, реализованный при помощи ЭМС-сканера (разработка ИНГГ СО РАН и ООО «Конструкторское бюро электротомографии»), был использован для определения границ объекта. Профилирование проводилось на частоте 100 кГц с привязкой данных с помощью GPS.

3.2. Схема исследований хвостохранилища Дюков Лог (г. Салаир, рис. 3.1)

В ходе полевых работ 2013 г. оконтурены площадки 235×235 м на поверхности хвостохранилища в южной его части. Геоэлектрические разрезы построены по трем профилям: двум параллельным, расположенным на расстоянии 50 м друг от друга, и перпендикулярному им (рис. 3.1б, в). Шаг измерений по профилю составлял 5 м при длине каждого профиля 235 м. Последовательность подключения электродов соответствует установке Шлюмберже. Для геохимического опробования вертикальных разрезов выкопаны и опробованы семь шурфов (глубиной до 3 м) в зонах с наименьшими значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) среды. Летом 2020 г. проведены дополнительные полевые работы в южной и северной частях хранилища с использованием метода электротомографии и верификацией геохимическим опробованием. Повторены измерения методом электротомографии по сети из 13 параллельных профилей (рис. 3.1г). Шаг измерений по профилю составлял 5 м, длина 235 м, расстояние между профилями 20 м, максимальная глубинность исследований – не более 45 м. Профили захватывали площадку отвала и заходили на борта. Последовательность подключения электродов соответствовала четырехэлектродной установке Шлюмберже. Преобработка данных проводилась в программе Xeris (разработка ООО «Конструкторское Бюро ЭлектрOMETрии», Новосибирск). В контрастных по сопротивлениям зонах выкопаны шурфы глубиной 190 см, опробованы визуальными различными слоями, пробы транспортированы в лабораторию.



1 - □; 2 - ○; 3 - →; 4 - ----→; 5 - →

Рисунок 3.1 – Географическое положение г. Салаир (а), схема расположения шурфов и профилей электротомографии на хвостохранилище Дюков Лог в 2013 г. (б, в) и 2020 г. (г)

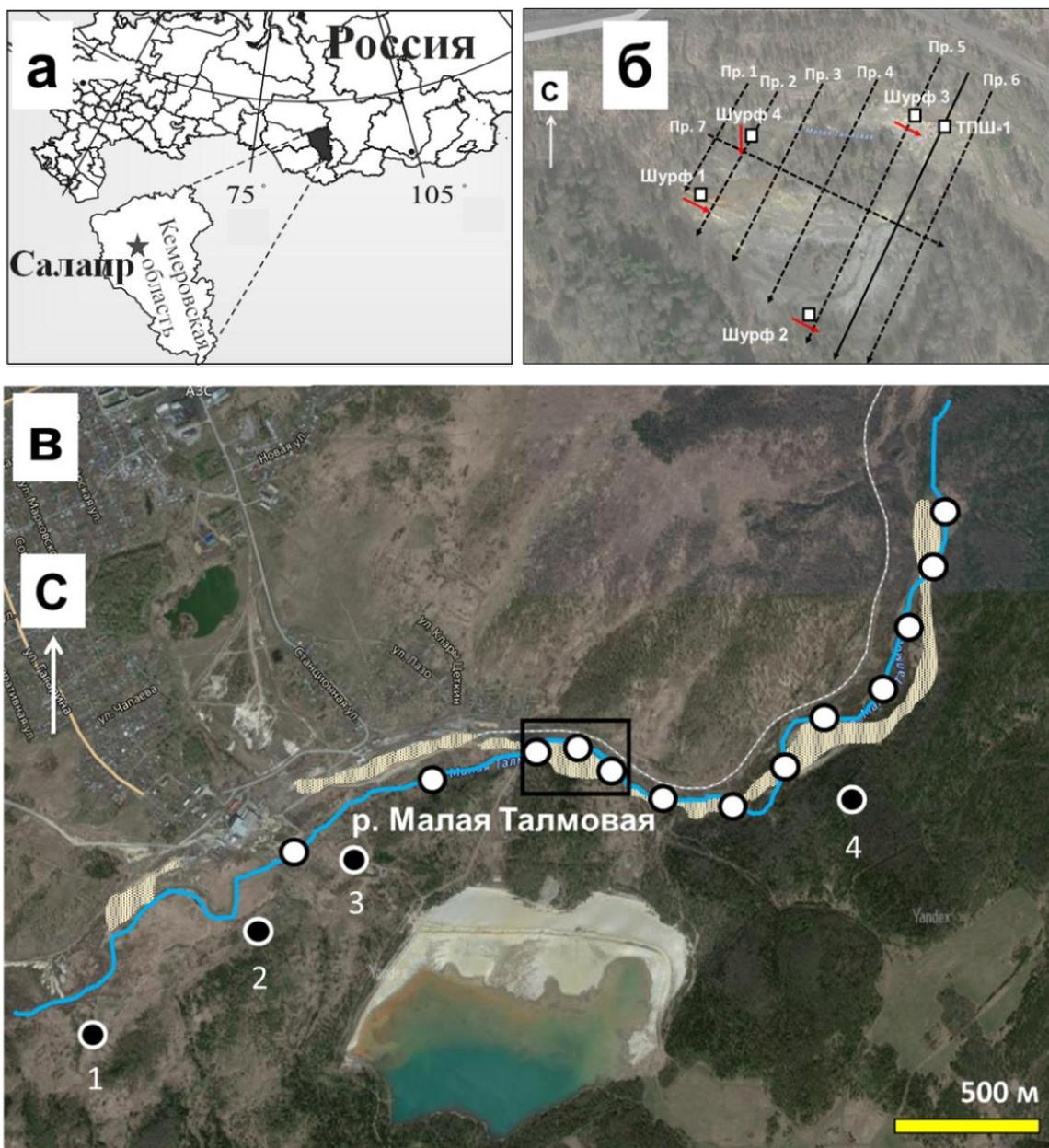
1 – шурфы 2, 3 (2013 г.), ДЛШ-1, 2 (2020 г.); 2 – точки отбора проб воды; 3 – профили электротомографии 2013 г., 4 – профили электротомографии 2020 г.; 5 – профили микроэлектротомографии 2020 г.

В работе далее подробно рассматривается геохимический состав вещества по данным двух шурфов 2013 г. (шурф 2 и 3, рис. 3.1в) и двух шурфов 2020 г. (ДЛШ-1 и ДЛШ-2, рис. 3.1г). Расчёты ресурсов химических элементов в хранилище Дюков Лог проводятся по результатам опробования семи шурфов 2013 г. (рис. 3.1в) и двух шурфов 2020 г. (рис. 3.1г).

3.3. Схема исследования хранилища Талмовские Пески (г. Салаир, рис. 3.2а)

Летом 2013 г. были проведены первые исследования хранилища методом электротомографии по профилю длиной 160 м (рис. 3.2б). Шаг измерений по профилю составлял 5 м. Последовательность подключения электродов соответствует установке Шлюмберже. На отметке 30 м по профилю выкопан и опробован шурф глубиной 160 см (до обводненного горизонта). В этом же сезоне были опробованы скважины питьевых вод (рис. 3.2в).

В течение полевых работ 2020 г. проводились исследования строения хвостохранилища методом электротомографии по семи профилям (рис. 3.2б) длиной 75-115 м. Сопротивления заземления составили ≤ 0.5 кОм. Шаг измерений по профилю – 5 м, последовательность подключения электродов соответствовала установке Шлюмберже. В контрастных по сопротивлениям зонах были выкопаны четыре шурфа глубиной 120 см (до подстилающих почв). По стенкам шурфов описана вертикальная зональность складированного вещества и опробованы все визуально различающиеся слои. Пробы отбирались титановым совком и упаковывались в герметично закрывающиеся пакеты (грипперы). В каждом слое измерялись температура вещества электронным термометром ЛТ-300-Н (производство ООО «ТЕРМЭКС», г. Томск) и концентрации газов (сероуглерода и диметилсульфида) мобильным газоанализатором ГАНК-4М (производство ООО НПО «Прибор» ГАНК, г. Москва).



1 - □; 2 - ○; 3 - ●; 4 - ; 5 - ; 6 - ; 7 - ; 8 -

Рисунок 3.2 – Географическое положение г. Салаир (а), схема расположения шурфов и профилей электротомографии на хранилище Талмовские Пески (б), схема опробования воды в р. Малая Талмовая и подземных вод (в). В черном прямоугольнике на рис. 2в выделен участок хранилища, на котором проводились подробные геохимические и геофизические исследования в 2013 и 2020 гг. (этот же фрагмент крупным планом показан на рис. 2б)
 1 – шурфы ТПШ-1 (2013 г.), 1-4 (2020 г.); 2 – точки отбора проб поверхностных вод; 3 – точки отбора проб подземных вод; 4 – р. Малая Талмовая, 5 – техногенные отложения; 6 – профиль электротомографии 2013 г.; 7 – профили электротомографии 2020 г.; 8 – профили микроэлектротомографии 2020 г.

В стенке шурфа в измеряемом участке сооружалось небольшое углубление, в котором производилось измерение газов. Таким образом мы получали концентрацию газов в поровом пространстве. По линии каждого шурфа были построены профили микроэлектротомографии. Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже. При обработке данных применялся сглаженный способ инверсии.

Для расчета ресурсов были дополнительно выкопаны и опробованы 10 шурфов: 5 на берегу р. Малая Талмовая и 5 в лесной части хранилища.

Река Малая Талмовая была опробована летом 2020 г. от точки, расположенной выше по течению от складированных отходов, и далее через 200 – 250 м были взяты пробы воды на всем протяжении реки по г. Салаир (рис. 3.2в). Кроме того, были взяты три пробы из небольших водоёмов рыжего цвета, образованных на поверхности отходов за счет сезонных осадков. Процедура полевых гидрохимических исследований и пробоподготовки описана в разделе 3.1.1.

3.4. Схема исследования Урских отвалов (пос. Урск, рис. 3.3)

Состав летучих соединений, продуцируемых веществом отвалов, был изучен несколькими методами в 2016-2018 гг.

Полевая газоаналитическая съемка с использованием газоанализатора ГАНК-4 проведена по четырём профилям: тринадцать точек на кварц-баритовом отвале и в юго-западном направлении от него в дренажной долине (тт. 1-13, рис. 3.3г, красные треугольники), семь точек на барит-пиритовом отвале (тт. 14-20), пять точек в лесной зоне в юго-западном направлении от барит-пиритового отвала (тт. 21-25), а также в фоновой точке (без наименования, рис. 3.3г). Концентрации газов определяли в безветренный солнечный день в период с 12.00 до 18.00 по методике, описанной в разделе 3.1.2.

Кроме того, для количественного описания состава газов пробы воздуха были взяты на концентратор АНП-11 (ООО «Сибел», Новосибирск), предоставленный А.Л. Макасом. Образцы в течение суток доставляли в лабораторию и анализировали методом ГХ-МС.

В феврале 2018 года на участках с контрастным распределением газов были измерены их концентрации в приповерхностном слое воздуха под снежным покровом. На профиле длиной 14 м был удален слой снега на склоне, и измерения были проведены таким же образом, как и летом. В тех же точках температура почвы была измерена с помощью теплового зонда на глубине 0.1 м. Концентрации газов в мае были определены по тому же микропрофилю.

Геоэлектрические разрезы в 2018 г. были построены по тем же профилям, что и при газовой съемке. Профиль 1 – на склоне кварц-баритового отвала южной экспозиции, длина 14 м, шаг между измерениями 30 см (рис. 3.3г, Пр1). Профиль 2 пересекал кварц-баритовый отвал, конус выноса и дренажную долину в юго-западном направлении, длина 240 м, расстояние между электродами – 5 м, с начальной точкой на поверхности отвала и с концом в роще на границе с дренажной долиной (рис. 3.3г, Пр2). Профиль 3 длиной 120 м и шагом между электродами 5 м начинался в верхней части барит-пиритового отвала и проходит вдоль его южного склона и дренажной долины в южном направлении (рис. 3.3г, Пр3). Профиль 4 – на склоне барит-пиритового отвала, длина 14 м, шаг между измерениями 30 см (рис. 3.3г, Пр4). Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже.

Участок с контрастными концентрациями газов (склон южной экспозиции кварц-баритового отвала) был выбран для мониторинговых наблюдений методом микроэлектротомографии. Измерения проводились летом и зимой с одновременным измерением концентраций газа. В пределах исследуемого участка были проведены микрозондирования вдоль склона (рис. 3.3г, Пр1) для детального изучения структуры верхней части разреза на глубину до 3 м в зимнее

(февраль) и весеннее (май) время. Последовательность подключения электродов соответствовала дипольно-осевой установке с максимальным расстоянием между центрами питающего и принимающего диполей 5.25 м.

Вещество отвалов в 2018-2020 гг. было опробовано шурфовым методом. Для этого в 8 точках были выкопаны шурфы глубиной 150-180 см: в четырёх точках по профилю ЭТ Пр. 1 (рис. 3.3б) на кварц-баритовом отвале через каждые 50 м и аналогично – по профилю Пр. 2 - на барит-пиритовом. Методика полевых геохимических исследований и пробоподготовки описана в разделе 3.1.1.

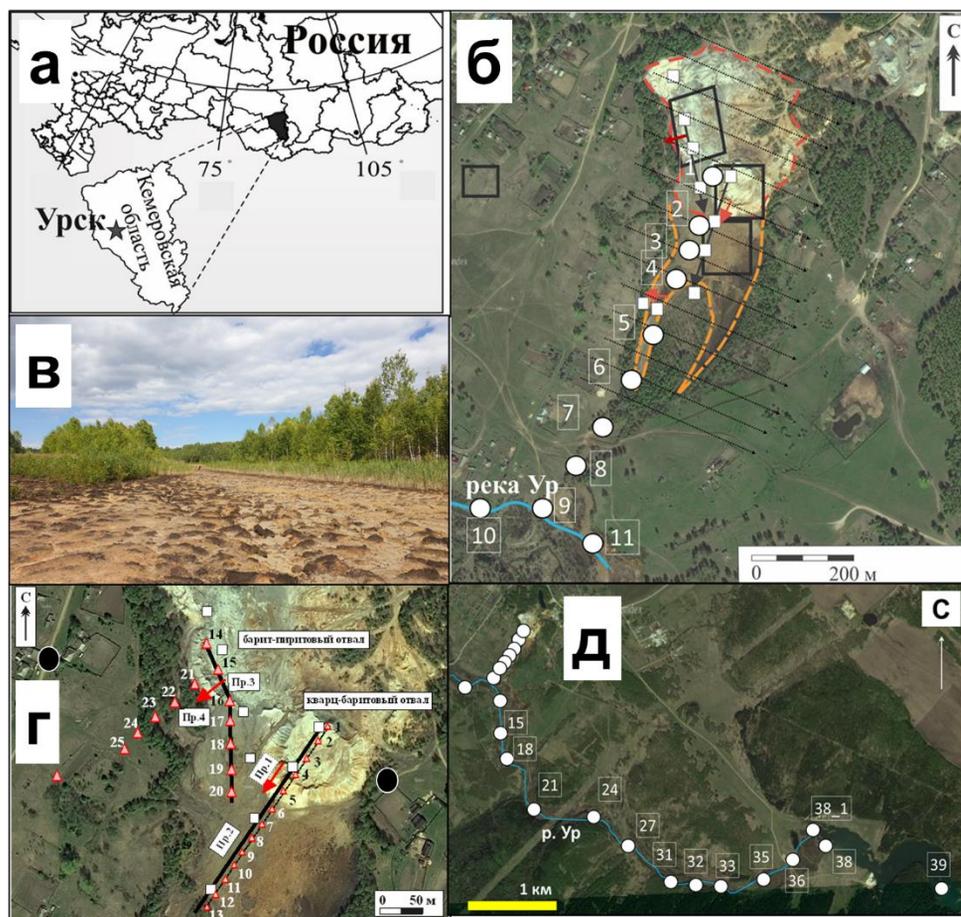
В 2020 г. по 14-ти профилям, пересекающим отвал и дренажную долину (рис. 3.3б), были построены геоэлектрические разрезы при помощи метода электротомографии. Шаг измерений по профилям составлял 5 м, длина профилей – до 355 м. При измерениях применена последовательность подключения электродов, соответствующая установке Шлюмберже. В дренажной долине (рис. 3.3в) был построен один профиль длиной 14.1 м с расстоянием между электродами 30 см для получения детального разреза глубиной 3 м (рис. 3.3б). В зонах с контрастными аномалиями УЭС выкопаны и опробованы 2 шурфа глубиной 1.5 м для сопоставления УЭС и химического состава вещества. Дополнительно были опробованы 4 шурфа в пирит-баритовом отвале и 4 шурфа в кварц-баритовом отвале в центральной и южной частях для расчёта ресурсов химических элементов.

Магнитная съёмка выполнена в ходе летних полевых работ 2020 г. по профилям электротомографии. Измерения модуля вектора магнитной индукции выполнялись на высоте 1 м над поверхностью земли при помощи пешеходного магнитометра Quantummag с частотой регистрации 0.2 Гц, расстояние между точками измерения вдоль каждого профиля составило 0.5-1 м в зависимости от скорости перемещения оператора по рельефу. Учет вариации геомагнитного поля за время измерений выполнен с привлечением данных новосибирской магнитной обсерватории “Ключи” (NVS). Привязка данных к координатам

осуществлялась при помощи встроенного GPS, из-за высокой плотности данных вдоль профиля в сравнении с расстоянием между профилями в процессе обработки выполнялось усреднение данных в сканирующем окне размера 25 м. Полученные данные были интерполированы на область измерений.

Для построения цифровой модели рельефа (ЦМР) применялся фотограмметрический метод аэрофотосъемки при помощи БПЛА Xiaomi Mi Drone. Было получено 134 фотоснимка с высоты 120 м, с продольным и поперечным перекрытием не менее 50 и 70 %. Разрешение фотоснимков составило 4000×3000 пикселей. В качестве точек геопривязки ЦМР использовались на местности опознаки с известными абсолютными координатами, определенными с помощью спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS. Камеральная обработка данных была проведена в ПО AgisoftMetashape, в ходе которой выполнялась автоматическая калибровка фотокамеры, предусмотренная в инструментах ПО, а также было выполнено автоматическое распознавание цифровых снимков с целью поиска общих точек, попавших в перекрытия продольного и поперечного маршрута БПЛА. Далее на основе распознанных снимков построен ортофотоплан и рассчитана ЦМР, методом фототриангуляции с учетом полученных ранее калибровочных параметров. Привязка итоговой ЦМР осуществлялась по координатам нескольких характерных объектов местности, отчетливо различимых на фотоснимке, полученным с помощью GPS-навигатора Garmin Etrex10 в абсолютном режиме накопления. Относительная привязка размера полученных ортофотоплана и ЦМР выполнена по измеренным рулеткой расстояниям между объектами. Средняя квадратичная ошибка репроецирования – 1.07 пикс, максимальная ошибка – 25.8 пикс. Погрешность определения расстояний по ортофотоплану, ЦМР и контрольным точкам не более 20 см.

Пробы воды отбирали в 28 точках: дренажные ручьи, р. Ур до впадения дренажа, зона смешения, река после впадения в неё дренажа, Урское водохранилище (рис. 3.3д). Процедура полевых гидрохимических исследований и пробоподготовки описана в разделе 3.1.1.



1 - □; 2 - ○; 3 - ●; 4 - ; 5 - ; 6 - ; 7 - ; 8 - —
 9 - - - - -; 10 - ; 11 - ▲

Рисунок 3.3 – Географическое положение пос. Урск (а), профили ЭТ 2018 и 2020 гг., точки отбора проб воды в дренажной системе, зоны газоаналитических исследований (б), точки отбора проб газа, шурфы, профили ЭТ и микро-ЭТ 2018 г. (г), фотография дренажной долины (в), точки отбора проб воды в р. Ур и водохранилище. 1 – шурфы; 2 – точки отбора проб поверхностных вод; 3 – точки отбора проб подземных вод; 4 – р. Ур, 5 – отвалы; 6 – дренажная долина; 7 – зоны газоаналитических исследований; 8 – профили электротомографии 2018 г.; 9 – профили электротомографии 2020 г.; 10 – профили микро-ЭТ; 11 – точки отбора проб газа

3.5. Схема исследования Комсомольского хвостохранилища (пос. Комсомольск, рис. 3.4)

В 2014-2016 гг. были проведены подробные электроразведочные и газоаналитические исследования.

Электроразведочные исследования проведены методом электротомографии в ходе летних полевых работ 2016 г., наблюдательная сеть состояла из девяти профилей протяженностью 356 м, расстояние между электродами составляло 5 м, между профилями – 50 м. Кроме того, была проведена съемка вкрест направлению движения дренажных путей по четырем профилям длиной 235 м, и одиночному профилю на дамбе длиной 595 м (рис. 3.4в). При измерениях применена последовательность подключения электродов, соответствующая установке Шлюмберже, глубина исследования составила 40 метров. С использованием обработанных данных были построены двумерные геоэлектрические разрезы и трехмерная модель распределения удельного сопротивления в объеме.

Измерения содержания SO_2 проводили в точках, расположенных на расстоянии 40 или 20 метров друг от друга, в ясную безветренную погоду по нескольким профилям (рис. 3.4в) в 2014-2015 гг. В каждой точке концентрацию измеряли три раза, а затем вычисляли среднее значение. Основная часть измерений была проведена в июле 2014 года (Bortnikova et al., 2016), дополнительное обследование было проведено в июле 2015 года. Измерения по газоаналитическому профилю (15 точек вдоль дамбы хранилища, ГАП-1, рис. 3.4в) проводили в 12:00 и 18:00. Температуру окружающего воздуха и поверхности хвостохранилищ измеряли термометром LT-300 (ООО "Термекс", Россия, <http://www.teplocontrol-sm.ru>).

В 2015 г. электроразведочные исследования проводились по шести профилям длиной 14-33 м для выявления геоэлектрической зональности

отложений до глубины 3 (черные и красные стрелки, рис. 3.4 в,г). Северный участок сети наблюдений включал в себя два профиля (Пр.1 и 2) длиной 14 м, южный – Пр.3 и Пр.4 – 22 м, Пр.5 – 14 м и Пр.6 – 33 м. При измерениях применена последовательность подключения электродов, соответствующая установке Шлюмберже, расстояние между электродами – 30 см.

Для определения состава вещества были отобраны пробы из пяти шурфов глубиной 160-180 см (рис. 3.4г). Образцы отбирались из каждого визуальном отличного слоя толщиной 15-20 см. Всего было отобрано 40 проб с помощью пластикового совка, каждая из них была упакована в двойные полиэтиленовые пакеты для транспортировки в лабораторию. Поровые воды (В-1 в южной части хранилища и В-2 – в северной, рис. 3.4в) извлекались из образцов на месте по процедуре, описанной в разделе 3.9.1. В 2020 г. дополнительно были выкопаны и опробованы 10 шурфов в контрастных по сопротивлениям зонах для расчёта ресурсов химических элементов.

Были взяты пробы воды из дренажного ручья (В-3, рис. 3.4в), впадающего в реку Воскресенка. Из колодца был взят образец питьевой воды (В-4, рис. 3.4в). Были отобраны пробы из прудков на поверхности хвостохранилища и дренажном ручье (рис. 3.4).

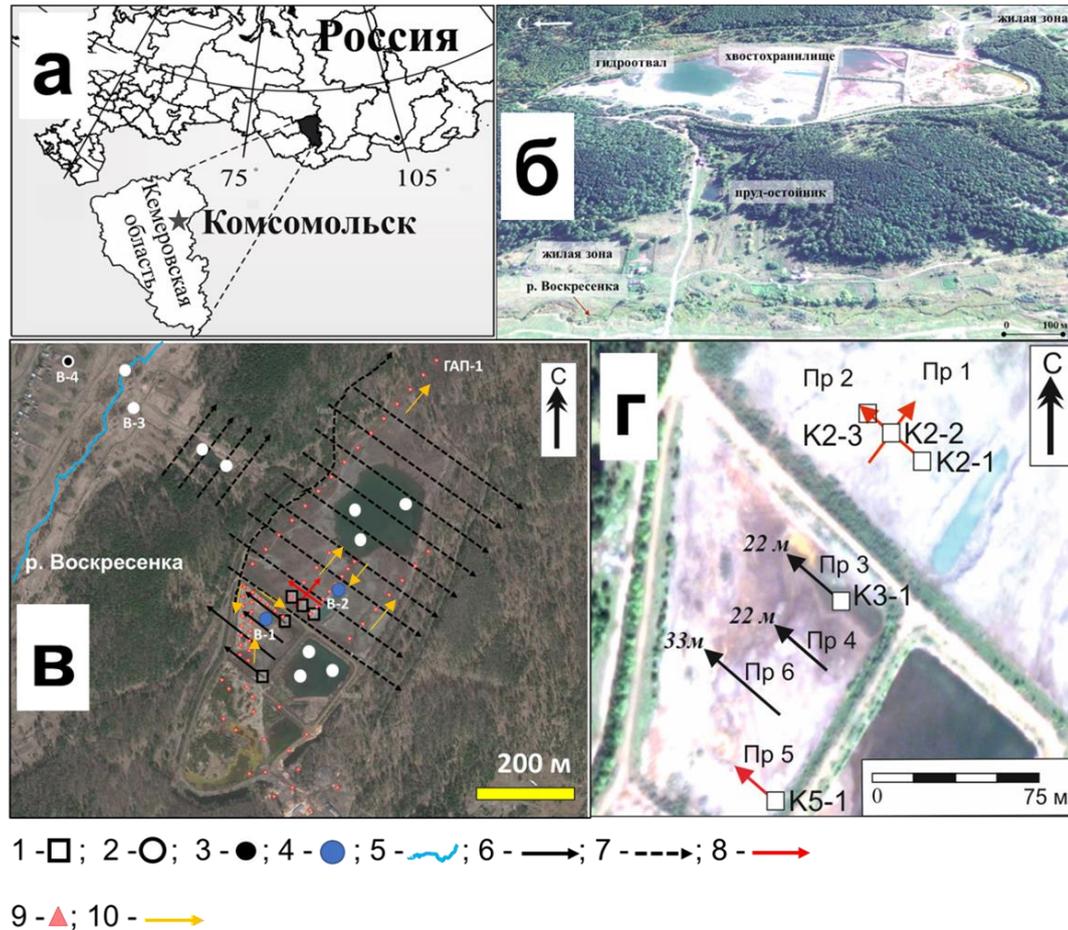


Рисунок 3.4 – Схема расположения (а), фотография Комсомольского пруда-отстойника (б), профили электротомографии, точки отбора проб воды, газовой съемки, шурфового опробования (в), профили электротомографии и расположение шурфов (2015 г.) (г), спутниковый снимок Комсомольского хвостохранилища (д). 1 – шурфы; 2 – точки отбора проб поверхностных вод; 3 – точки отбора проб подземных вод; 4 – точки отбора поровых вод, 5 – р. Воскресенка; 6 – профили электротомографии 2015 г.; 7 – профили электротомографии 2014-2016 гг.; 8 – профили микро-ЭТ; 9 – точки измерения концентраций газа, 10 – направление профилей газоаналитических исследований

3.6. Схема исследования Шахтаминского хвостохранилища, Забайкальский край (пос. Вершино-Шахтаминский, рис. 3.5)

В пределах участка исследований в 2016 г. выполнены электрические зондирования по двум профилям, пересекающим затопленный ранее участок (профиль А) и место бурения скважин (профиль Б). Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже с максимальным разносом питающей линии АВ до 235 м, расстояние между электродами составило 5 м, глубинность исследований достигала 45 м. Длина профиля А составила 480 м, профиля Б – 600 м. Для изучения детального строения верхней части разреза на глубину до 3 м были выполнены микрозондирования по профилям М1 и М2 (рис. 3.5б). Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже.

Для определения состава вещества в 2016 были отобраны пробы из двух шурфов около профилей М1 и М2, в 2022 гг. дополнительно были опробованы пять шурфов в северной части хранилища (рис. 3.5б). Глубина шурфов – 200 см, образцы брали из каждого визуально отличного слоя толщиной 15-20 см. Всего было отобрано 56 проб с помощью пластикового совка, каждая из них была упакована в двойные полиэтиленовые пакеты для транспортировки в лабораторию. Для расчёта ресурсов в 2023 г. были выкопаны и опробованы 10 шурфов.

Поверхностные воды были опробованы в точках 1-8 (рис. 3.5б) из прудков на поверхности хвостохранилища, природного ручья, разгружающегося на поверхность хранилища, природном ручье, водохранилище, р. Шахтама. Подземная вода была опробована из скважины (точка 9, рис. 3.5б) в пос. Вершино-Шахтаминский.

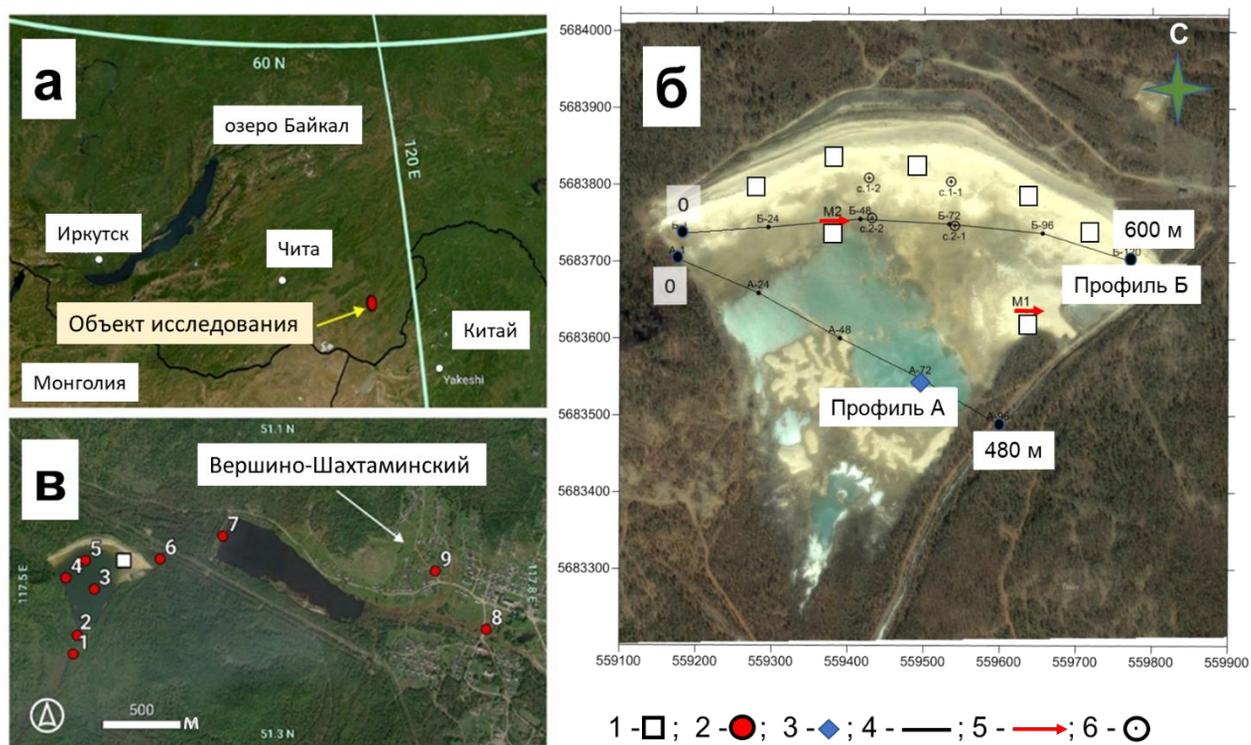


Рисунок 3.5 – Спутниковые снимки области исследования (Забайкальский край, пос. Вершино-Шахтаминский) (а), Шахтаминского хвостохранилища с профилями электротомографии, шурфами (б) и схемой отбора проб воды (в)

1 – шурфы; 2 – точки отбора проб воды; 3 – шандор; 4 – профили электротомографии; 5 – профили микроэлектротомографии, 6 – скважины

3.7. Схема исследования Дарасунского хвостохранилища (пос. Вершино-Дарасунский, рис. 3.6)

Электротомографические исследования Дарасунского хвостохранилища были выполнены в 2016 г. по пяти профилям (рис. 3.6в). Длина профилей составляла 115 м, расстояние между электродами – 5 м, глубинность исследования – до 20 м. Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже. По результатам обработки данных электротомографии были выбраны места расположения шурфов (контрастные по сопротивлениям зоны), визуализировано распределение электрического сопротивления по латерали, на глубину и в

объеме. Дополнительно выполнено построение геоэлектрического разреза по профилю длиной 14 м в районе шурфа 1 (рис. 3.6в).

Пробы твердого вещества взяты в трех шурфах глубиной 100-120 см в пределах сезонно-талого слоя (серые квадраты, рис. 3.6в). Всего с помощью пластикового совка было собрано 30 проб, упаковано в двойные полиэтиленовые пакеты для транспортировки в лабораторию. Дополнительно были опробованы 10 шурфов для оценки ресурсов химических элементов.

Гидрохимическое опробование поверхностных и подземных вод в районе Дарасунского хвостохранилища было проведено в ходе летних полевых работ 2016 г. в семнадцати точках (рис. 3.6б): р. Дарасун вблизи забора воды для гравитационной переработки огарков (Д-1), дренажный ручей около гравитационной фабрики до (Д-2) и после (Д-3) производства, технологический пруд-отстойник около фабрики в поселке (Д-4), ручей, питающий Байкальское водохранилище в южной части деревни (Д-5), подземная вода из питьевой скважины (Д-6), вода из водохранилища Байкальское (Д-7), ручей ниже по течению после водохранилища (Д-8), р. Туколай (Д-9). Опробованы были природный ручей за дамбой гидроотвала в южной части (Д-10), гидроотвал №2 у дамбы (Д-11), гидроотвал №1 (Д-12), свежая пульпа, поступающая в гидроотвал № 1 (Д-13), р. Дарасун ниже отвалов (Д-14) по рельефу, р. Дарасун ниже по течению около д. Нижний Стан (Д-15). В качестве фоновых точек были опробованы р. Жарча (Д-ф1) и водохранилище, используемое для питьевых и хозяйственных целей (Д-ф2), 5 км к западу от Дарасунской фабрики.

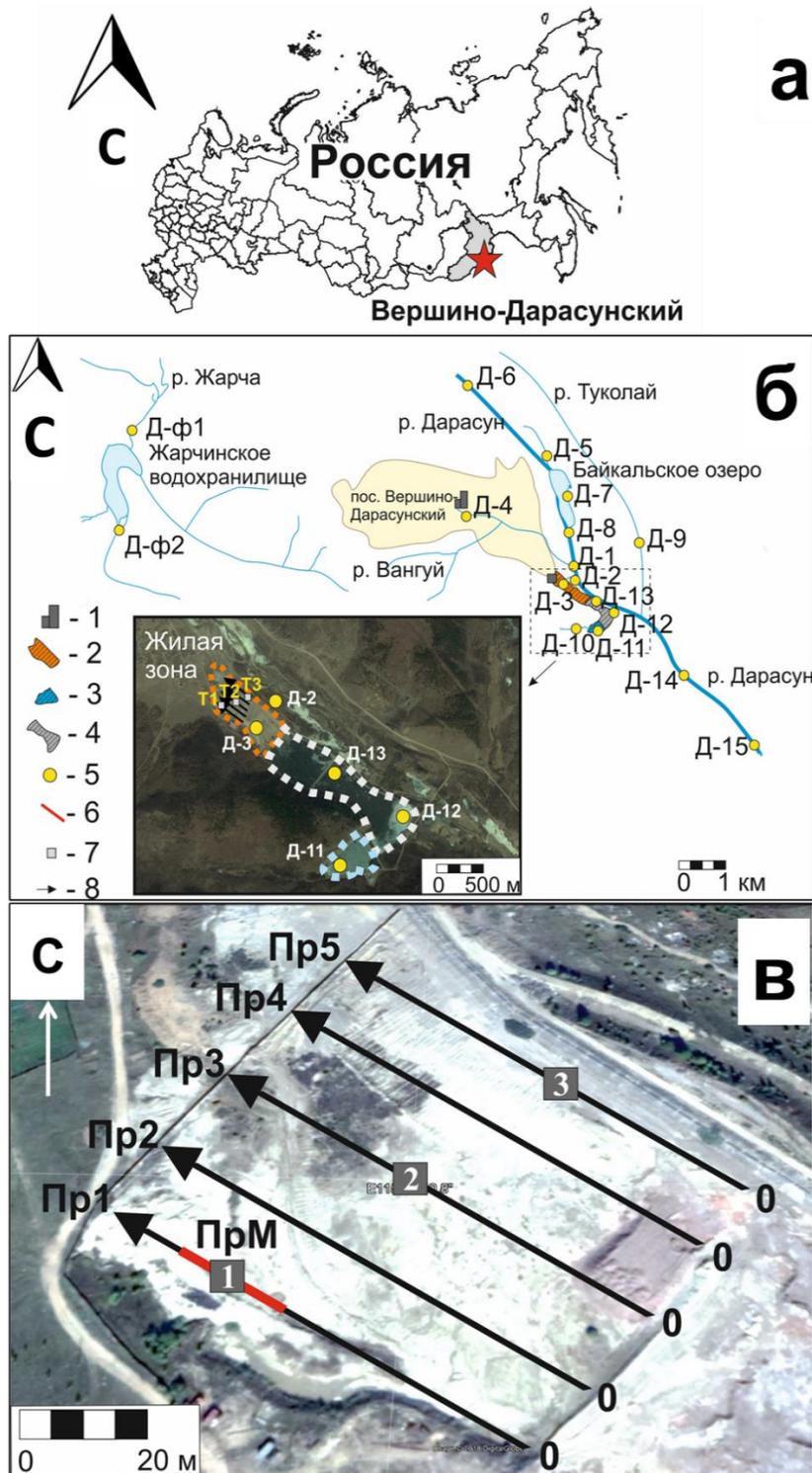


Рисунок 3.6 – Географическое положение (а), схема отбора проб воды, расположения профилей электротомографии и шурфов (б), спутниковый снимок поверхности хвостохранилища со схемой расположения профилей и шурфов (в)

1 – фабрика; 2 – хвосты (осушенная часть); 3 – пруд-отстойник; 4 – пульпоприёмники; 5 – точки отбора воды, 5 – р. Воскресенка; 6 – профиль микро-электротомографии; 7 – шурфы; 8 – профили электротомографии

3.8. Методы анализа состава вещества и растворов

3.8.1. Анализ химического состава и петрофизических характеристик твёрдого вещества

В лабораторных условиях пробы твёрдого вещества высушивали при комнатной температуре, гомогенизировали и анализировали на содержание породообразующих и примесных элементов (Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, Ti, P, Mn, Ba) методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) в аналитическом центре ИГМ СО РАН на установке СРМ-25 (аналитик Карманова Н.Г.).

Элементный состав твёрдых проб определяли рентгенофлуоресцентным методом с синхротронным излучением (РФА-СИ) на станции ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН (Барышев и др., 1986) (г. Новосибирск, аналитик Ю.П. Колмогоров) и масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск, аналитик Н.В. Федюнина) на содержание элементов (Cu, Zn, Cd, Pb, Sn, Ni, Co, Mo, Ag, Au, As, Sb, Bi, Ga, In, Tl, Be и др.).

Влажность, гранулометрический состав, пористость и плотность образцов отходов определялись в лаборатории экспериментальной сейсмологии ИНГГ СО РАН к.т.н. Н.А. Голиковым.

Значения УЭС в твёрдых образцах определены методом резистивиметрии на приборе Miller 400D (M.C. Miller Co., Inc., США) при различном водонасыщении с относительной точностью $\pm 1.6 \%$.

Минеральный состав образцов определен рентгеноструктурным методом на дифрактометре ДРОН-3 с монохроматизированным излучением в ИГМ СО РАН (аналитик к.г.-м.н. Н.А. Пальчик). Дополнительные исследования отдельных зёрен тяжёлой фракции вещества проводили методом электронно-сканирующей микроскопии на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-

6380 LA (Япония) с энергодисперсионным анализом в аналитическом центре ИГМ СО РАН.

3.8.2. Анализ химического состава растворов

Физико-химические параметры растворов (рН, Eh, электропроводность) определили методами и приборами, описанными в п. 2.1.2.

Содержание Cl^- в растворах определены прямым потенциометрическим методом при помощи портативного прибора Эксперт-001-3.0.4 («Эконикс-Эксперт») и ион-селективного электрода. Относительная погрешность в диапазоне концентраций 10-500 мг/л составляла 10 %. При концентрациях хлорид-ионов в растворе более 500 мг/л использовалось предварительное разбавление пробы дистиллированной водой. Концентрации сульфат-иона в растворах определены турбидиметрическим методом на спектрофотометре ПЭ-5400-ВИ («Экохим», г. Санкт-Петербург) с относительной погрешностью 10 %. Концентрации макрокатионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) и микроэлементов определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии (ИСП-АЭС) на приборе IRIS Advantage (Thermo Jarrell Ash, США) в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (аналитик С.Ф. Нечепуренко) с относительной погрешностью 5-10 % и масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск, аналитик Н.В. Федюнина) на приборах ELAN-9000 DRC-e, Agilent-7700x, Agilent-7900 (США) с относительной погрешностью 5-7 %.

3.8.3. Анализ состава газовой фазы методом ГХ-МС

Качественный анализ состава хвостовых газов проводился на полевом этапе с использованием портативного газоанализатора ГАНК-4 (раздел 3.1.2) и в лабораторных условиях при помощи хромато-масс-спектрометра,

разработанного и изготовленного в лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий ИНГГ СО РАН [Макас, Трошков, 2004]. Пробы анализировались при двух температурах 25°C и 50°C. После выдержки при заданной температуре в течение часа 60 мл паровой фазы из внутреннего объема проб хвостов перекачивались из стаканов в концентраторы, включающие тонкостенные трубы из нержавеющей стали с наружным диаметром 2 мм, содержащий слой сорбента Тенакс-ГА (0.015 см³). Каждую пробу пара вводили в газовую хроматографическую колонку HP-5MS методом прямой флэш-термодесорбции в токе гелия при температуре 300°C. Параметры колонки: 0.32 мм × 1 мкм × 15 м. В режиме разделения изотерма составляет 3 минуты; температура программирования 90-250°C; скорость нагрева – 10°C/мин.

Полученные данные хроматографической масс-спектрометрии обрабатывали с помощью программы AMDIS (Automatic Mass Spectral Deconvolution and Identification System), идентификацию отдельных компонентов проводили по масс-спектрам электронной ионизации с использованием библиотеки масс-спектрометров NIST/EPA/NIH (редакция 2014 г.).

3.9. Методы постановки, реализации и интерпретации экспериментов и расчётов

3.9.1. Определение форм переноса элементов с водными потоками

Моделирование ситуации взаимодействия атмосферных вод с отходами позволяет оценить долю химических элементов, которые находятся в веществе в водорастворимых формах и с легкостью переходят в водный раствор. В своих работах для таких оценок автор использует метод водных вытяжек. Для этого к навеске твердого вещества добавляется дистиллированная вода со значением pH

5.5 (аналог дождевой воды) в соотношении вода/твёрдое = 10/1, оставляется на 24 часа для перемешивания на магнитной мешалке при комнатной температуре.

Поровые растворы отжимали из трех влажных параллельных образцов массой 200 г под давлением 100 Па.

Анализ физико-химических параметров (рН, Eh, электропроводность), основного ионного и микроэлементного составов твёрдого вещества и растворов после экспериментов проводился с применением вышеописанных методов и приборов (пп. 3.1.2, 3.8.1, 3.8.2).

Доля элемента, переходящего из твердого вещества в раствор, рассчитывалась по формуле (3.1).

$$w = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где C_0 – исходная концентрация химического элемента в твёрдом веществе, г/т;

C_1 – концентрация химического элемента в твёрдом веществе после эксперимента, г/т;

w – доля химического элемента, находящегося в твёрдом веществе в водорастворимой форме, %.

3.9.2. Определение форм переноса элементов с газовыми потоками

Наблюдения за техногенными объектами в разное время года позволили зафиксировать следующий факт: и летом, и зимой над поверхностью изучаемых объектов (в первую очередь, с содержанием сульфидных минералов не менее 20 мас. %) мы определяем значимые концентрации серо- и углеродсодержащих соединений (CS_2 , H_2S , C_2H_6S , C_2H_6SO), зачастую превышающие предельно-допустимые и фоновые. Встал вопрос о происхождении этих соединений, а если конкретнее – о роли биотических факторов в их формировании. Для изучения роли бактериальной микрофлоры в изменении химического состава

техногенного вещества и генерации газов было проведено культивирование выделенного из вещества отходов (на примере Урских отвалов, Кемеровская область) штамма *Bacillus mycoides* с последующим анализом состава накопившихся над культуральной жидкостью соединений.

Навеска 1 мкг породы была высеяна на чашку Петри с питательной средой LB в 1.5 % агарозе, чашка Петри была оставлена на столе при комнатной температуре на 4 суток. Выросло около 50 колоний разных видов бактерий, в том числе две *Bacillus mycoides*. С помощью микробиологической петли во флакон, содержащий 100 мл жидкой питательной среды LB, был засеян отобранный один из двух ранее полученных штаммов *Bacillus mycoides*, и был поставлен в термостатированную качалку при 30⁰С и 40 оборотах в минуту на 12 часов. Был произведен засев инокулята и инкубация штамма *Bacillus mycoides* во флаконы и последующая инкубация. Бактериальный титр культуральной жидкости – число колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 см³ устанавливался путем засева 1/100 мкл на чашку Петри с агаризованной средой LB. После инкубации при комнатной температуре в течение 2 суток подсчитывалось число колоний (N). Титр (Т) вычислялся по формуле (3.2).

$$T=N \cdot 10^5 \text{ КОЕ/см}^3, \quad (3.2)$$

где Т – бактериальный титр культуральной жидкости;

N – число колоний;

КОЕ – число колониеобразующих единиц.

Титр инокулята составил 10·10⁶ КОЕ/см³. Во флаконы, в которые заседали штамм, было засеяно по 10 мл инокулята, то есть 10·10⁷ КОЕ. Так как объем культуральной жидкости был равен 200 мл, исходный бактериальный титр составил 0.5х10⁶ КОЕ/см³.

Для эксперимента были взяты четыре пары стеклянных бутылей емкостью 500 мл, в каждую из них помещали различные компоненты: I) питательную среду 150 мл, навеску 50 гр. грунта отвалов и бактерии (колбы №№ 1,2); II)

питательную среду 150 мл, навеску 50 гр. грунта отвалов (колбы №№ 3-4); III) питательную среду 150 мл и бактерии (колбы №№ 5-6); IV) питательную среду 150 мл (колбы №№ 7-8) (табл. 3.1). До добавления в колбы бактерий (№№ 1, 2, 5, 6), все пробы автоклавировали 20 минут при 120 °С.

Таблица 3.1 – Условия проведения экспериментов

№ колбы	№ пары	Расшифровка
1, 2	I	Питательная среда+ <i>Bacillus mycoides</i> +грунт (СБГ)
3, 4	II	Питательная среда+грунт (СГ)
5, 6	III	Питательная среда+ <i>Bacillus mycoides</i> (СБ)
7, 8	IV	Питательная среда (С)

Флаконы оставили закрытыми герметизирующей пленкой Парафильм М при температуре +35 °С. Через 28 часов от начала эксперимента был измерен титр бактерий, то есть число колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 см³. На каждой чашке Петри подсчитывалось число колоний, что позволило вычислить бактериальный титр. В флаконах 5 и 6 с питательной средой без грунта отвалов титр составил $6.4 \cdot 10^6$ КОЕ/см³, то есть увеличился почти в 13 раз по сравнению с исходным. В то же время в флаконах 1 и 2 с питательной средой с грунтом отвала, титр увеличился лишь немногим более, чем в 4 раза и составил $2.2 \cdot 10^5$ КОЕ/см³.

Одновременно с измерением титра в флаконах №№ 1, 3, 5, 8 пробоотборником АНП-11 (ООО «СИБЕЛ», Новосибирск) на концентратор с сорбентом Терах ТА были отобраны пробы воздуха для последующего анализа в лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ/МС) (исследования проведены к.т.н. А.Л. Макасем).

В результате обработки ГХ/МС данных с помощью программы AMDIS и базы данных масс-спектров электронной ионизации (NIST 2017) в пробах определен широкий спектр летучих органических соединений.

3.9.3. Термодинамическое моделирование химических форм нахождения химических элементов в водных растворах

Моделирование форм перехода химических элементов из вещества отходов в водный раствор и дальнейшей их миграции с дренажными и речными водами проводилось при помощи нескольких программных продуктов: Visual Minteq 3.0 [Gustafsson, 2011] и Wateq4F [Ball & Nordstrom, 1991]. В качестве априорной информации для расчётов использовались данные о физико-химических параметрах среды (рН, Eh, электропроводность), основном ионном и микроэлементном составе. Программный комплекс Visual Minteq 3.0. имеет обширную термодинамическую базу данных, которая позволяет рассчитывать формы нахождения и минеральные равновесия в водном растворе [Allison et al., 1991]. Помимо перечисленного эту программу можно использовать для вычисления различных процессов химического равновесия, включая кислотно-щелочной баланс, окислительно-восстановительный и адсорбционный баланс. Программное обеспечение содержит мощную базу данных констант равновесия, которая при необходимости может быть изменена [Gustafsson, 2011]. Для неорганических комплексов использовалась термодинамическая база данных по умолчанию, которая главным образом основана на компиляции NIST [Smith et al., 2004]. При расчете форм нахождения и индексов насыщения в программе Visual Minteq 3.0 вводились концентрации основных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) и анионов (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , F^-), рН, Eh, Si, температура и концентрации элементов Fe, Mn, Al, Ba, Ti, Ni, Zn, Cd, Pb, Co и др.

Одним из основных понятий, используемых при моделировании, является индекс насыщения минералов (ИН, SI). Он используется для характеристики

недонасыщенных, перенасыщенных и равновесных растворов и определяется как отношение логарифма ионной активности продукта (ИАП) к константе его равновесия (Кр.): $\log (\text{ИАП}/\text{Кр.})$. Величина равная +1 указывает на десятикратное перенасыщение, а -2 на стократное недонасыщение раствора по отношению к некоей минеральной фазе. Фактически, равновесие может наступать в диапазоне значений от -0.2 до +0.2. Если значения ИИ < -0.2 , то водный раствор недонасыщен, а если ИИ $> +0.2$, то перенасыщен по отношению к данному минеральному соединению.

3.9.4. Построение карт гидрохимических аномалий

Карты гидрохимических аномалий визуализируют информацию о концентрации того или иного элемента в изучаемой гидрохимической системе (дренаж-река) в сравнении с кларком или ПДК. Такие карты дают представление о пространственном распространении химических элементов в районе расположения изучаемой техногенной системы. В рамках данного исследования использовано кларковые концентрации элементов для речных вод [Taylor & McLennan, 1985], предельно допустимыми концентрациями (ПДК_в) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [СанПиН 1.2.3685-21] или фоновыми концентрациями. Построение карты гидрохимических аномалий для каждого конкретного элемента сводится к нескольким простым процедурам:

1. Определение концентрации элемента в каждой точке изучаемой гидрографической сети.
2. Нормирование концентрации элемента на кларк, ПДК_в или фоновую концентрацию расчёт коэффициента концентрирования (КК).
3. Выделение 5-6 диапазонов значений КК, присвоение каждому диапазону символа заданной величины.

4. Нанесение на каждую из точек карты символа соответствующего диапазона с использованием ПО Surfer, ArcGis или Corel Draw.

В рамках данного исследования рассматриваются преимущественно карты для типичных рудных металлов, то есть тех элементов, которые характерны для обрабатываемых барит-полиметаллических, медно-молибденовых или золотоносных руд и, соответственно, присутствуют в изучаемых техногенных экосистемах в значимых концентрациях (0.001-20 мас. %): Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, Co, Ni и др. Изучение подвижности этих элементов даёт информацию о том, как меняется состав (и, соответственно, ресурсы) каждой системы со временем. Дополнительно рассматриваются карты для элементов-примесей, характерных для полиметаллических руд: As, Be, Tl, Hg. Такой выбор обусловлен тем, что эти элементы относятся к 1-му классу опасности и представляют дополнительный интерес с точки зрения оценки экологических рисков за счёт выщелачивания из вещества отходов.

3.9.5. Эколого-экономические расчёты (ресурсы, ущербы, рентабельность переработки)

3.9.5.1. Ресурсы ценных и токсичных компонентов

Ресурсы ценных и токсичных элементов рассчитывались на основании информации о распределении УЭС в объеме техногенной экосистемы и его связи с концентрациями ценных и токсичных элементов, а также их водорастворимых форм.

На первом этапе оконтуривается тело техногенной системы при помощи метода электротомографии, строятся объемные модели, в которых выделяются зоны с различными сопротивлениями (1-10 Ом·м, 11-50 Ом·м, 51-300 Ом·м), рассчитывается объем каждой среды. Далее строятся геоэлектрические разрезы методом микро-электротомографии и выкапываются шурфы в зонах с

контрастными УЭС (в соответствии с тремя указанными выше диапазонами). Послойно, через каждые 15 см по глубине, опробуется вещество, анализируются его физико-химические параметры (рН, Eh, электропроводность), гранулометрический состав, влажность, плотность, элементный состав и доли водорастворимых форм (подробнее методика описана в пп. 3.1.1, 3.8.1, 3.8.2, 3.9.1). На основании полученных данных строятся связи между УЭС и элементным составом вещества с учётом его влажности, грансостава и плотности. И, наконец, рассчитываются объемы химических элементов в теле техногенной системы на основании совокупности данных: 1) объемы техногенного вещества трёх типов – со значениями УЭС 1-10 Ом·м (А), 11-50 Ом·м (Б), 51-300 Ом·м (В); 2) концентрации химических элементов в веществе каждого типа (А-В); 3) численные связи «УЭС – концентрация элемента». Для каждого исследуемого объекта отдельно рассматривается суммирование объемов вещества того или иного типа при подсчёте ресурсов ценных и токсичных элементов. Пример такого расчёта для хвостохранилища Талмовские Пески описан в работе [Юркевич и др., 2023].

3.9.5.2. Ущерб водным и земельным ресурсам (на примере объектов, расположенных в Кемеровской области)

В рамках данного проекта авторами была предпринята попытка оценить экологический ущерб от размещения заброшенных отходов в непосредственной близости от населенного пункта на примере хвостохранилища золотоизвлекательного завода в Тисульском районе Кемеровской области (пос. Комсомольск) и Урских отвалов переработки барит-полиметаллических руд. Интерес к техногенному объекту с точки зрения его экономической значимости для Сибирского федерального округа, а также важности экологических проблем, стоящих перед регионом, и открытость данных о химическом составе компонентов (вещество отходов, поровые и дренажные растворы) определили

выбор этого объекта для исследования и позволили оценить ущерб за счёт поступления загрязняющих веществ с дренажными потоками и ветровым переносом водным и земельным ресурсам в зоне техногенного воздействия.

Основная цель - экономическая оценка влияния горно-производственной деятельности на окружающую среду со стороны складированных отходов Комсомольского золотоизвлекательного завода. Были решены следующие задачи: 1) систематизировать российские и зарубежные методологические подходы к экономической оценке накопленного экологического ущерба; 2) рассмотреть методический подход к оценке накопленного экологического ущерба по методике консолидированной оценки ущерба; 3) дать экономическую оценку накопленного экологического ущерба за счёт загрязнения водных и земельных ресурсов вокруг складированных отходов Комсомольского золотоизвлекательного завода. Конечной целью таких исследований является разработка экономически обоснованного плана работ по устранению ущерба и восстановлению естественной целостности территорий.

Подходы к оценке экологического ущерба в разных странах имеют различия. Исследователями в РФ применяются, в основном, пять методов экономической оценки экологического ущерба: 1) прямого подсчета; 2) расчёта ущерба от монозагрязнителей; 3) косвенной оценки; 4) производственной функции; 5) консолидированного ущерба.

Официальным методом экономической оценки экологического ущерба на территории Российской Федерации является метод консолидированной оценки, разработанный Президиумом АН СССР в 1983 году. Согласно этой методике, экономическая оценка экологического ущерба представляет собой сумму оценки ущерба, нанесенного каждым из компонентов биосферы, умноженные на поправочные коэффициенты, учитывающие надежность расширенного метода (формула 3.3).

$$U = \alpha U_{\text{воздух}} + \beta U_{\text{почва}} + \gamma U_{\text{вода}}, \quad (3.3)$$

где $U_{\text{воздух}}$ – удельный экономический ущерб от выброса загрязняющих веществ в атмосферу, долл. в год;

$U_{\text{почва}}$ – удельный экономический ущерб от нарушения и загрязнения земельных ресурсов, долл. в год;

$U_{\text{вода}}$ – удельный экономический ущерб от поступления загрязняющих веществ в водные источники, долл. в год;

α, β, γ – поправочные коэффициенты, определяемые как соотношение между показателем ущерба, установленным методом сводного счета, и показателем ущерба, определенным методом прямого расчета.

Ущерб, который возникает при поступлении загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водоемы оценивается по формуле (3.4):

$$U_{\text{вода}} = U_{\text{удвода}} \times G \times M, \quad (3.4)$$

где $U_{\text{удвода}}$ – удельный экономический ущерб от сбросов сточных вод в водные объекты, руб.;

G – константа, принимающая разные значения в зависимости от экологической значимости региона;

M – приведенная масса вредных веществ, сбрасываемых анализируемым источником в водные объекты водохозяйственного участка за год, тонн в год.

Приведенную массу вредных веществ рассчитывается по формуле (3.5):

$$M = \sum_{i=1}^n A_i m_i N_i, \quad (3.5)$$

где i – вид загрязняющего вещества;

N – количество загрязняющих веществ;

A_i – показатель относительной опасности i -го поллютанта;

m_i – ежегодная общая масса сброса i -го загрязняющего вещества источником, т в год.

Значение m_i рассчитывается по формуле (3.6):

$$m_i = V_i \cdot C_i, \quad (3.6)$$

где V_i – объем годового поступления дренажных вод в водоем, м³ в год;
 C_i – концентрация i -го загрязнителя в дренажном ручье, кг/м³.

Индекс относительной опасности загрязняющего вещества определяется из следующего соотношения (3.7):

$$A_i = 1/\text{ПДК}_i, \quad (3.7)$$

где ПДК_i – предельно допустимая концентрация i -го вещества в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

Ущерб окружающей среде от загрязнения почвы рассчитывается по формуле (3.8):

$$U_{\text{почва}} = H \times k_E \times \sum_{i=1}^n S_i N_i k_{P_i} k_{d_i}, \quad (3.8)$$

где H – стоимость земель населенных пунктов в районе, руб./м²;
 k_E – коэффициент экологической значимости почвенных ресурсов региона;
 N – количество загрязняющих веществ;
 S_i – площадь загрязнения i -м веществом, кв. м;
 k_{P_i} – коэффициент, характеризующий степень загрязнения i -м веществом;
 k_{d_i} – коэффициент, характеризующий глубину загрязнения i -м веществом.

Безусловно, для проведения расчётов авторам понадобились дополнительные полевые исследования для сбора сведений об объекте: концентрации широкого спектра химических элементов в воде, отходах и загрязнённых почвах, глубина распространения дренажных вод (глубина загрязнения), ореолы распространения металлов и примесных элементов (для оценки площади загрязнения). Стоит подчеркнуть, что все оценки экологических ущербов проводились на основании априорной информации, полученной лично автором на основании геохимических и геофизических исследований.

3.9.5.3. Расчет экономической эффективности извлечения баритового концентрата из вещества отвалов

Используется комплекс методов, включающий системный анализ, экономико-математическое моделирование и оценку инвестиционного проекта. Последовательность выполнения комплексной экономической оценки состоит из пяти основных этапов:

1. Сырьевой этап определяет последовательность оценки запасов и периода освоения для прогноза уровня производства баритового концентрата.

2. Технический этап. Определение уровня производства баритового концентрата в соответствии с обоснованной технологической схемой его получения с последовательным выделением фракций. Определение состава и стоимости основного оборудования для промышленного производства баритового концентрата на каждом технологическом этапе его получения.

3. Финансовый блок. Оценка капитальных и эксплуатационных затрат, объёма налоговых отчислений в бюджеты всех уровней и внебюджетную систему Российской Федерации в соответствии с Налоговым кодексом Российской Федерации, а распределение налогов, уплачиваемых в бюджеты различных уровней, осуществляется в соответствии с Бюджетным кодексом Российской Федерации.

4. Экономический блок. Оценка экономической эффективности производства баритового концентрата в соответствии с Методическими указаниями по оценке эффективности инвестиционных проектов (утверждены приказом Минэкономразвития России, Минфина России и Госстроя России от 21 июня 1999 г. № ВК). Для оценки критерия эффективности используются показатели, характеризующие коммерческую и бюджетную эффективность.

Формулы основных показателей экономической модели:

$$\text{Чистая приведенная стоимость} \quad NPV = \sum_{t=1}^T \frac{NP_t + D_t - C_t}{(1+r)^t} \quad NPV > 0 \quad (3.9)$$

$$\text{Внутренняя норма прибыли} \quad IRR = r^*: NPV_t(r^*) = 0 \quad IRR > r \quad (3.10)$$

$$\text{Индекс рентабельности} \quad PI = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{NP_t + D_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad PI > 1 \quad (3.11)$$

$$\text{Дисконтированный срок окупаемости} \quad DPP = t^*: \sum_{t=1}^{t^*} NPV_t = 0 \quad \min \quad (3.12)$$

$$\text{Эффективность бюджета} \quad BE = \sum_{t=1}^T \frac{Tax_t}{(1+r)^t} \quad BE > 0 \quad (3.13)$$

5. Результирующий блок. Анализ чувствительности показателей эффективности проекта производства баритового концентрата к изменению основных возмущающих факторов (капитальные вложения, эксплуатационные затраты; цена реализации барита; ставка дисконтирования).

Прогноз производства баритового концентрата из вещества, складированного в отвалах, формируется исходя из технологической схемы производства с учётом качества запасов и концентрации полезного вещества, позволяя количественно оценить среднегодовой уровень производства. В рамках модели предусматривается создание производственной и транспортной инфраструктуры. В рамках экономической модели разработана схема производства и определены возможные варианты направлений транспортировки баритового концентрата основным крупным потребителям. В главе 6 приведены результаты расчётов экономической эффективности извлечения барита из Урских отвалов. Предполагается четыре варианта транспортировки продукции для реализации от железнодорожной станции «Белово»:

1. Транспортировка баритового концентрата в г. Краснодар (АО «Ильский завод Утяжелитель – НПО «Бурение»). Протяженность транспортировки по железной дороге составляет 4277 км.

2. Транспортировка баритового концентрата в г. Сургут (ПАО Сургутнефтегаз). Протяженность транспортировки по железной дороге составляет 2185 км.

3. Транспортировка баритового концентрата в г. Тюмень (ПАО «Газпромнефть-Тюмень»). Протяженность транспортировки по железной дороге составляет 1496 км.

4. Транспортировка баритового концентрата в г. Томск (ООО «НПО «Реасиб»). Протяженность транспортировки по железной дороге составляет 403 км.

В результате проделанных работ на полевом этапе собрана коллекция фактического материала: пробы воды, воздуха, твердого вещества, получены геоэлектрические разрезы. Лабораторные исследования позволили изучить химический и минеральный состав, физико-химические и петрофизические параметры твердого вещества, химический состав проб воды и воздуха (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Фактически выполненная работа в рамках диссертационного исследования

Экспедиционные работы		
Объект	Содержание работ	Фактические результаты
Дюков Лог, г. Салаир	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отбор проб твердого вещества по вертикали из шурфов на площадках хвостохранилища 235×235 м² (2013 г.) и 500 × 250 м² (2020 г.). 2. Построение 16 профилей электротомографии длиной от 150 до 235 м для построения 3Д модели. 3. Построение двух профилей микро-электротомографии по линии шурфов для выявления взаимосвязи химического состава вещества и сопротивления среды. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Пробы вещества из визуально различающихся слоёв по вертикали в 9-ти шурфах (90 проб). 2. Детальные геоэлектрические разрезы до гл. 3 м по линии каждого шурфа. 3. Геоэлектрические разрезы длиной от 150 м до 235 (16 разрезов). 4. Пробы воды из прудков на поверхности хранилища и дренажного потока.
Хвостохранилище Талмовские Пески, г. Салаир	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отбор проб твердого вещества по вертикали из шурфов на площадке хвостохранилища 500×500 м². 2. Измерение газов CS₂ и (CH₃)₂S в горизонтах по стенкам шурфов 3. Построение профилей микроэлектротомографии по линии шурфов. 4. Построение серии профилей электротомографии для получения 3Д модели. 5. Отбор проб воды. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Пробы вещества из визуально различающихся слоёв по вертикали в 5-ти шурфах с одновременным замером газов и T_{грунт} в каждом слое (32 пробы). 2. Дополнительные пробы вещества из 10 шурфов в контрастных по сопротивлениям зонах для расчёта ресурсов (100 проб). 3. Детальные геоэлектрические разрезы до гл. 3 м по линии каждого шурфа. 4. Геоэлектрические разрезы длиной 120 м (6 разрезов). 5. Пробы подземной воды из скважин (4 пробы) и р. М. Талмовой (13 проб).
Урской отвал, пос. Урск	<ol style="list-style-type: none"> 1. Построение профиля микро-электротомографии на склоне отвала. 2. Определение суточной динамики геоэлектрической зональности разреза. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Геоэлектрические разрезы, построенные по ежечасным замерам (24 разреза).

	<ol style="list-style-type: none"> 3. Измерение концентраций газов, температуры воздуха и грунта ($T_{\text{возд}}$, $T_{\text{грунт}}$), атм. давления на ключевых точках профиля в суточном режиме. 4. Полевая газоаналитическая съемка с использованием газоанализатора ГАНК-4. 5. Отбор проб воздуха на концентратор АНП-11 (ООО «Сибел», Новосибирск). 6. Построение серии профилей электротомографии для получения 3Д модели и оконтуривания зоны фильтрации дренажа. 7. Отбор проб вещества в шурфах. 8. Отбор проб воды. 	<ol style="list-style-type: none"> 2. Геоэлектрические разрезы длиной 235 м, построенные по серии профилей электротомографии (16 профилей), 3-Д модель. 3. Концентрации CS_2, $(\text{CH}_3)_2\text{S}$, $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$, SO_2 в приземном слое воздуха, $T_{\text{возд}}$, $T_{\text{грунт}}$, атм. давление в 4-х ключевых точках (168 замеров). 4. Пробы вещества отходов из 8 шурфов для характеристики состава и сопоставления с геоэлектрическими параметрами (80 проб). 5. Дополнительные пробы вещества из 10 шурфов в контрастных по сопротивлениям зонах для расчёта ресурсов (80 проб). 6. Пробы воздуха на концентраторе для последующего анализа методом ГХ-МС (26 проб). 7. Пробы воды из скважин (2 пробы), дренажного потока, р. Ур и водохранилища (19 проб).
<p>Комсомольское хвостохранилище, пос. Комсомольск</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Построение серии профилей электротомографии для получения 3Д модели и оконтуривания зоны фильтрации дренажа. 2. Построение профилей микро-электротомографии. 3. Полевая газоаналитическая съемка с использованием газоанализатора ГАНК-4 по четырём профилям. 4. Отбор проб вещества отходов. 5. Отбор проб воды. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Геоэлектрические разрезы по серии профилей электротомографии длиной от 235 до 595 м (14 разрезов). 2. Геоэлектрические разрезы по серии профилей микроэлектротомографии (6 разрезов). 3. Концентрации CS_2, $(\text{CH}_3)_2\text{S}$, $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$, SO_2 в приземном слое воздуха над хранилищем (18 точек). 4. Пробы твердого вещества из визуально различающихся слоёв по вертикали в 5-ти шурфах (50 проб).

		<p>5. Дополнительные пробы вещества отходов для расчёта ресурсов (100 проб).</p> <p>6. Пробы поровых, поверхностных и подземных вод (13 проб).</p>
Шахтаминское хвостохранилище	<p>1. Построение серии профилей электротомографии.</p> <p>2. Построение профилей микроэлектротомографии.</p> <p>3. Отбор проб вещества отходов.</p> <p>4. Отбор проб воды.</p>	<p>1. Геоэлектрические разрезы по профилям электротомографии длиной от 480 до 600 м.</p> <p>2. Геоэлектрические разрезы по профилям микроэлектротомографии.</p> <p>3. Пробы твердого вещества из визуально различающихся слоёв по вертикали в 7-ми шурфах (70 проб).</p> <p>4. Дополнительные пробы вещества отходов для расчёта ресурсов (100 проб).</p> <p>5. Пробы поверхностных и подземных вод (9 проб).</p>
Дарасунское хвостохранилище	<p>1. Построение серии профилей электротомографии.</p> <p>2. Построение профилей микроэлектротомографии.</p> <p>3. Отбор проб вещества отходов.</p> <p>4. Отбор проб воды.</p>	<p>1. Геоэлектрические разрезы по профилям электротомографии длиной 120 м.</p> <p>2. Геоэлектрические разрезы по профилям микроэлектротомографии.</p> <p>3. Пробы твердого вещества из визуально различающихся слоёв по вертикали в трех шурфах (30 проб).</p> <p>4. Дополнительные пробы вещества отходов для расчёта ресурсов (100 проб).</p> <p>5. Пробы поверхностных вод (17 проб).</p>

Лабораторные исследования

Вещество, фактический материал	Процедуры, вид анализа	Фактический результат
Пробы твердого вещества отходов	1. Измерение влажности весовым методом, гранулометрического состава.	1. Характеристика физико-химических параметров вещества (кислотности, минерализации паст), влажности.

	<p>2. Приготовление паст (твердое/вода = 1:1), измерение в них значений рН, Eh, электропроводности.</p> <p>3. Извлечение водных вытяжек (твердое/вода = 1/10), измерение в них значений рН, Eh, электропроводности.</p> <p>4. Определение элементного состава ИСП-МС, РФА-СИ</p>	<p>2. Гранулометрия вещества Талмовских Песков</p>
Водные вытяжки.	ИСП-МС	Концентрация подвижных форм элементов
Данные электротомографии	Обработка, построение графиков, диаграмм.	Геоэлектрические разрезы, графики изменения УЭС в течение суток
Результаты анализов твердого вещества, растворов, газов	Обработка, построение графиков, диаграмм, схематических карт	Разрезы вертикальной геохимической зональности, характеристика вещества по профилям микроэлектротомографии, карты газовых аномалий в приземном слое воздуха, карты гидрохимических аномалий, расчеты форм нахождения химических элементов в водных растворах и сосуществующих твердых фазах, экологических ущербов и целесообразности переработки
Геоэлектрические разрезы, геохимические данные	Сопоставление электрофизических параметров вещества с его геохимическим составом	Схематичные модели динамики внутренней зональности техногенных тел в зависимости от изменения внешних условий, 3-Д модели исследованных участков хранилищ.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА СТРОЕНИЯ И СОСТАВА ТЕХНОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО ДАННЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Дюков Лог

Развитие направления комплексных исследований техногенных экосистем Сибири с применением геофизических и геохимических методов началось с отвала отходов Салаирской свинцово-цинковой обогатительной фабрики в 2005 году. На этот момент в работах Бортниковой С.Б. (2003, 2006) были описаны особенности состава твёрдого вещества и сделаны выводы о предположительной миграции металлов за пределы объекта, о чём косвенно свидетельствовали высокие концентрации Cu, Zn, Cd, Pb в дренажном колодце ниже по рельефу от отвала. Возникла идея изучить строение хранилища с применением бурно развивающегося в то время в РФ метода электротомографии. Предпосылки успешного применения метода для выявления границ техногенной системы заключаются в следующем: тонкоизмельченные отходы, пропитанные высокоминерализованным поровым раствором, обладают электрическими сопротивлениями существенно ниже, чем сопротивления вмещающей среды. Дополнительная задача, которую автор планировал решить, при изучении хранилища Дюков Лог, сводилась к поиску подземных путей фильтрации дренажного раствора, которые должны визуализироваться на геоэлектрическом разрезе сопротивлениями существенно ниже, чем материал отходов. Однако, самая первая задача, которую было необходимо решить – взаимосвязь электрических сопротивлений, получаемых с применением метода электротомографии, с химическим составом и петрофизическими параметрами среды. Этому и были посвящены исследования на хранилище Дюков Лог.

4.1.1. Состав вещества отходов

Материал отходов, складированных в хвостохранилище Дюков Лог, неоднороден, имеет серую, ярко-рыжую, бурую окраску и запах серной кислоты. Хвосты переслаиваются плотным влажным материалом с обломками среднего размера, что обусловлено пересыпанием отходов шламом в ходе заполнения хранилища, с одной стороны, и уплотнением тонкодисперсных хвостов переработки руды в процессе складирования, с другой. По физико-химическим параметрам вещество отходов делится на два типа: окисленный материал с низкими значениями рН паст (2-4), высокими окислительно-восстановительными потенциалами (+400+600 мВ) и нейтральные пробы (рН 7.0-7.7) со значениями Eh от 100 до 150 мВ. Наиболее низкие значения УЭС (2-9 Ом·м) соответствуют окисленному веществу (табл. 4.1, шурф 2). Графики изменения значений рН паст и удельного электрического сопротивления по глубине зеркальны относительно распределения Eh: горизонты с наименьшими значениями рН характеризуются высокими окислительно-восстановительными потенциалами и низкими УЭС (высокой проводимостью, рис. 4.1) [Эпов, Юркевич и др., 2017].

Таблица 4.1 – Физико-химические, физические характеристики и содержания некоторых элементов в пробах отходов отвала Дюков Лог. Единицы измерения приведены в примечании к таблице

	Проба	УЭС	pH	Eh	W	K _П	ρ	d	K	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	S _{sulfate}	S _{sulfide}	ΣMe
Шурф 2	ДЛ-2.1	6.0	2.9	450	10	36	2.0	0.80	3.5	19	14	0.71	0.28	11
	ДЛ-2.2	9.0	3.7	380	9.0	39	2.2	3.4	1.2	10	4.5	0.61	1.1	6
	ДЛ-2.3	3.0	2.6	480	34	53	1.8	0.85	2.5	7.1	12	1.0	0.94	7
	ДЛ-2.4	8.0	2.9	480	11	39	1.8	2.4	0.8	9.1	3.8	0.53	1.4	5
	ДЛ-2.5	2.0	2.6	500	39	54	1.7	0.65	3.5	6.9	15	1.1	2.4	8
Шурф 3	ДЛ-3.1	19	7.3	150	20	54	1.7	1.2	1.7	7.4	6.8	0.24	1.4	6
	ДЛ-3.2	27	7.7	130	20	47	1.9	1.6	1.2	8.6	6.4	0.31	1.5	6
	ДЛ-3.3	22	7.6	130	34	56	1.9	1.1	2.3	6.3	11	0.37	2.0	7
	ДЛ-3.4	56	7.6	110	10	42	2.0	3.8	0.6	8.3	3.8	0.24	0.71	5
	ДЛ-3.5	22	7.3	110	36	54	1.9	1.1	2.8	7.4	13	0.29	0.88	8
	ДЛ-3.6	27	7.7	100	16	43	1.8	1.1	1.0	8.6	5.3	0.27	1.5	6
	ДЛ-3.7	7.0	7.2	120	46	54	1.5	0.55	4.1	6.3	19	0.49	1.3	9

Примечание. УЭС в Ом·м, Eh в мВ, влажность W в %, коэффициент пористости K_П в %, плотность ρ в г/см³, d — средний размер частиц, мкм (> 70 % по количеству); содержания калия, железа, алюминия, сульфатной серы и ΣMe—суммарное содержание металлов (Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb) в мас. %. Расположения шурфов приведены на рис. 1 (Глава 1)

Визуальное чередование разного по цвету и крупности материала подтверждается сменой его физических характеристик, значений УЭС и химического состава (см. рис. 4.1, табл. 4.1) [Эпов, Юркевич и др., 2017].

Низкие значения УЭС среды характерны для тонкозернистых горизонтов (средний размер более 70 % частиц 0.6-0.8 мкм), содержащих 4-5 мас. % К и Al. В минеральном составе этих проб преобладают каолинит, аргиллит, к.п.ш., слюда. Здесь также повышено содержание сульфатной серы по сравнению с другими слоями (табл. 4.2), а влажность варьирует от 10 до 50 % и не коррелирует с распределением УЭС. В течение долгих лет складирования происходит уплотнение хвостов, повышается их влажность, активно протекают процессы выветривания, в том числе окисления сульфидов с образованием сульфатных минералов. Пониженные значения УЭС данных горизонтов обусловлены, по-видимому, тремя факторами: 1) ионной проводимостью вторичных сульфатных соединений металлов, образующихся при окислении сульфидов; 2) электронной проводимостью сульфидных минералов; 3) повышенной электропроводностью минерализованного порового раствора (суммарные концентрации металлов в водных вытяжках имеют обратную корреляцию с УЭС среды, см. рис. 4.1). Выделяются и более сухие слои (влажность 9 %) среднезернистого материала с УЭС около 8 Ом·м (см. табл. 2, пр. ДЛ-2.2, ДЛ-3.7). Здесь понижение УЭС может быть обусловлено наличием первичных сульфидов.

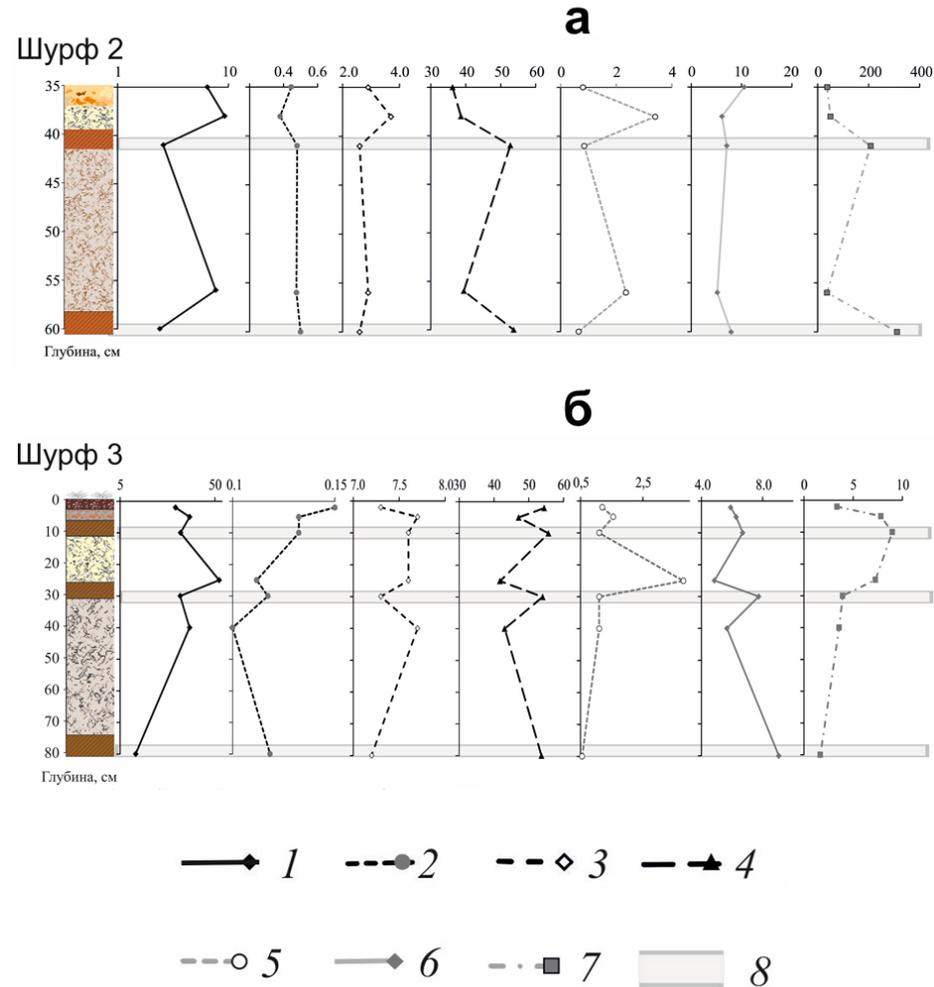


Рисунок 4.1 – Изменение УЭС среды и состава вещества отходов с глубиной по данным 2011 г. в шурфах 2 (а) и 3 (б): 1 – УЭС, Ом·м; 2 – окислительно-восстановительного потенциала E_h , В; 3 – рН пасты; 4 – коэффициента проницаемости K_{II} , %; 5 – средний размер частиц (>70 % по количеству), мкм; 6 – суммарное содержание металлов (Fe, Al, Cu, Zn, Cd, Pb) в твердом, %; 7 – суммарные концентрации этих же элементов в растворе, мг/л; 8 – тонкодисперсные слои.

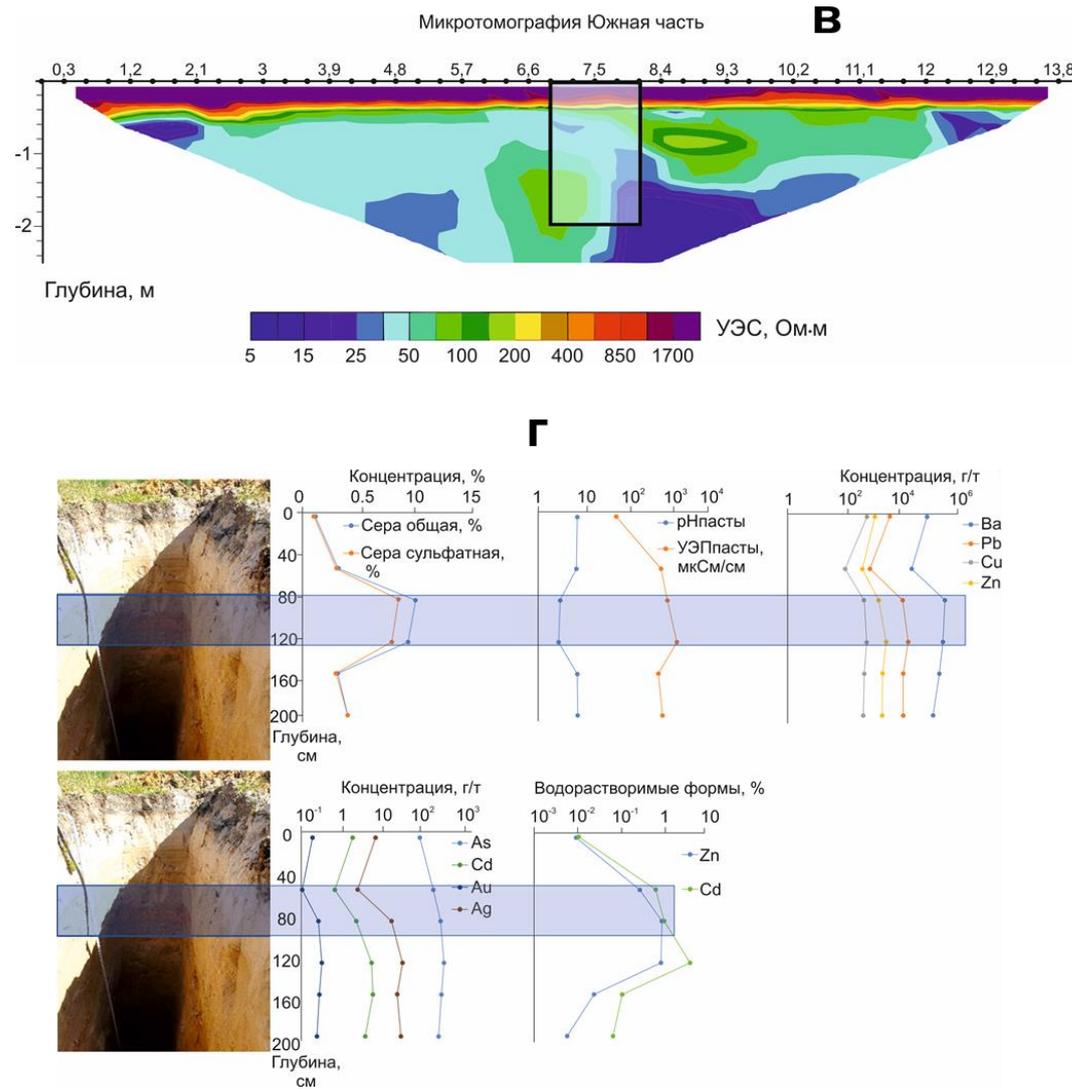


Рисунок 4.1 (продолжение) – Микропрофиль 2020 г., расположение на нем шурфа 3 (черный прямоугольник) (в) и вертикальная зональность химического состава вещества (г)

УЭС среды по данным электротомографии варьирует от 1 до 170 Ом·м (рис. 4.2). В верхней части оконтуренной площадки до глубины 20 м расположено вещество с УЭС 1-50 Ом·м.

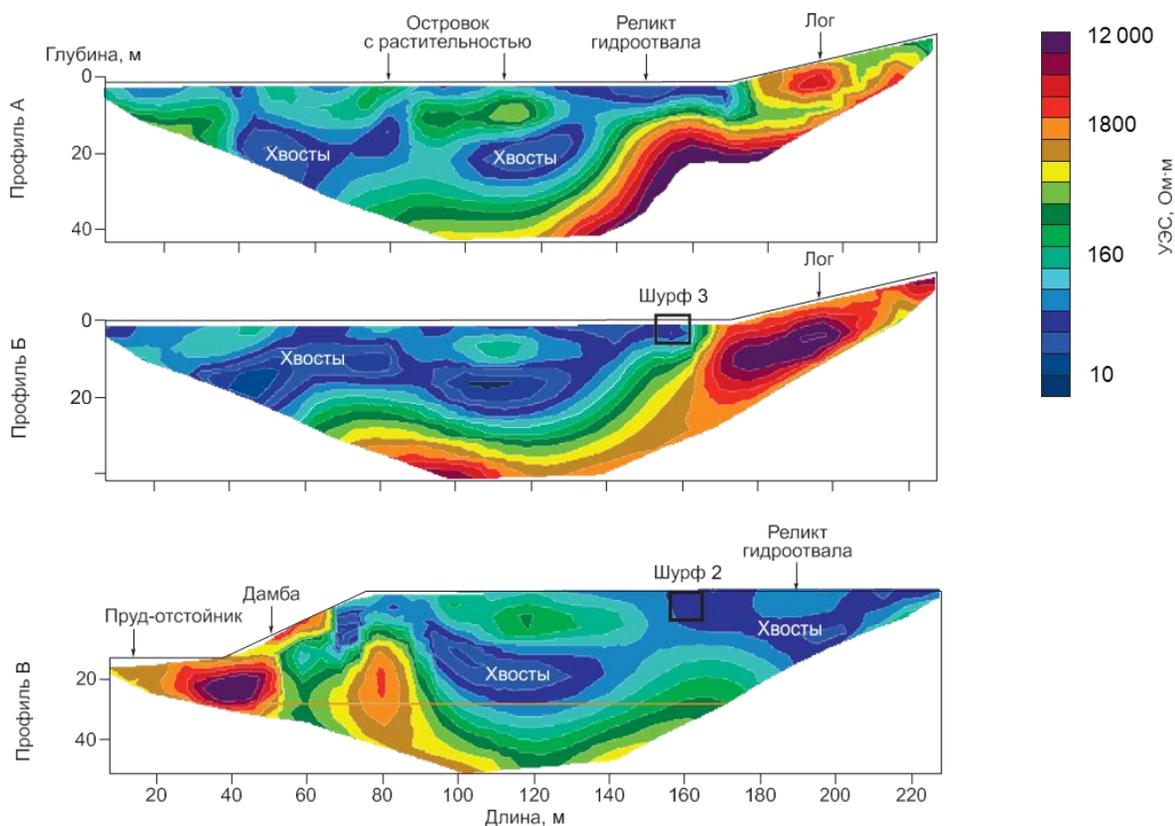


Рисунок 4.2 – Геоэлектрические разрезы отвала Дюков Лог по профилям электротомографии. Расположения профилей и шурфов приведены на рис. 3.1 (Глава 3)

Наиболее проводящие области находятся под прудами (см. рис. 4.2, пр. А, В). В середине площадки (на отметке 110 м, пр. А, В) существует участок 40×40 м из насыпного шлама, со временем покрывшийся почвенным слоем и растительностью. Под этим участком до глубины 7 м расположены горизонты с УЭС от 150 до 350 Ом·м. Коренным породам естественного лога, в пределах которого расположено хвостохранилище, соответствуют горизонты с УЭС 800-12000 Ом·м (см. рис. 4.1, пр. А,Б справа). Фактическим изолятором является

также дамба, ограничивающая хранилище с юго-запада (см. рис. 4.1, пр. В слева).

4.1.2. Состав водных вытяжек

Разнородное по составу вещество отходов продуцирует соответственно две группы водных вытяжек: кислые (рН 2.0-4.3) и околонейтральные (рН 5.9-7.2) с минерализацией от 0.18 до 2.7 г/л. Как правило, значения E_h тем выше, чем ниже рН раствора, исключение составляет водная вытяжка, приготовленная из вещества с глубины 0.25 м, со значением рН 2.2 и относительно низким окислительно-восстановительным потенциалом 110 мВ (табл. 4.2, пр. ДЛ-3.4), что может быть обусловлено микробиологическими процессами. Примечательно, что значение рН пасты для этой пробы равно 7.6. Вероятнее всего, более длительное взаимодействие вещества отходов с водой при приготовлении вытяжки (24 ч) по сравнению с пастами (10 мин) обуславливает растворение вторичных сульфатных минералов с образованием кислоты, в результате чего значение рН вытяжки значительно снижается по сравнению с пастой.

В анионном составе кислых растворов преобладают сульфат- и хлорид-ионы, в околонейтральных пробах появляется гидрокарбонат-анион, в пробе ДЛ-3.6 с рН 7.7 содержание HCO_3^- (130 мг/л) выше, чем суммарная концентрация Cl^- (5.3 мг/л) и SO_4^{2-} (54 мг/л) анионов (см. табл. 4.2). Наибольшими значениями УЭП характеризуются пробы, приготовленные из вещества с относительно крупным размером частиц (3.4-3.8 мкм), они же имеют самую высокую минерализацию. Переход Cu, Zn, Cd, Pb в водный раствор обусловлен растворением вторичных минеральных соединений. Подвижность металлов, как правило, увеличивается в кислых условиях, а мышьяка и сурьмы, наоборот, в нейтральных и слабощелочных [Abrosimova et al., 2015]. Концентрации Cu, Zn, Cd в водных вытяжках увеличиваются с глубиной (см.

табл. 4.2), т. е. их соединения мигрируют вниз вместе с кислым дренажным раствором. Исключение составляет свинец, который в кислых сульфатных условиях за счет формирования малорастворимого англезита (PbSO_4) концентрируется в верхних горизонтах (см. табл. 4.1, шурф 2).

Сурьма и мышьяк в условиях кислого дренажа оказываются менее подвижными и остаются на верхних горизонтах. Исключение составляет водная вытяжка из пр. ДЛ-2.5 (табл. 4.2) на глубине 60 см, в которой концентрация As достигает 30 мкг/л и максимальна для данного разреза. Окислительные условия (Eh 500 мВ) способствуют формированию пятивалентных форм мышьяка – анионов мышьяковой кислоты H_2AsO_4^- . Напротив, в шурфе 3 при значениях pH = 2.2-3.6 и Eh от 110 до 130 мВ (пр. ДЛ-3.3 и ДЛ-3.4 соответственно) мышьяк в растворе находится в наиболее токсичной трехвалентной форме в виде соединений $\text{HAsO}_{2\text{aq}}$ и $\text{As}(\text{OH})_3$ согласно анализу Eh-pH диаграмм [Smedley, Kinniburgh, 2002; Takeno, 2005]. Это означает, что на глубине всего 10-25 см в хвостохранилище Дюков Лог созданы восстановительные условия среды (вероятно, за счет жизнедеятельности микроорганизмов), сформировано мышьяковое «депо», являющееся источником As^{3+} (до 98 мкг/л), способного переходить в раствор при контакте с дождевой водой.

4.1.3. Результаты эксперимента по измерению УЭС в отходах с различным водонасыщением

Эксперимент с измерением УЭС в отходах методом резистивиметрии при различном водонасыщении вещества показал, что УЭС падает с ростом влажности образца (рис. 4.3).

Таблица 4.2 – Состав водных вытяжек, приготовленных из вещества отходов хвостохранилища Дюков Лог.

Концентрации ионов, микроэлементов и минерализация – в мг/л

Параметр	ДЛ-2.1	ДЛ -2.2	ДЛ -2.3	ДЛ -2.4	ДЛ -2.5	ДЛ -3.1	ДЛ -3.2	ДЛ -3.3	ДЛ -3.4	ДЛ -3.5	ДЛ -3.6	ДЛ -3.7
	Шурф 2					Шурф 3						
Глубина, см	30	38	45	55	60	2	5	10	25	30	40	80
рН	4.3	3.0	4.1	6.8	5.9	6.8	6.7	3.6	2.2	6.9	7.2	7.0
УЭП, мкСм/см	730	1700	850	136	60	110	820	650	2300	110	160	160
SO ₄ ²⁻	380	1100	410	50	10	42	400	310	1200	10	54	56
Cl ⁻	63	1400	150	3.6	11	8.9	12	12	1250	3.6	5.3	7.1
HCO ₃ ⁻	9.2	-	9.2	120	76	43	92	143	-	92	130	85
Na	2.3	1.8	1.7	2.1	1.6	1.8	2.4	6.2	6.7	6.5	6.7	6.3
Mg	33	19	53	20	71	3.8	3.5	8.1	4.2	7.5	5.8	27.4
K	0.1	0.1	0.1	0.49	0.1	5.4	2.1	5.6	5.0	5.0	4.7	6.2
Ca	150	180	260	210	420	72	48	93	68	77	63	270
Al	2.8	11	33	2.1	49	0.75	1.3	1.5	1.2	1.4	0.92	0.62
Mn	2.5	1.6	5.3	1.4	7.3	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Fe	1.5	4.6	28	16	43	0.90	2.0	2.3	3.4	0.91	0.64	0.11
Cu	0.44	0.84	2.9	0.43	4.6	0.17	0.28	0.63	0.43	0.14	0.53	0.10
Zn	30	31	140	17	210	0.76	1.4	2.0	1.4	0.50	1.2	0.74
As	0.01	0.028	0.01	0.01	0.03	0.035	0.063	0.098	0.0075	0.01	0.01	0.01
Cd	0.077	0.066	0.29	0.027	0.45	0.001	0.002	0.002	0.00	0.003	0.001	0.01
Sb	0.001	0.003	0.006	0.003	0.006	0.013	0.014	0.010	0.003	0.010	0.005	0.008
Pb	0.02	0.64	0.04	0.012	0.02	0.73	2.8	2.4	0.79	1.0	0.31	0.07
Минерализация	670	2700	1100	440	900	180	570	590	2500	210	270	460

При соотношении вода/порода = 1/2 (консистенция пасты) УЭП тонкозернистых слоев ниже УЭП сульфидных песков. Последнее, по-видимому, связано с большим вкладом в УЭП минерализованного порового раствора, образующегося при контакте вторично измененного (окисленного) вещества с водой. Но близкие значения УЭС тонкозернистых слоев и сульфидных песков не дают возможности в полевых условиях однозначно интерпретировать их чередование в многослойной структуре техногенных отложений.

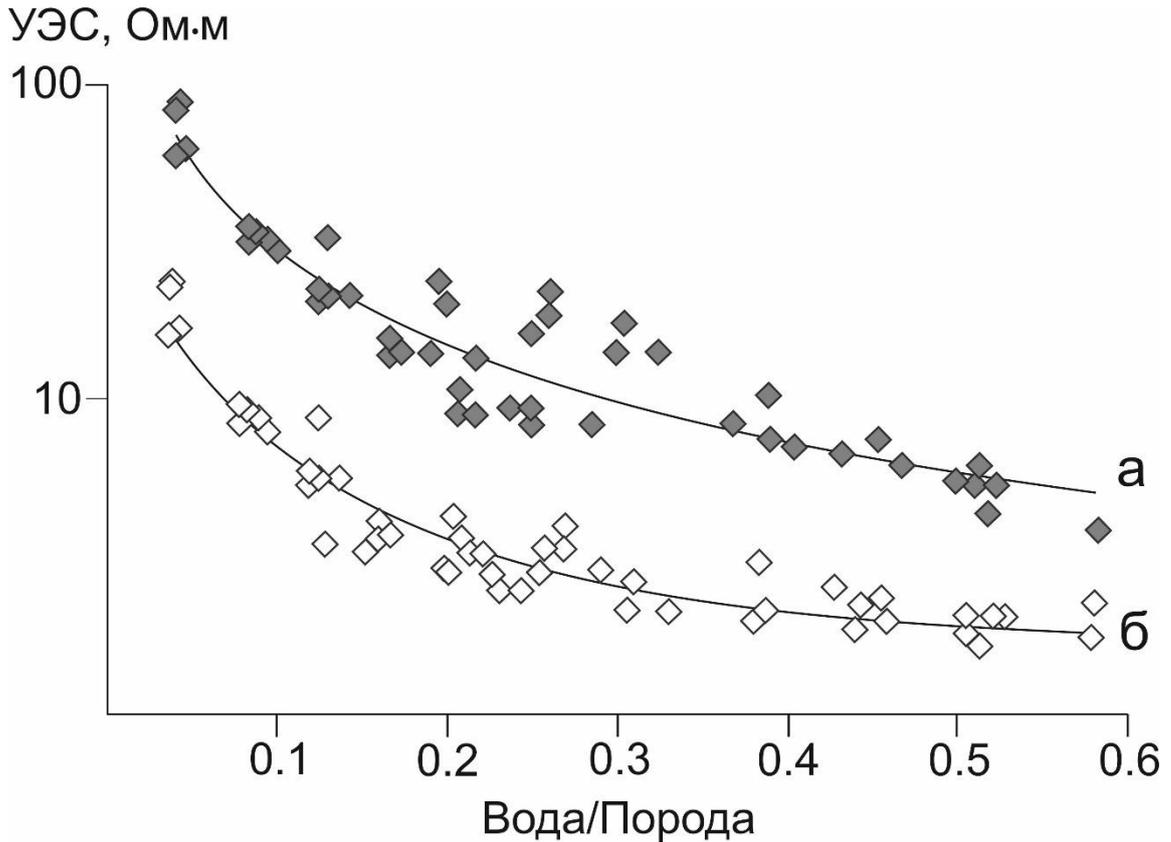


Рисунок 4.3 – Изменение УЭС глинистых образцов (а) и сульфидных песков (б) из хвостохранилища Дюков Лог в ходе эксперимента в зависимости от соотношения вода/порода

4.1.4. Связь геофизических данных и химического состава

Существует обратная корреляция между УЭС паст и суммарной концентрацией металлов в веществе отходов, что отражено в распределении этих параметров по глубине шурфа (см. рис. 4.4). Кроме того, значения УЭС паст обратно коррелируют с содержанием сульфатной серы в твердом веществе (рис.

4.4 (1)), суммарными концентрациями металлов (Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Cd, Pb) (рис. 4.4 (2)) и цинка в водных вытяжках (см. рис. 4.4 (3)). 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 высокие концентрации сульфат-анионов (1-2 г/л), основные формы нахождения металлов – сульфатные комплексы.

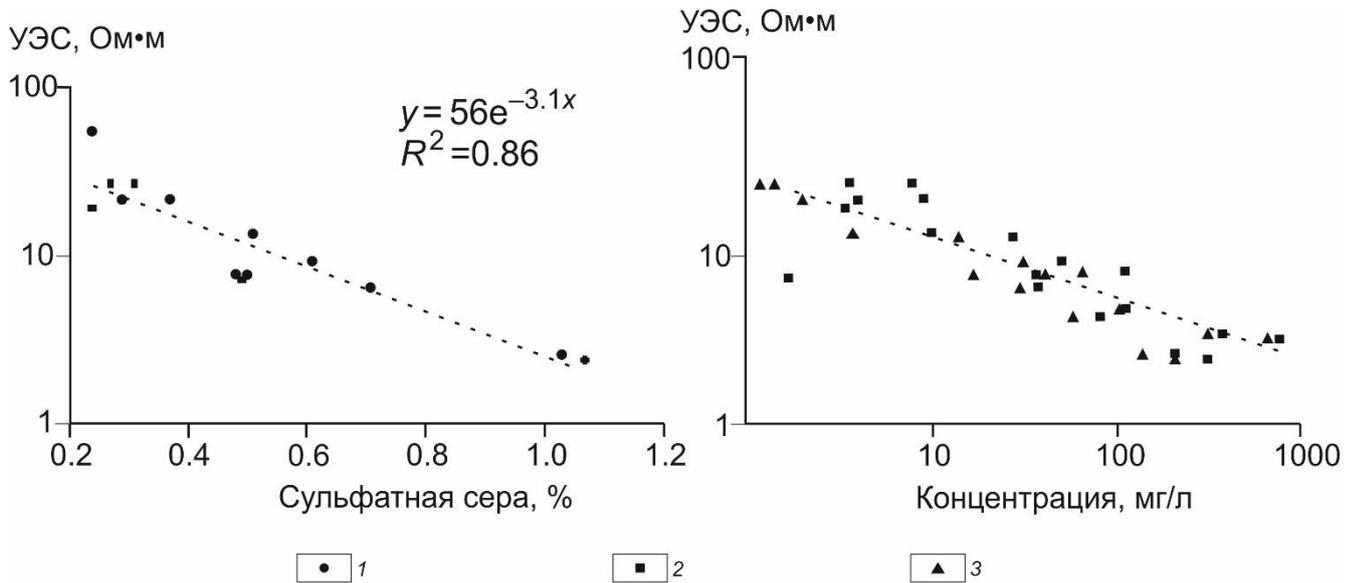


Рисунок 4.4 – Связь УЭС, содержания сульфатной серы в твердом веществе (1), суммарных концентраций металлов (2) и цинка (3) в водных вытяжках отходов хвостохранилища

Сделав предположение, что электропроводность отходов Дюкова Лога обусловлена только минерализацией порового раствора (флюида) при непроводящем минеральном скелете, использовано соотношение (4.1) для расчета минерализации флюида при заданном УЭС для изотропной гомогенной среды при постоянном давлении, мощности и проницаемости коллектора (Yao, Holditch, 1996; Zhang et al., 1998):

$$\rho_w = \left[\left(0.0123 + \frac{3647.5}{C^{0.955}} \right) \frac{82}{1.8T+39} \right], \quad (4.1)$$

где C – минерализация флюида, мг/л;

T – температура, °С;

ρ – УЭС среды, Ом·м;

0.0123 и 3647.5 – коэффициенты, полученные эмпирическим путем в результате экспериментального моделирования (Yao, Holditch, 1996).

Для расчетов были взяты значения УЭС, измеренные в пастах методом резистивиметрии при помощи прибора Miller 400D. Расчетную теоретическую минерализацию (общее содержание солей, TDS) порового раствора при известном УЭС сравнили с измеренной. Измеренная химическими методами минерализация водной вытяжки оказалась почти в три раза выше расчетной величины (рис. 4.5, коэффициент в уравнении равен 2.7), что свидетельствует о существенном вкладе в УЭП исследуемых отходов минерального скелета. Поскольку его величина не учтена в соотношении (4.1), получены существенно заниженные значения TDS растворов. Поэтому для расчетов TDS флюида в хвостохранилищах необходимо использовать более сложные зависимости, например, для низкоомных коллекторов с учетом глинистости [Глинских и др., 2014; Мельник, Ерофеев, 2014].

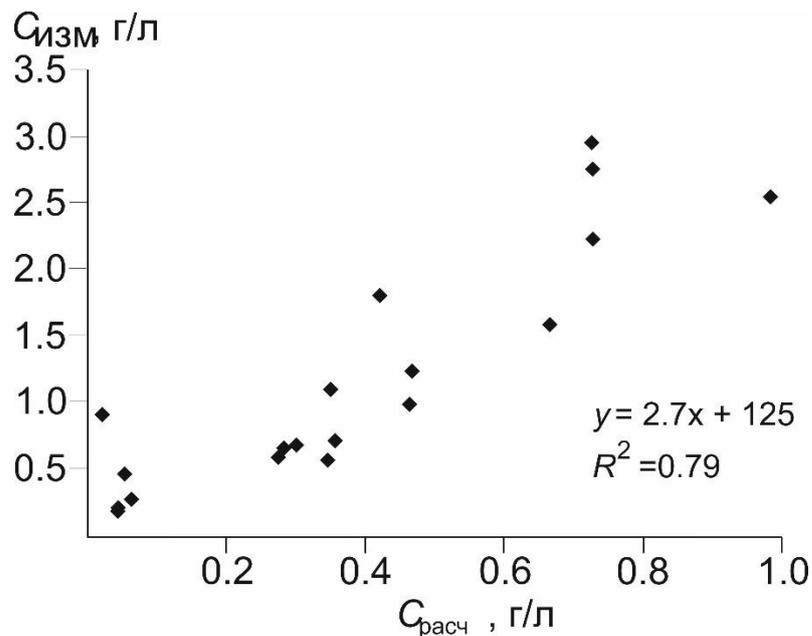


Рисунок 4.5 – Сопоставление расчетной ($C_{расч}$) и измеренной ($C_{изм}$) минерализаций водных вытяжек

4.2. Талмовские Пески

4.2.1. Состав вещества отходов, водных вытяжек и поровых растворов

Материал отходов, складированных в хвостохранилище Талмовские пески, неоднороден, имеет ярко-рыжую и бурую окраску и характерный запах серной кислоты. В его составе представлены преимущественно соединения Si, Fe, Ba, S, а также Al, K, Na, Ca (табл. 4.3).

Минеральный состав исследованных образцов из Талмовских хвостохранилищ определяется составом салаирской руды и вторичным изменением исходных сульфидов. Содержание сульфидных минералов достигает 5-7 мас. %, а основным минералом является пирит. Сульфиды Pb, Zn и Cu представлены мелкими мономинеральными зёрнами галенита (2-14 %), сфалерита (8-19 %) и следовыми количествами халькопирита, теннантита и тетраэдрита. Вторичные каймы на поверхностях сульфидных зёрен маскируют характерные особенности сульфидов и препятствуют более точной оценке количества минерала. Остальная часть массы включает обломки вмещающих пород различного состава (кварциты, известняки и кварц-серицитовые сланцы) и минеральных зёрен (кварц, кальцит, доломит, барит и мусковит) [Bortnikova, Yurkevich et al., 2016].

Верхние слои рассматриваемого далее шурфа (ТШ-2 или Шурф 2, рис. 3.2б) сложены крупнозернистым песком с преобладанием в минеральном составе кварца и барита. С глубины 30 см материал хвостов представлен крупнозернистыми песками рыжего и ярко-рыжего цветов, основные минеральные фазы – барит и пирит. Нижний горизонт сложен серо-коричневыми плотными обводненными грунтами с размером частиц 1.1 мм, в минеральном составе преобладают кварц, плагиоклазы и кпш. Значения рН приготовленных в полевых условиях паст колеблются в диапазоне 2.8-3.6 единиц, окислительно-восстановительный потенциал – от +640 до +740 мВ, что свидетельствует об окисленности материала отходов.

Таблица 4.3 – Макрокомпонентный (%) и гранулометрический состав вещества отходов в хвостохранилище Талмовские пески

Проба	Глубина, см	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	CaO	BaO	d _{ср} , мм
ТШ-2.1	2	38	3.5	2.3	0.60	17	н.о.	1.5	36	1.7
ТШ-2.2	25	39	4.3	4.2	0.76	16	н.о.	1.6	32	0.8
ТШ-2.3	45	19	1.8	1.9	0.33	24	0.20	1.2	48	0.4
ТШ-2.4	70	5.1	0.95	5.7	0.08	25	0.42	0.30	54	0.8
ТШ-2.5	120	70	13	7.0	2.3	0.73	1.7	1.7	0.41	1.1
ТШ-2.6	160	68	14	6.1	2.1	1.2	1.9	2.1	0.51	1.1

Примечание: н.о. – не обнаружен

Удельное сопротивление (УС), измеренное прямым кондуктометрическим методом в пастах (УСп), изменяется в пределах 3.2-13 Ом·м и хорошо коррелирует с УСэ по результатам электротомографии (табл. 4.4).

Концентрации металлов в образцах хвостов, а также их сопоставление с содержаниями в рудах, которые обрабатывались на заводе в Салаире до начала 2000-х гг., представлены в таблице 4.5. В начале разработки месторождения содержание цветных и драгоценных металлов в рудах было в несколько раз выше, чем в настоящее время. Соответственно, потери при переработке руд были значительно выше в абсолютном выражении, чем в настоящее время, что приводило к значительным концентрациям полезных компонентов в хвостах, иногда превышая даже их содержание в рудах [Bortnikova, Yurkevich et al., 2016].

Таблица 4.4 – Удельное сопротивление грунтов по данным электротомографии (УСэ) и паст (УСп) по результатам кондуктометрии, pH, Eh паст, суммарной концентрации элементов (K, Ca, Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, Sb) в водных вытяжках, хвостохранилище Талмовские пески

Проба	Глубина, см	УСп, Ом·м	УСэ, Ом·м	Eh, мВ	pH	Сумма элементов в/в, мг/л
ТШ-2.1	2	13	16	650	3.1	30
ТШ-2.2	25	8.0	9.0	690	3.0	110
ТШ-2.3	45	4.8	10	740	2.8	110
ТШ-2.4	70	4.3	4.8	730	2.9	80
ТШ-2.5	120	3.4	4.0	720	3.1	370
ТШ-2.6	160	3.2	4.0	640	3.7	760

Различия в концентрациях металлов в хвостовых отложениях невелики (табл. 4.5), но мы обнаружили значительную разницу в диапазоне концентраций по глубине шурфа (табл. 4.6, рис. 4.6).

Таблица 4.5 – Средние концентрации металлов рудной ассоциации: Zn (вес. %), Pb, Cu, Cd, Fe (г/т) в хвостах Талмовского хранилища (n = 60) и Салаирских рудах

	Zn	Pb	Cu	Cd	Fe
Салаирские руды ¹	0.51	2 300	620	34	1.6
Первичные	2.30	3 200	800	10	3.2
Окисленные	0.32	4 300	670	6	3.8

Примечание: 1 – архивные данные.

Повышенные концентрации Cu, Zn, Cd, Sb, Pb в средних слоях ТШ-2.3, Т-2.4 (табл. 4.6) сопровождаются низкими значениями рН (2.8-2.9), высокими Eh (+730+740 мВ) и удельными сопротивлениями 8-13 Ом·м, что ниже значений в верхних горизонтах (4.3-4.8 Ом·м). Но наименьшие значения УЭС характерны все же для самых нижних обводненных горизонтов с наиболее высокими концентрациями SO_4^{2-} , Cu, Zn, Cd в водных вытяжках (табл. 4.7, рис. 4.6). Интенсивное выщелачивание приводит к уменьшению содержаний металлов в твердом веществе и повышению концентраций в водных растворах (табл. 4.7). Доля водорастворимых форм Cu, Zn, Cd в нижнем горизонте значительно выше, чем в верхних слоях, и достигает 14 % для Zn, 5.7 % Cd, 3.5 % Cu (табл. 4.8). Низкая подвижность свинца в условиях кислотного выщелачивания с образованием сульфат-иона обусловлена формированием нерастворимого англезита $PbSO_4$.

Значения рН поровых вод находятся в слабокислой области (рН 5-6). Среди катионов преобладают Ca^{2+} и Mg^{2+} , основной анион – SO_4^{2-} (4500 мг/л) (табл. 4.9). Происходит активное окисление сульфидных минералов, за счёт чего повышается кислотность растворов и концентрация сульфат-ионов в них. Кроме того, растворяются вторичные сульфатные минералы калия, железа, магния и меди: ярозит $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, магнезиокопиапит $MgFe_4(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$, гидросульфат меди $Cu_3(SO_4)_2(OH)_2 \cdot 2H_2O$.

Концентрация цинка в поровых растворах достигают 1 г/л (табл. 4.9). В связи с низким содержанием HCO_3^- и высоким SO_4^{2-} , на поверхности сфалерита ZnS в растворе остаётся Zn^0 . Свинец осаждается из раствора за счёт формирования англезита PbSO_4 , его остаточные концентрации варьируют в диапазоне 10-20 мг/л. Медь, кадмий и железо присутствуют в концентрациях существенно ниже, чем цинк (табл. 4.9).

Таблица 4.6 – Изменение микроэлементного состава вещества из хвостохранилища Талмовские Пески. Концентрации представлены в г/т

Элемент	ТШ-2.1	ТШ-2.2	ТШ-2.3	ТШ-2.4	ТШ-2.5	ТШ-2.6
Глубина, см	2	25	45	70	120	160
Cu	980	320	1500	1300	220	290
Zn	5000	6000	19000	41000	2500	4800
Cd	13	14	52	120	14	39
Pb	3600	4800	8800	14000	150	220
Au	0.14	0.22	0.31	0.52	0.47	0.54
Ag	29	49	58	85	1.3	1.1
Mo	5.9	6.2	4.2	9.9	1.3	1.4
As	190	180	52	94	76	68
Hg	2.3	3.4	4.8	9.2	3.7	2.3
Sb	43	59	110	48	8.9	18
Sn	11	13	15	16	3.9	5.5
Te	0.31	0.24	0.22	0.64	0.17	0.15
Se	1.6	2.1	3.6	14	1.5	1.6
Bi	1.3	1.5	2.2	67	1.2	1.0
Ni	2.2	3.1	4.1	14	1.8	0.93

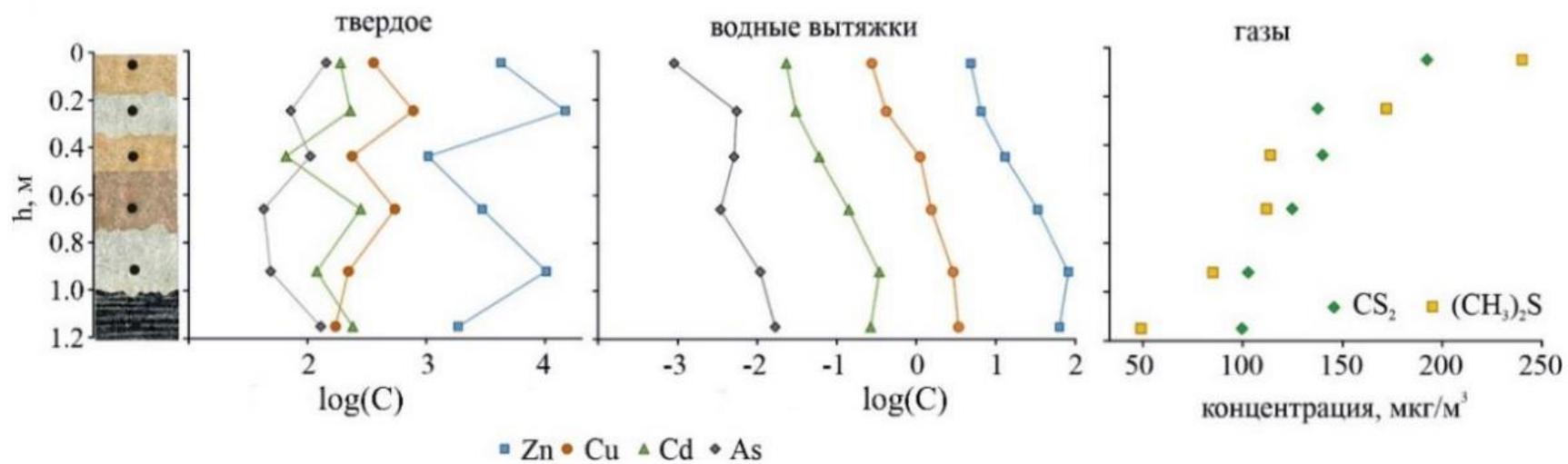


Рисунок 4.6 – Схематичный разрез, распределение содержаний металлов и мышьяка в твёрдом веществе, водных вытяжках и концентраций газов.

Таблица 4.7 – Изменение состава водных вытяжек из вещества хвостохранилища Талмовские Пески по глубине шурфа. Концентрации выражены в мг/л

Проба	Глубина, см	K	Ca	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb	SO ₄ ²⁻
ТШ-2.1	2.1	34	560	9.4	0.89	14	0.07	0.06	570
ТШ-2.2	25	0.11	280	38	2.4	66	0.13	0.12	530
ТШ-2.3	45	0.12	230	2.1	1.5	100	0.26	0.65	500
ТШ-2.4	70	0.13	140	16	1.3	58	0.13	3.3	420
ТШ-2.5	120	0.86	160	39	6.9	310	0.78	0.051	1000
ТШ-2.6	160	2.9	130	1.4	10	660	2.2	0.042	1200

Таблица 4.8 – Доля водорастворимых форм металлов в веществе из хвостохранилища Талмовские Пески (% от общего содержания металла)

Проба	K	Ca	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
ТШ-2.1	0.27	3.4	0.046	0.090	0.28	0.55	0.0010
ТШ-2.2	0.0010	2.1	0.14	0.74	1.1	0.96	0.0020
ТШ-2.3	0.0070	2.8	0.014	0.10	0.54	0.49	0.0070
ТШ-2.4	0.0020	11	0.056	0.10	0.14	0.11	0.020
ТШ-2.5	0.0050	1.3	0.077	3.2	12	5.5	0.030
ТШ-2.6	0.018	1.1	0.003	3.5	14	5.7	0.020

Таблица 4.9 – Состав поровых вод Талмовского хвостохранилища, мг/л

Параметр	ТШ-2.1	ТШ-2.2	ТШ-2.3	ТШ-2.4	ТШ-2.5	ТШ-2.6
pH	6.80	5.20	6.00	5.50	6.30	6.78
Ca ²⁺	430	1100	830	370	290	180
Mg ²⁺	110	370	210	280	320	120
Na ⁺	47	18	61	73	16	12
K ⁺	28	31	17	29	15	8.2
HCO ₃ ⁻	200	50	180	52	230	320
SO ₄ ²⁻	1200	3700	2300	4500	600	700
Cl ⁻	56	89	5.0	18	17	10
Zn	850	730	980	1200	130	53
Pb	0.092	1.1	6.7	21	2.2	0.087
Cu	0.21	0.37	0.65	3.9	0.67	0.17
Cd	0.070	0.45	3.7	4.9	2.1	0.21
Fe	0.51	170	78	150	11	н.о.

Примечание: н.о. – не обнаружены

4.2.2. Связь геофизических данных и химического состава

Геофизические методы были применены для того, чтобы дополнительно уточнить структуру отходов на глубину до 7 м и найти доказательства инфильтрации дренажа в горизонт грунтовых вод. Разрез на профиле № 1 (расположение см. рис. 3.2) характеризуется диапазоном сопротивлений 1-150 Ом·м. Верхняя часть разреза (глубины 0-5 м) представлена наиболее проводящими породами с сопротивлениями 1-20 Ом м (рис. 4.7). Этот слой, по-видимому, ограничен в пределах хвостохранилища Талмовские Пески в диапазоне 2-3.5 м.

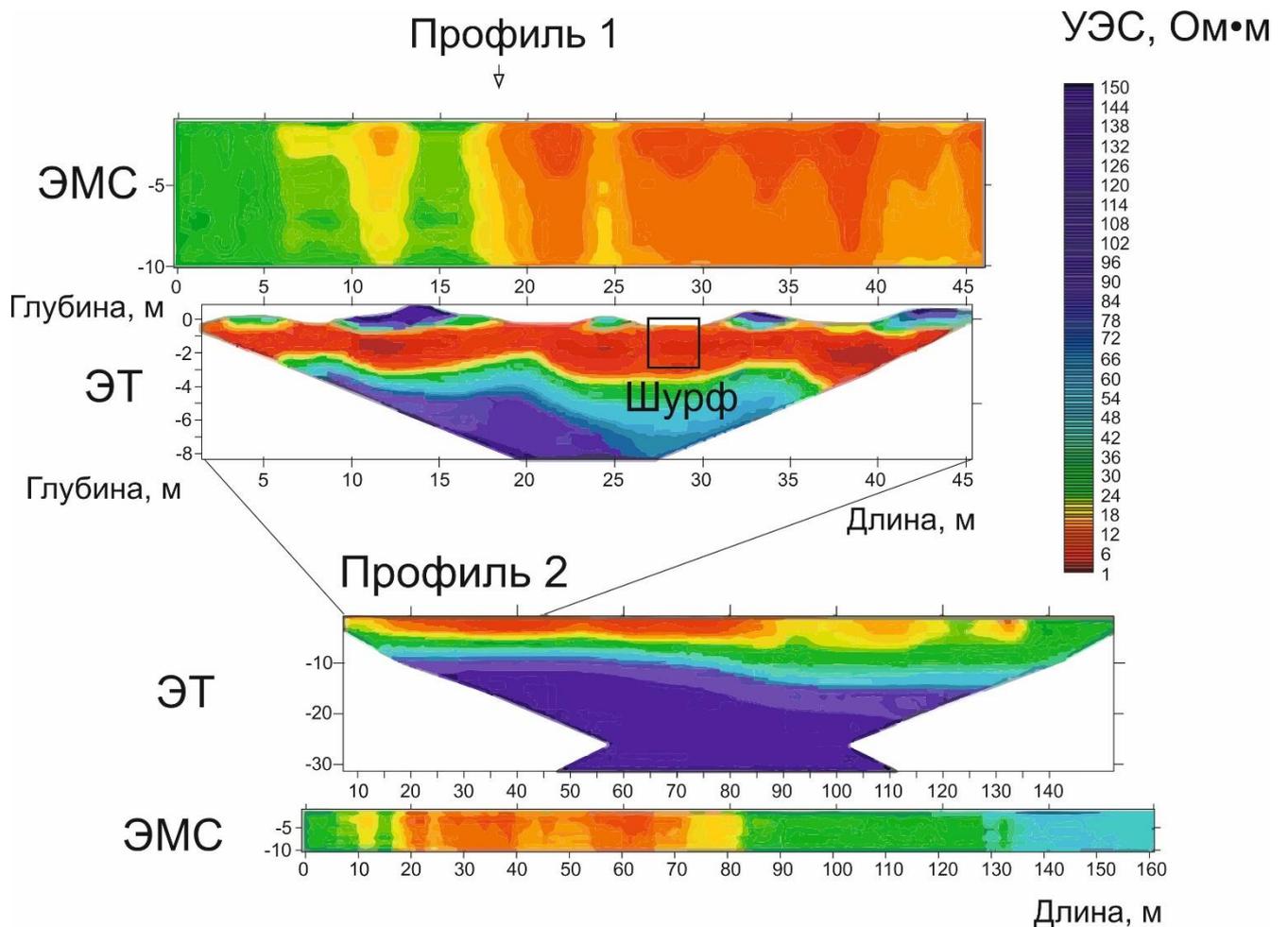


Рисунок 4.7 – Геоэлектрические разрезы отходов, складированных в Талмовском хранилище, по данным электромагнитного сканирования (ЭМС) и электротомографии (ЭТ)

Вещество с относительно высокими сопротивлениями (70-150 Ом м), расположенное на отметках 10-18, 32-35 и 40-45 м по профилю, представляет собой насыпной грунт. Глубже (3.5-5 м по вертикали) расположен слой с удельным

сопротивлением от 25 до 35 Ом м, относящийся к водонепроницаемому горизонту. В нижней части разреза, на глубине 5-8 м, удельные сопротивления варьируются от 40 до 150 Ом м, что характерно для низкопроводящих коренных пород.

Участок на профиле 2 характеризуется сопротивлениями, изменяющимися в диапазоне 1-150 Ом м. Выделяется верхний слой (0-3 м по вертикали) с высокопроводящими отходами с последующим водонепроницаемым горизонтом и подстилающими породами глубиной более 10 м. Были раскопаны и опробованы три шурфа глубиной 1.6 м на расстоянии 28 м от начала профилей в области высокопроводящего вещества (рис. 4.7).

Материал отходов неоднороден, имеет ярко-красный и коричневый цвет и запах серной кислоты. Верхние слои сложены из крупного песка с преимущественно кварцевым, баритовым и пиритовым составом. Глубже 30 см вещество представлено красными и ярко-красными крупнозернистыми песками, а основными минеральными фазами являются барит и пирит. Нижний горизонт сложен плотным серо-коричневым материалом с размером частиц 1.1 мм, а в минеральном составе преобладают кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, пирит. Значения рН паст, полученных в полевых условиях, варьируют в пределах 2.8-3.6 ед., а окислительно-восстановительный потенциал – от 640 до 740 мВ, что указывает на активно протекающие процессы окисления отходов. Удельное электрическое сопротивление паст, измеренное методом кондуктометрии ($УЭС_{п}$), изменяется в диапазоне 3.2-13 Ом·м и хорошо коррелирует с результатами ($УЭС_{эмс}$), полученными электромагнитным зондированием (табл. 4.10, рис. 4.8).

Графики изменения значений рН и удельного сопротивления по глубине являются по существу зеркальными отражениями относительно распределения Eh: горизонты с наименьшими значениями рН характеризуются высоким окислительно-восстановительным потенциалом и низким сопротивлением (высокой проводимостью). Значения рН возрастают, а Eh и удельное сопротивление уменьшаются с глубиной вследствие течения слабощелочных грунтовых вод в шурфе после глубины 1.2 м. Общие концентрации Cu, Zn, Cd и Pb

в водных вытяжках и влажность отходов в самом низком горизонте увеличиваются, что указывает на интенсивное выщелачивание.

Самые низкие удельные сопротивления находятся также в водоносных горизонтах с самыми высокими концентрациями SO_4^{2-} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} в водных вытяжках. Интенсивное выщелачивание снижает содержание металлов в твердом веществе и увеличивает их концентрации в растворах (табл. 4.10).

Процент водорастворимых форм Cu, Zn и Cd в нижнем горизонте значительно выше, чем в верхних слоях, и достигает 14 % для Zn, 5.7 % для Cd и 3.5 % для Cu в % от общего содержания всех форм (табл. 4.8). Низкая подвижность свинца в кислотных растворах связана с образованием нерастворимого PbSO_4 . Очевидно, что затопление хвостов грунтовыми водами и интенсивное выщелачивание металлов происходит на глубине более ~ 160 см.

Таблица 4.10 – Удельное электрическое сопротивление отходов согласно данным электромагнитного сканирования ($УЭС_{эмс}$), параметры паст и водных вытяжек

Глубина, см	$УЭС_{эмс}$ Ом·м	W (%)	Параметры паст			Σ (Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Cd, Pb, Sb) в водных вытяжках (мг/л)
			$УЭС_{п}$, Ом·м	Eh, мВ	pH	
2	16	8	13	650	3.1	30
25	9.0	7	8.0	690	3.0	110
45	10	8	4.8	740	2.8	110
70	4.8	3	4.3	730	2.9	80
120	4.0	29	3.4	720	3.1	370
160	4.0	32	3.2	640	3.7	760

Примечание: w – влажность, $УЭС_{эмс}$ – удельное электрическое сопротивление среды по данным электромагнитного сканирования, $УЭС_{п}$ – удельное электрическое сопротивление среды по данным кондуктометрических измерений в пастах.

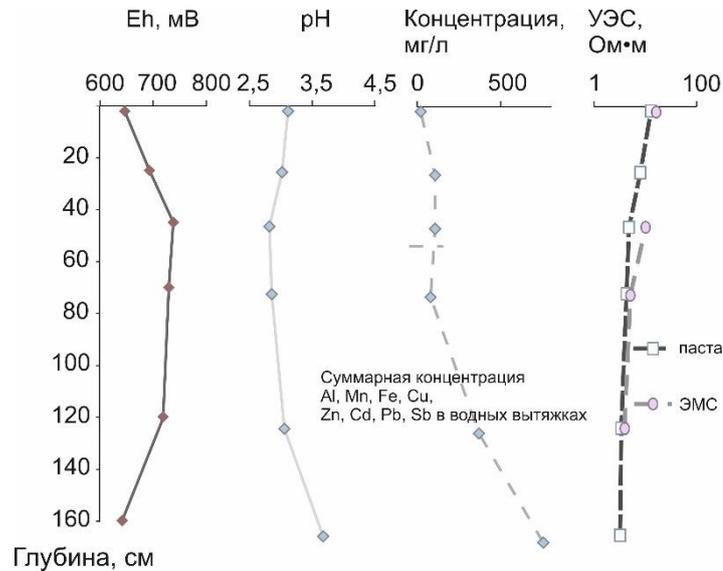


Рисунок 4.8 – Значения Eh, pH общие содержания элементов в водных вытяжках, УЭС паст (УЭС_п), измеренные на месте при помощи кондуктометра и в хвостах методом электромагнитного сканирования (УЭС_{эмс})

4.3. Урские отвалы

4.3.1. Состав вещества отходов и поровых растворов

Окисленный отвал (кварц-баритовое вещество) у поверхности представлен рыхлым, сухим крупно-среднезернистым материалом преимущественно ярко-рыжего и кирпичного цвета, с включениями гравия и щебня.

Менее окисленный отвал (барит-пиритовое вещество) сложен средне-тонкозернистым песком серого цвета, на поверхности покрыт белыми и светло-желтыми выцветами, на глубине 20-70 см перемежается слоями синезеленого и голубого цвета. Если рассматривать вещество, складированное в баритовом отвале, как результат окислительного выветривания и выщелачивания пиритового материала, то сравнение их микроэлементных составов может свидетельствовать о процессах фракционирования химических элементов в процессе гипергенеза.

Состав отвалов различается как по содержанию оксидов силикатной группы, так и по микроэлементному составу (табл. 4.11, рис. 4.9). Вещество кварц-баритового отвала содержит большее количество порообразующих элементов, а вещество барит-пиритового отвала – железа и сульфидной серы (за счет пирита).

Таблица 4.11 – Состав вещества отвалов

Элемент	Окисленное кварц-баритовое (КБ)				Менее окисленное барит-пиритовое (БП)			
	среднее	мин	макс	с.о.	среднее	мин	макс	с.о.
%								
SiO ₂	64	61	66	2.3	28	21	33	6.5
TiO ₂	0.77	0.61	0.96	0.15	0.36	0.25	0.44	0.10
Al ₂ O ₃	2.8	2.4	3.1	0.31	0.93	0.66	1.2	0.30
Fe ₂ O ₃	4.5	3.5	4.9	0.68	26	21	31	4.8
MnO	0.010	0.010	0.020	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
MgO	0.060	0.04	0.080	0.020	0.020	0.020	0.02	0.010
CaO	0.27	0.040	0.55	0.21	0.12	0.090	0.15	0.010
Na ₂ O	0.26	0.19	0.28	0.04	0.11	0.080	0.12	0.010
K ₂ O	0.82	0.69	1.0	0.13	0.32	0.20	0.39	0.10
BaO	15	14	16	0.94	16	15	18	1.3
S _{sulfate}	0.70	0.46	0.92	0.19	0.78	0.71	0.88	0.10
S _{sulfide}	2.5	2.5	2.6	0.050	21	19	24	2.6
г/т								
Cu	47	40	60	9.1	514	425	629	105
Zn	36	32	41	3.5	94	77	120	23
Pb	2800	2400	3000	270	1700	1600	1800	120
Cd	0.38	0.35	0.40	0.020	0.37	0.34	0.40	0.0
Cr	34	26	42	6.5	24	14	38	12
Co	0.57	0.43	0.69	0.12	4.5	2.5	7.1	2.4
As	440	420	450	14	660	640	690	23
Sb	560	520	610	44	220	118	320	103
Ag	29	25	31	3.0	23	17	30	6.6
Mo	8.8	8.2	10	0.79	15	14	18	2.4
Sn	4.7	4.4	5.0	0.24	2.0	1.50	2.4	0.50
Rb	9.0	7.6	11	1.4	3.6	3.0	4.6	0.80
Sr	530	510	560	22	230	210	240	15
V	27	2	96	35	9.2	5.0	13	3.3
Cs	0.45	0.43	0.49	0.029	0.22	0.19	0.27	0.044

В минеральном составе среди вторичных соединений баритового отвала наиболее часто встречаются сульфаты и алюмосиликаты: гипс, ангидрит, волтаит $K_2Fe_5AlFe_3(SO_4)_{12} \cdot 18H_2O$, а также гидроксо-сульфо-карбонаты металлов рудной ассоциации типа $[Zn_{12}(CO_3)_3(SO_4)(OH)_{16}]$. На глубине около 50 см появляются серо-зеленые и голубые увлажненные слои тонкозернистого вещества с более высоким содержанием железа и сульфидной серы, отмечено появление сульфо-арсената железа-буковскита $[Fe_2(AsO_4)(SO_4)(OH) \cdot 7H_2O]$.

Основные вторичные минеральные фазы пиритового отвала – ангидрит, буковскит, кальцит, сульфаты и гидроксокарбонаты калия, железа, алюминия, свинца: $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 11H_2O$, $Mg_6Fe^{3+}_2(OH)_6Cl_2 \cdot 4H_2O$, $FeSO_4 \cdot H_2O$, $K_2Fe^{3+}_5Fe^{3+}_3Al(SO_4)_{12} \cdot 18H_2O$, $Al_5(OH)_{13}(CO_3) \cdot 5H_2O$, $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 11H_2O$, $Pb(Fe_3(SO_4)_2(OH)_6)$, $Fe(OH)SO_4 \cdot 2H_2O$. На глубине 50 см появляется сульфат железа переменной валентности $FeFe_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$, сульфо-карбонат цинка $Zn_{12}(CO_3)_3(SO_4)(OH)_{16}$, сульфаты никеля $NiSO_4 \cdot H_2O$ и цинка $ZnSO_4 \cdot H_2O$. Новообразованные минералы меди, цинка, селена, ртути, мышьяка, золота и серебра подробно рассматриваются в работе [Мягкая и др., 2015].

Распределение элементов в поровых водах существенно отличается от такового в твёрдом веществе. Основные элементы в поровых растворах кварц-баритового отвала – Fe, Al, Ca, следующие по распространенности – Si, Na, K, Zn, Cu. Поровые воды барит-пиритового отвала в наиболее высоких концентрациях содержат Fe и Si, а концентрации Ca, Al, Na и K – существенно ниже.

В составе поровых растворов среди макроэлементов преобладает железо (до 12 г/л, табл. 4.12), основные микроэлементы: Al, Cu, Zn, Pb, Sb, Mo, Tl – для барит-пиритового отвала и Zn, Mn, Sr, Co, Ni, Mo, Li, Cs – для кварц-баритового. Сравнение концентраций элементов в поровых водах показывает, что в кварц-баритовом отвале по сравнению с барит-пиритовым наиболее велика разница в концентрациях Mg, Ca, Al, а в микрокомпонентном составе – Cr и Ni.

Таблица 4.12 – Состав поровых вод отвалов, мг/л

Элемент	Окисленное кварц-баритовое (КБ)				Менее окисленное барит-пиритовое (БП)			
	среднее	мин	макс	ст.откл	среднее	мин	макс	ст.откл
Si	95	81	100	12	190	170	200	17
Al	360	170	600	220	41	29	48	10
Fe	4000	290	6900	3400	5300	700	12000	5900
Mn	8.6	7.3	11	1.9	2.0	0.96	2.8	0.93
Mg	150	95	210	60	7.5	6.6	8.6	1.0
Ca	570	520	650	68	34	24	48	12
Na	48	11	110	54	16	12	23	6.1
K	22	0.49	63	36	10	5.5	14	4.3
Ba	0.031	0.016	0.048	0.016	0.095	0.026	0.2	0.093
Cu	9.0	4.8	11	3.7	25	5.1	47	21
Zn	18	13	21	4.8	10	2.7	16	6.9
Pb	0.041	0.009	0.10	0.05	1.9	1.2	3.0	1.0
Cd	0.022	0.019	0.03	0.00	0.013	0.004	0.022	0.0090
Cr	0.53	0.085	1.0	0.45	0.051	0.047	0.059	0.0069
Co	0.29	0.18	0.40	0.11	0.10	0.027	0.21	0.095
As	3.0	0.037	5.3	2.7	12	0.73	29	15
Sb	0.049	0.013	0.12	0.06	0.83	0.016	2.3	1.3
Mo	0.016	0.00001	0.05	0.02	0.095	0.0029	0.21	0.11
Sn	0.0048	0.00050	0.01	0.01	0.0043	0.00045	0.01	0.0051
Rb	0.025	0.006	0.06	0.03	0.077	0.046	0.11	0.032
Sr	1.1	0.78	1.4	0.30	0.37	0.15	0.68	0.28
V	0.010	0.0026	0.02	0.01	0.036	0.029	0.044	0.0076
Cs	1.3	0.051	3.5	1.9	0.40	0.12	0.63	0.26
Ni	0.24	0.00010	0.64	0.35	0.037	0.0001	0.11	0.063

Тенденция распределения элементов в поровых растворах повторяет таковое для исходного твердого вещества (рис. 4.9). Исключения составляют Ba, Pb, V, концентрации которых существенно ниже ожидаемых, что связано с низкой растворимостью их соединений в водных растворах. Концентрации Cu и Zn в поровых растворах, напротив, значительно выше ожидаемых, что обусловлено высокой их подвижностью при переходе в водный раствор. Наибольшей

подвижностью обладают Ca, Mg, Mn, Fe, Cu, Zn, самые инертные элементы – Ba и Pb. Группа основных породообразующих элементов Mg, Ca, Fe, Na, Al, а также металлы Cu, Zn, Cd, Co, Ni, Cr, Cs существенно подвижнее в системе «раствор-твёрдое» для кварц-баритового отвала, чем для барит-пиритового (рис. 4.10). В то время как K, Rb, Sr, V, Si, а также As, Sb, Pb, Ba подвижнее в барит-пиритовом отвале (рис. 4.10).

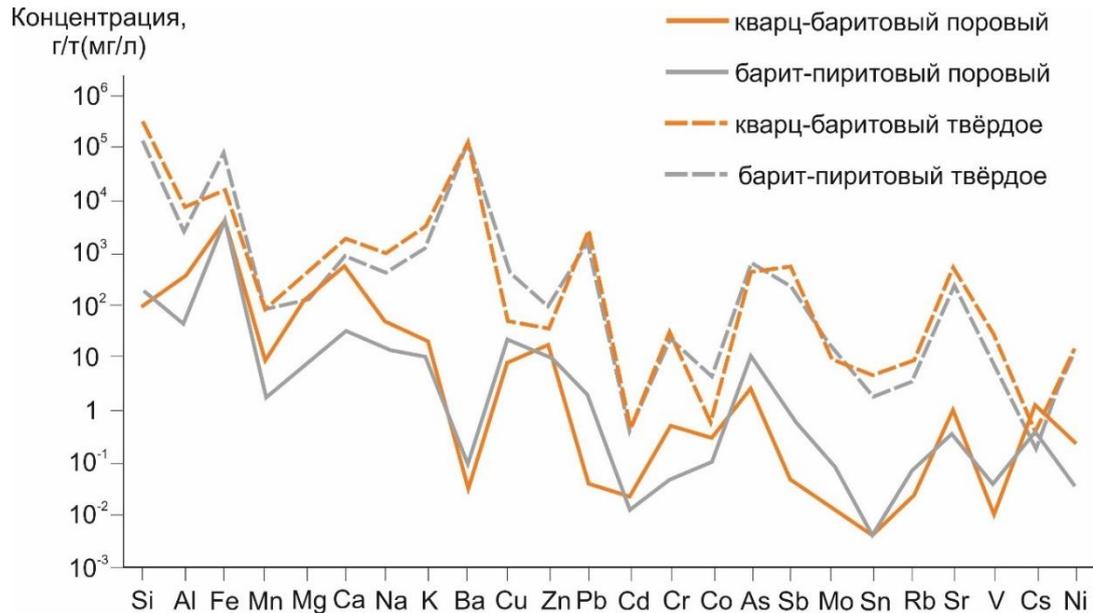


Рисунок 4.9 – Концентрации химических элементов в твердом веществе и поровых растворах баритового и пиритового отвалов

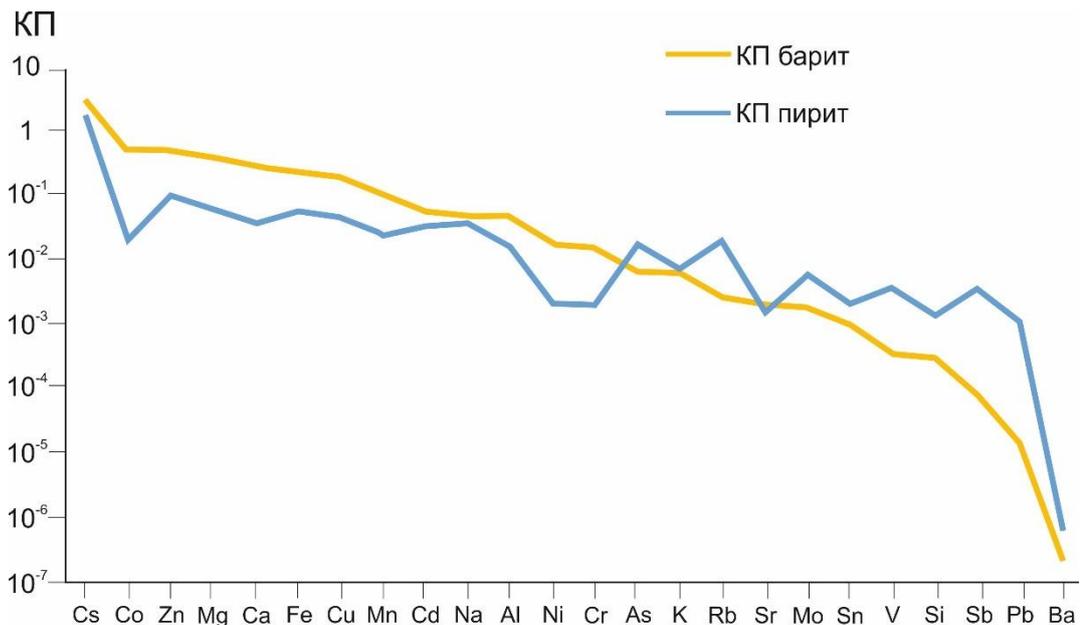


Рисунок 4.10 – Коэффициенты подвижности химических элементов при переходе из порового раствора в твердое вещество для баритового и пиритового отвалов

4.3.2. Связь геофизических данных и химического состава

Для определения связи состава хвостов с сопротивлениями среды были опробованы кварц-баритовый (КБ) и барит-пиритовый (БП) Урские отвалы. В веществе из КБ отвала были найдены выветренные плотные загипсованные корки низкой влажности ($< 5\%$), с высокими концентрациями Fe, Ba (рис. 4.11), Pb и других рудных металлов, а также примесных элементов (Hg, As). Сопротивления этих вторичных слоев по данным измерений Скала-48 около $50\text{ Ом}\cdot\text{м}$, по результатам резистивиметра – $20\text{ Ом}\cdot\text{м}$.

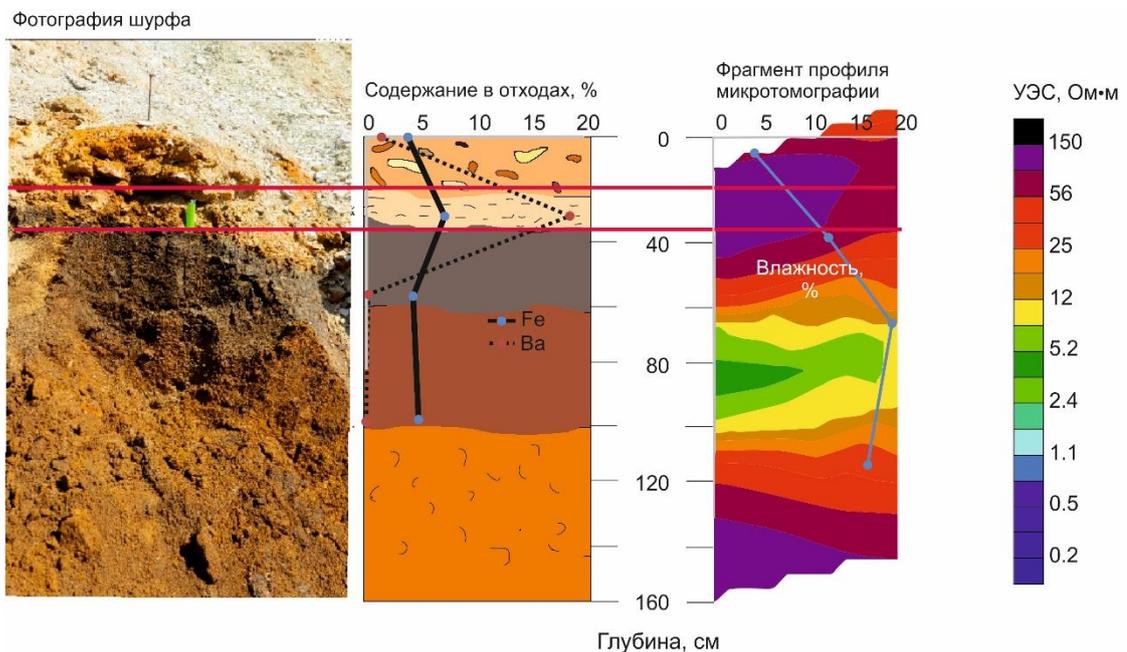


Рисунок 4.11 – Распределение влажности, содержаний бария и железа по глубине шурфа кварц-баритового Урского отвала, сравнение с данными микро-электротомографии

В веществе из БП отвала с наименьшим сопротивлением ($0.1-1\text{ Ом}\cdot\text{м}$) найдены так называемые «геохимические барьеры» - концентраторы металлов и примесных элементов (рис. 4.12). Поровые растворы из этого горизонта содержат в сумме около 12 г/л металлов, As, Sb.

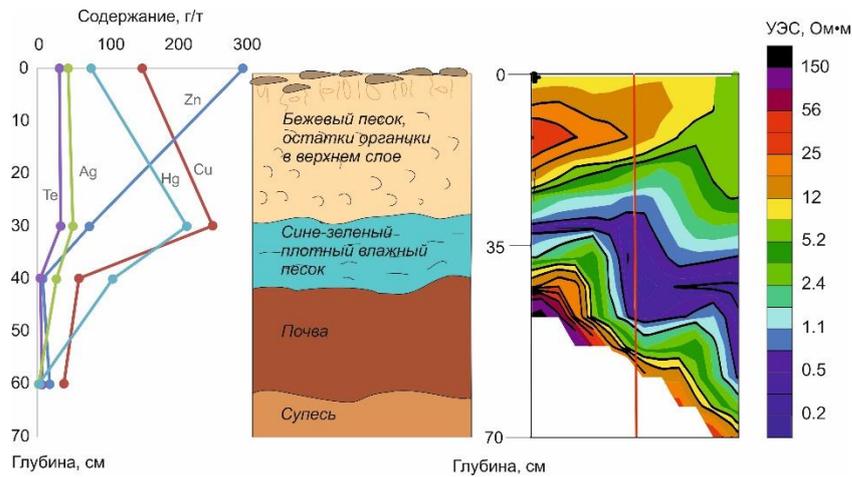


Рисунок 4.12 – Распределение элементов по глубине шурфа барит-пиритового Урского отвала, сравнение с данными микро-электротомографии

Для того, чтобы оценить вклад минеральной составляющей в общую электропроводность отходов, были проведены эксперименты по измерению сопротивления вещества в зависимости от соотношения вода/порода (по мере добавления воды) для вещества с различным соотношением сульфидных / сульфатных минералов барит-пиритовый отвал и кварц-баритовый). Сопротивление снижается по мере увеличения влажности вещества, причем для барит-пиритового отвала разброс значений УЭС лежит не в столь широких пределах, как для кварц-баритового вещества (рис. 4.13).

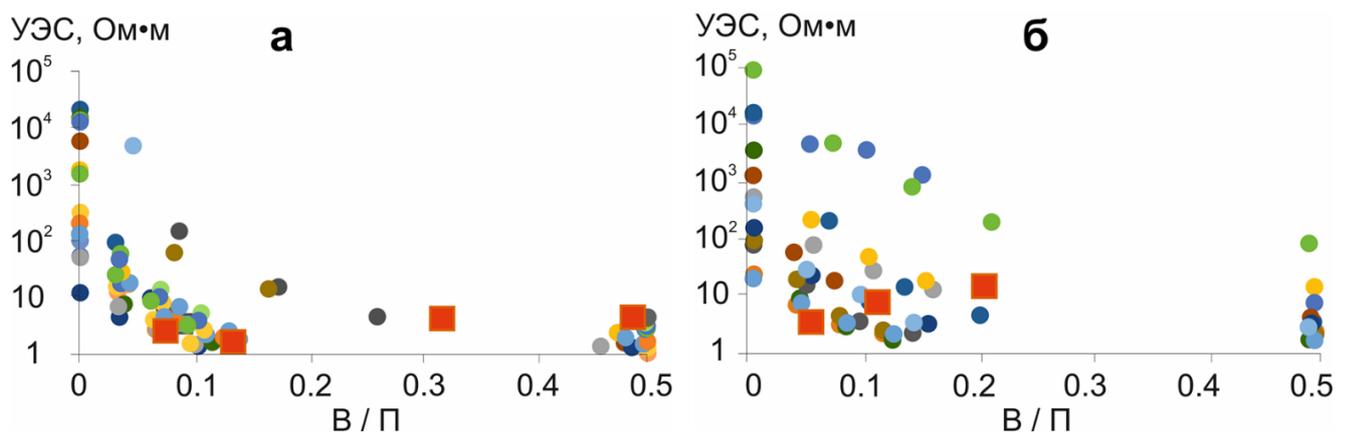


Рисунок 4.13 – Связь УЭС с соотношением вода / порода (В/П) для сульфидных отходов Урского барит-пиритового (а) и кварц-баритового отвалов (б). Разными цветами показаны разные пробы.

Оказалось, что при одной и той же влажности (33 % или $V/\Pi = 1/2$) удельное электрическое сопротивление и общее содержание металлов, As, Sb в кварц-баритовом отвале варьирует в трех пределах: 10-15 Ом·м, 600-1000 г/т в выветренной корке на поверхности, 6-9 Ом·м, 800-1500 г/т в почвенном горизонте и 2-4 Ом·м, 750-1700 г/т в хвостах (рис. 4.14). Аналогична связь УЭС с содержанием железа, бария и свинца.

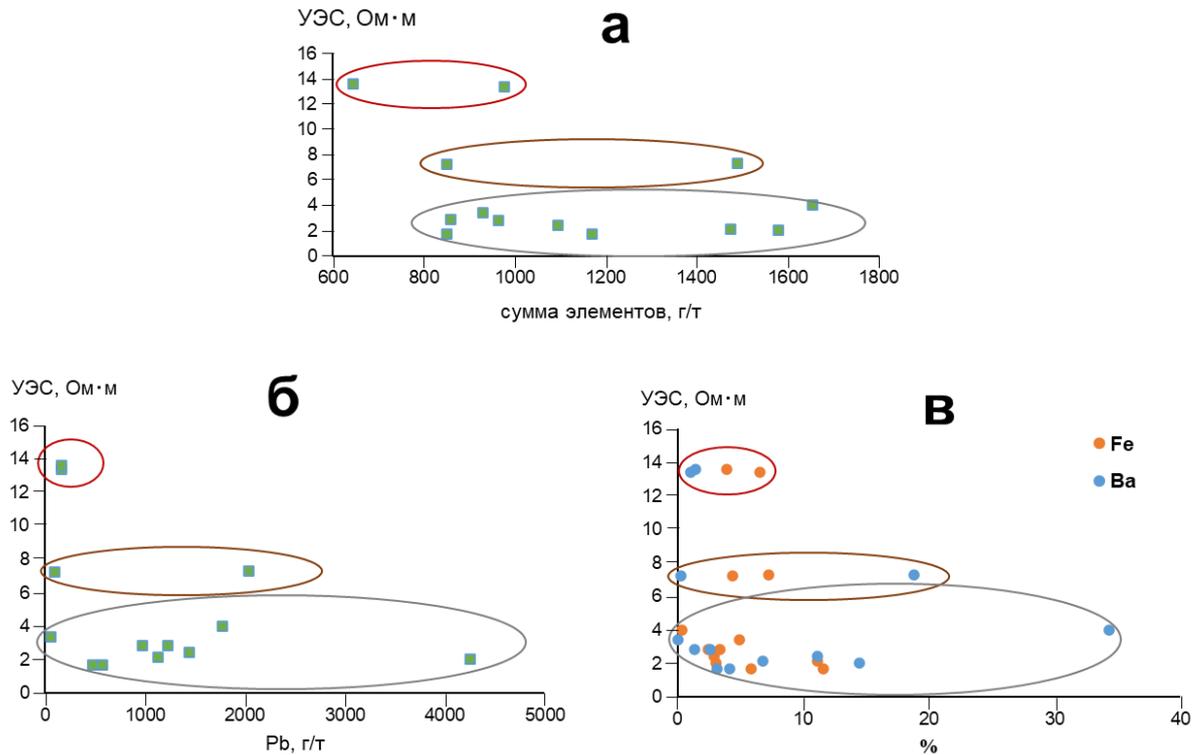


Рисунок 4.14 – УЭС, суммарное содержание элементов (Cu, Zn, Cd, Mn, Mo, Sn, Ag, Hg, Te, As, Sb), свинец, железо и барий в кварц-баритовом Урском отвале (выветренная корка – красный овал, почвенный горизонт – коричневый овал, хвосты – серый овал)

В барит-пиритовом отвале при соотношении $V/\Pi = 1/2$ сопротивление проб варьирует в узком диапазоне значений от 1 до 5 Ом·м при суммарном содержании элементов (Cu, Zn, Cd, Mn, Mo, Sn, Ag, Hg, Te, As, Sb) 300-2300 г/т, свинца 200-6000 г/т, железа 1.5-11 %, бария 0.8-30 %.

Таким образом, общая электропроводность сульфидных отходов сильно варьирует в зависимости от минерального состава образцов: от относительно высокоомных вторичных сульфатных корок (20-50 Ом·м) до проводящих

пиритных песков ($< 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Эксперимент показал, что при одном и том же соотношении вода / порода = $1/2$ из всех типов исследованных пород в Урских отвалах наименьшими сопротивлениями ($1-5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) обладают пиритные пески фракции 0.25 мм . Проводимость в данном случае связана не только с минерализацией порового раствора, но и с проводящей минеральной структурой сульфидов.

4.4. Комсомольское хвостохранилище

4.4.1. Состав вещества отходов

В серых неокисленных хвостах северной части Комсомольского хвостохранилища значения рН нейтральны, Eh колеблется от 200 до 500 мВ, УЭП – в пределах $1100-1800 \text{ мкСм/см}$, согласно замерам в пастах (табл. 4.13, проба К2-3). Удельное сопротивление поверхностного слоя составляет примерно $15-25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (проба К2-3/1, табл. 4.13) и снижается до $8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в нижней части (проба К2-3/7). Удельные сопротивления, измеренные с помощью ЭТ и резистивиметра Miller 400 D, имеют высокие корреляции в средней части шурфа (рис. 4.18). Значения влажности хвостов варьируют от 15 до 52 % и не имеют сильной корреляции с удельным сопротивлением. Содержание Fe в серых хвостах колеблется от 4.1 до 5.9 мас. % (табл. 4.13). Наименьшее значение УЭС ($8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) соответствует мощному слою голубой глины на глубине $100-110 \text{ см}$ с наибольшими содержаниями Fe (5.9 мас. %) и сульфидной серы (0.61 мас. %) (табл. 4.13, рис. 4.18). Примечательно, что в наиболее проводящем слое (с наименьшей электропроводностью по резистивиметру) наблюдаются самые высокие концентрации As, Cu, Zn, Pb, Ag, Cd, Hg, Sb (табл. 4.14, образец К2-3/7). Этот слой содержит 1500 г/т мышьяка, 3700 г/т сурьмы, 1000 г/т цинка, 1300 г/т свинца (табл. 4.14, проба К2-3/7). Физико-химические условия (Eh 180 мВ, рН 7.1, табл. 4.13) позволили сформироваться «геохимическому барьеру», где могут осаждаться железо и другие микроэлементы. В целом изменения удельного сопротивления с глубиной обнаруживают обратную корреляцию с проводимостью и Eh. Удельное

сопротивление, измеренное с помощью электротомографии, коррелирует с данными, полученными с помощью резистивиметра Miller 400 D в пастах (рис. 4.18). Низкие значения удельного сопротивления хвостов соответствуют слоям, в которых концентрируются металлы.

Таблица 4.13 – Значения УЭС, УЭП, pH, Eh паст, влажность, содержания железа и серы сульфидной. Содержание железа и серы сульфидной приведено в мас. %.

Шурф	Образец	Глубина, см	pH	Eh, мВ	УЭП, мкСм/см	УЭС, Ом·м	Влажность, %	Fe ₂ O ₃	S _{sulfide}
К2-3 Серые хвосты	K2-3/1	0-5	7.70	340	1800	26	21	12	0.40
	K2-3/2	5-20	7.30	420	1200	15	22	14	0.47
	K2-3/3	20-40	7.20	260	1700	7.4	24	13	0.44
	K2-3/4	40-55	7.40	410	1100	12	52	15	0.52
	K2-3/5	55-60	7.50	450	1200	11	28	16	0.54
	K2-3/6	60-100	7.30	450	1200	13	22	17	0.58
	K2-3/7	100-110	7.10	180	1200	8.0	15	17	0.61
	K2-3/8	110-120	7.20	440	1100	9.6	22	12	0.41
К3-1 Красные хвосты	K3-1/1	0-15	3.00	500	3600	3.0	14	43	1.5
	K3-1/2	15-17	5.00	300	1900	5.2	23	37	1.3
	K3-1/3	17-27	3.60	660	3100	3.3	3.7	27	0.93
	K3-1/4	27-47	3.00	570	2200	4.0	29	18	0.62
	K3-1/5	47-70	6.10	320	1700	6.1	24	21	0.74
	K3-1/6	70-80	6.60	420	1900	5.5	35	13	0.45

Отходы южной «красной» части Комсомольского хвостохранилища более окислены. Значения pH образцов паст составляют от 3 до 6 (шурф К3-1, табл. 4.13, рис. 4.19). При этом значения Eh и УЭП выше, чем в северной части, и составляют 300-600 мВ и 1700-3600 мкСм/см соответственно (шурф К3-1, табл. 4.13).

Удельное сопротивление окисленных «красных» хвостов ниже, чем у «серых», и составляет от 3 до 8 Ом·м. Влажность красных хвостов колеблется от 3.7 до 35 % и не имеет значимой корреляции с удельным сопротивлением или глубиной. Содержание Fe в красных хвостах колеблется от 4.1 до 5.9 мас. % (табл. 4.13). Наименьшее удельное сопротивление (3 Ом·м) соответствует

поверхностному слою коричнево-красного мелкозернистого песка, имеющего металлический блеск, наибольшую электропроводность (3600 мкСм/см) и кислую среду pH (3.00) (проба КЗ-1/1, табл. 4.13). Содержание Fe и сульфидной серы в этом горизонте составляет 15 и 2.2 мас. % соответственно. Высокие концентрации сульфидной серы обуславливают кислотный потенциал этих отходов (Abrosimova et al., 2015). Этот слой содержит 2.2 % As(V). Концентрация ртути в этом горизонте составляет 25 г/т.

Таблица 4.14 – Изменение концентраций элементов с глубиной в пробах вещества из Комсомольского хвостохранилища в северной и южной частях, г/т

Проба	Глубина, см	As	Sb	Zn	Pb	Cu	Ag	Cd	Hg	Вторичные минеральные фазы
К2-3/1	0-5	1300	750	270	240	150	1.6	3.5	8.0	NaAl(SO ₄) ₂ ·11H ₂ O,
К2-3/2	5-20	1200	880	320	260	37	0.24	4.9	-	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
К2-3/3	20-40	1400	2100	460	590	34	2.1	7.4	5.5	CaSO ₄ ·2H ₂ O
К2-3/4	40-55	940	1500	510	460	10	0.46	4.8	1.2	Mn ²⁺ AsO ₄ OH,
К2-3/5	55-60	1000	830	290	220	54	-	3.3	-	MgHAsO ₄ ×4H ₂ O
К2-3/6	60-100	750	3200	950	1000	60	3.3	9.5	7.2	(Zn,Mg)SO ₄ x 4H ₂ O
К2-3/7	100-110	1500	3700	1000	1300	130	3.8	13	22	FeO(OH)
К2-3/8	110-120	330	1800	600	320	48	3.0	7.0	6.8	As ⁰ , Fe ₈ As ₁₀ O ₂₃
К3-1/1	0-15	22000	460	670	570	230	11	34	25	(Mn,Mg) ₆ Zn ₃ (AsO ₄) ₂ (SiO ₄)(OH) ₈
К3-1/2	15-17	17000	310	1500	490	270	8.9	50	28	Fe ₂ (AsO ₄)(SO ₄)(OH) ₅ H ₂ O
К3-1/3	17-27	3800	290	190	620	260	14	8.3	4.3	As ₂ O ₃
К3-1/4	27-47	6800	390	140	2400	100	16	1.8	14	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
К3-1/5	47-70	13000	530	970	430	230	3.9	36	18	Zn ₂ AsO ₄ (OH)
К3-1/6	70-80	800	2200	510	570	62	3.5	5.5	1.6	Cu ₄ (AsO ₄)(OH) ₅ 9H ₂ O

Как и в серых хвостах, изменение удельного сопротивления с глубиной коррелирует с pH и обратно пропорционально проводимости и Eh; хвосты с низкими значениями удельного сопротивления соответствуют слоям, в которых концентрируются металлы.

Вторичные минеральные фазы, обнаруженные в северной части хвостохранилища, включают сульфатные и гидросульфатные минералы Fe, Ca, Mg, Na, Al, K и Zn, такие как NaAl(SO₄)₂·11H₂O, ярозит KFe₃(SO₄)₂(OH)₆, гипс

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, и $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{SO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, присутствующие в поверхностной и средней частях шурфа. Кроме того, присутствуют минеральные соединения As, включающие арсенаты Mn и Mg, такие как эвейт ($\text{Mn}^{2+}\text{AsO}(\text{OH})$) и брассит (MgHAsO_4). Гетит ($\text{FeO}(\text{OH})$) присутствует на глубине 100–110 см при pH 7.1 и Eh 180 мВ, что указывает на формирование геохимического барьера. As(III) в плохните ($\text{Fe}_8\text{As}_{10}\text{O}_{23}$) и As^0 в арсеноламприите были обнаружены на глубине 110–120 см. Образование трехвалентных соединений мышьяка весьма вероятно в восстановительных и нейтральных условиях (Brookins, 2012).

Вторичные минеральные фазы, обнаруженные в хвостохранилище на южной площадке, включают сульфаты, арсенаты и гидросульфаты Fe, Mg, K, Mn, Cu и Zn, такие как $(\text{Mn}, \text{Mg})_6\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$, $\text{Fe}_2(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_5\text{H}_2\text{O}$, ярозит $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, $\text{Cu}_4(\text{AsO}_4)(\text{OH})_5\text{H}_2\text{O}$, и адамит $\text{Zn}_2\text{AsO}_4(\text{OH})$. Соединение трехвалентного мышьяка As_2O_3 (рис. 4.15) было найдено на границе между слоем с pH 3.00 и Eh 570 мВ (КЗ-1/4, на глубине 27–47 см, табл. 4.14) и слоем с pH 6.10 и Eh 320 мВ (КЗ-1/5, 47–70 см, табл. 4.14). Сделан вывод, что при изменении физико-химических условий формировался окислительно-восстановительный барьер, что приводило к изменению степени окисления мышьяка в этих минералах с +5 на +3.

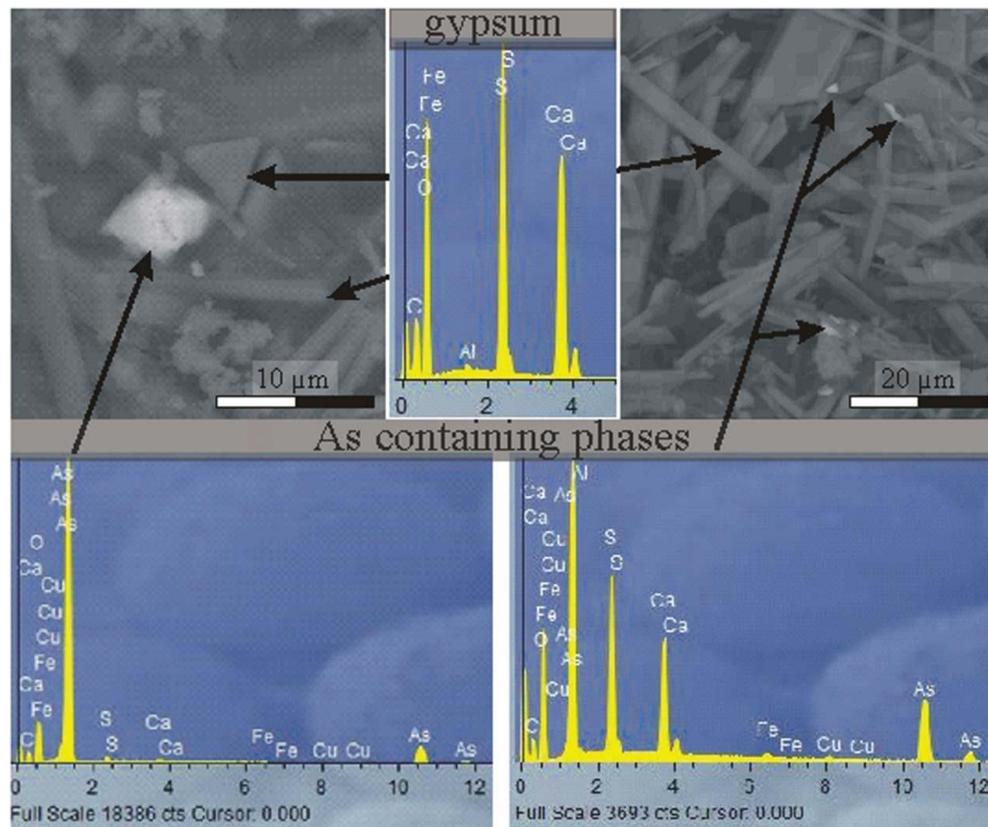


Рисунок 4.15 – Минеральные фазы мышьяка, детектированные при помощи сканирующего электронного микроскопа в сухих остатках из водных вытяжек вещества отходов южной части Комсомольского хвостохранилища (проба КЗ-1/5).

4.4.2. Связь геофизических данных и геохимического состава

Геоэлектрические разрезы по профилям 1 и 2 (серый материал в северной части хвостохранилища) характеризуются сопротивлениями в диапазоне 1-30 Ом·м (рис. 4.16). В верхней части разреза (0-1 м по вертикали) представлены наиболее проводящие породы с удельным сопротивлением 0-10 Ом·м. Этот слой, по-видимому, приурочен к высокоминерализованным отходам. Материал с сопротивлением 30 Ом·м соответствует насыпному грунту в самых нижних слоях геоэлектрического разреза. При этом anomalно-проводящие зоны располагаются на глубинах 1-1.5 м и соответствуют пути дренирования. Горизонт подземных вод залегает на глубине 2 м и имеет УЭС 15 Ом·м (желтый цвет на геоэлектрическом разрезе, рис. 4.16). Наиболее контрастные геоэлектрические разрезы по профилям

3-6 («рыжий» материал) характеризуются широким диапазоном удельных сопротивлений от 0.1 до 100 Ом·м в материале хвостов и до 2300 Ом·м в коренных породах и основании дамбы (рис. 4.17). Анализ длинных профилей 4 и 6 позволил оконтурить хвостохранилище. Толщина хвостов колеблется от 1.5 до 2.5 м, а удельное сопротивление верхней проводящей зоны варьирует в пределах от 0.1 до 50 Ом·м. Правые части профилей № 4 и 6 представляют собой изолятор – плотину, а нижние слои – коренные породы и почвы. На профиле 6 показан потенциальный путь дренажа из хвостохранилища под плотиной (жирная стрелка).

В верхней части профиля 3 видны проводящие породы с удельным сопротивлением от 2 до 10 Ом·м на глубине 1 м от поверхности. Удельное сопротивление плавно увеличивается от верхней части разреза вниз (рис. 4.17). Нижняя часть разреза соответствует менее проводящей коренной породе, жирными стрелками показаны возможные пути просачивания дренажа до горизонта подземных вод. Аномальные зоны на глубине 1.5 м соответствуют локальным утечкам высокоминерализованного флюида, образовавшегося на поверхности хвостохранилищ в результате окисления сульфидов.

“Серые” отложения в северной части

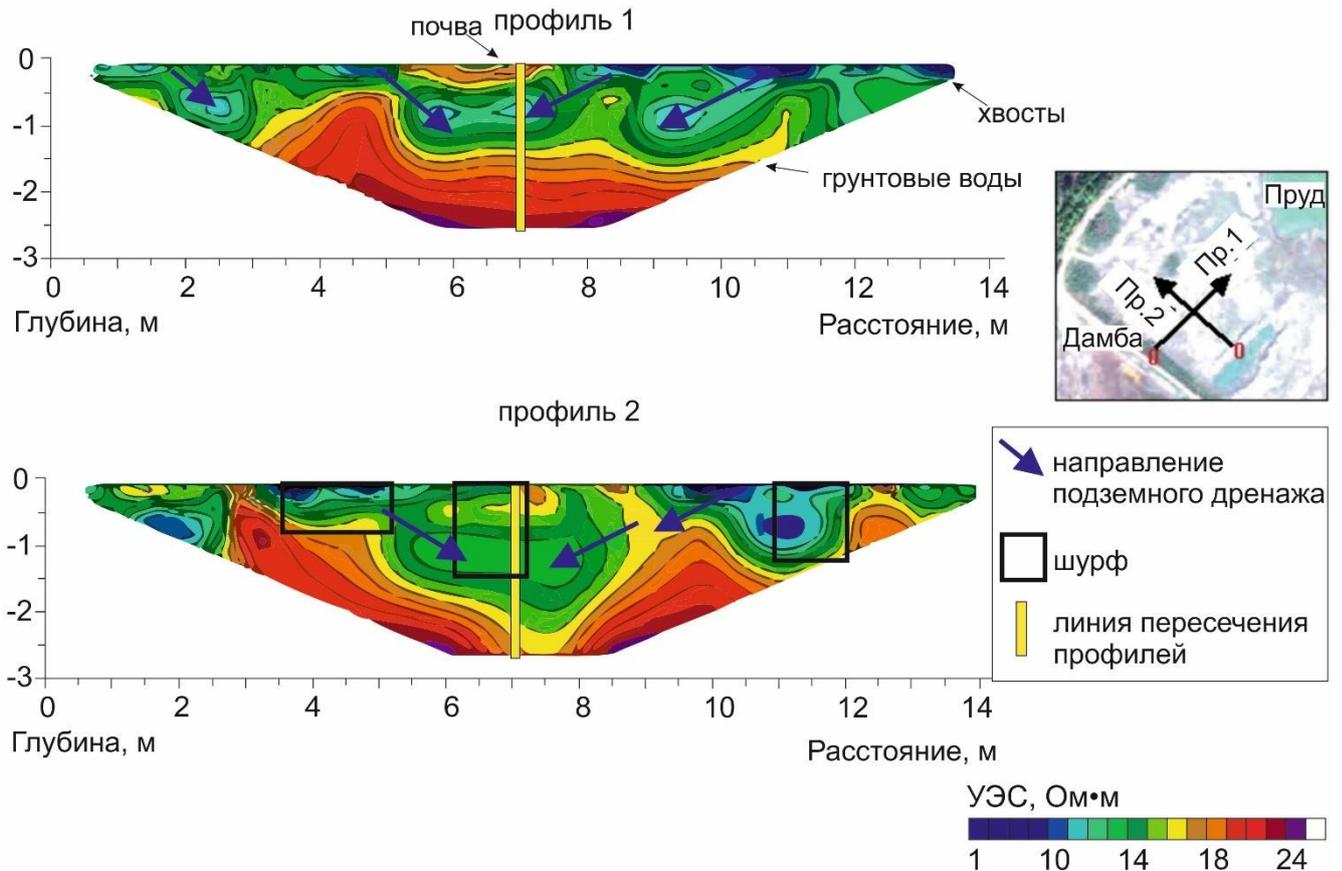


Рисунок 4.16 – Вертикальная зональность Комсомольского хвостохранилища в северной части по данным ЭТ, разрезы по профилям 1 и 2

В отличие от профиля 3 верхняя часть разреза по профилю 5 представлена менее проводящим материалом (с ориентировочными значениями удельного сопротивления 100-200 Ом·м, зеленый цвет). Проводящие хвосты располагаются в более глубоком горизонте, на глубинах от 1 до 2 м. Нижний слой соответствует коренной породе. Этот профиль расположен вблизи плотины, и поверхность этого участка покрыта гравием, смытым с неё.

Таким образом, в строении Комсомольского хвостохранилища (рис. 4.16 и 4.17) были выявлены проводящие зоны, соответствующие материалу хвостов и дренажным потокам (жирные стрелки на рис. 4.16 и 4.17), как это было аналогично показано на других хвостохранилищах [Yurkevich et al., 2015; Yurkevich et al., 2017; Olenchenko et al., 2016]. Для отбора проб были выбраны пять участков с контрастными значениями удельного сопротивления.

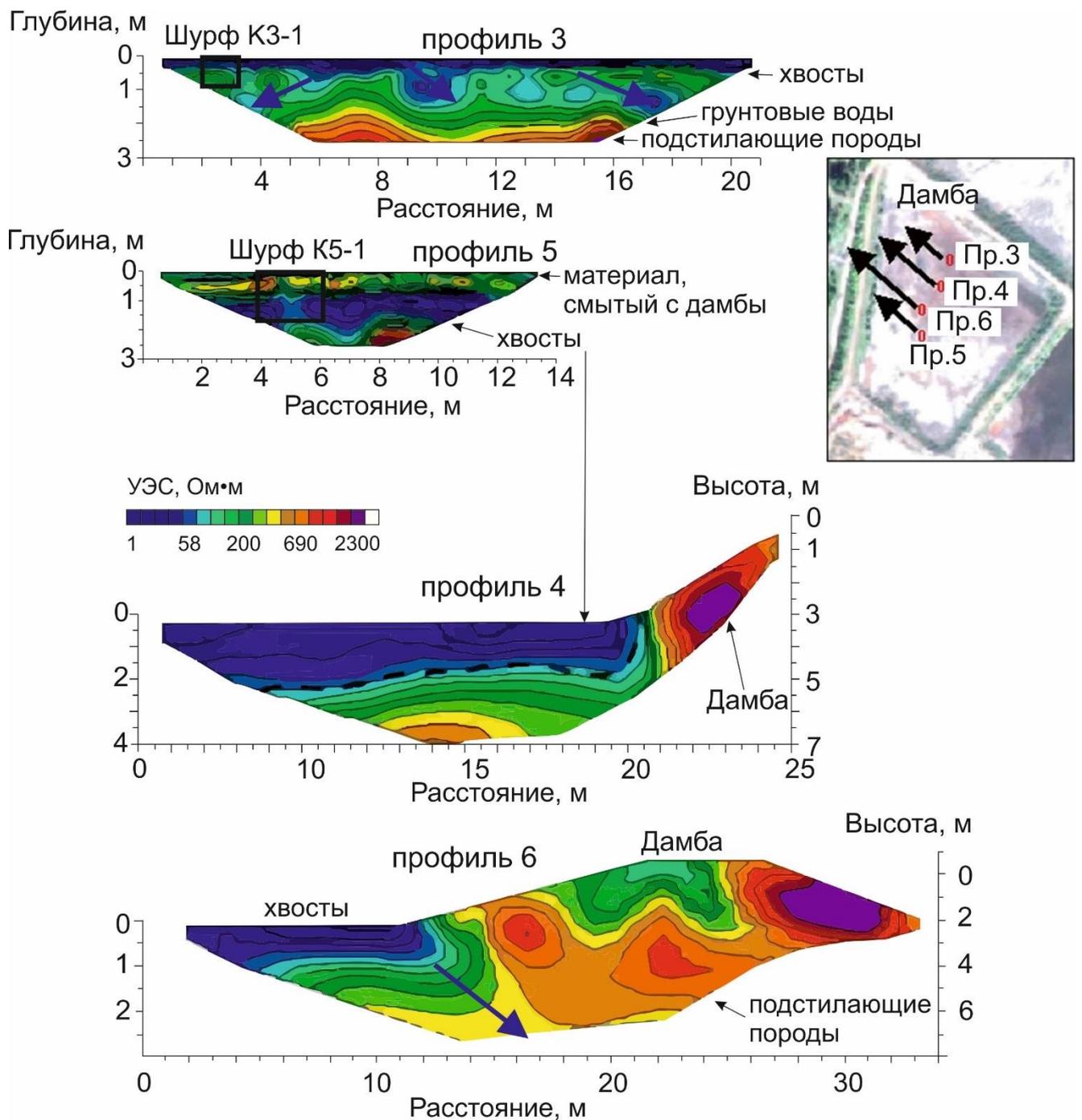


Рисунок 4.17 – Вертикальная зональность Комсомольского хвостохранилища в южной части по данным ЭТ, разрезы №№ 3-6. Жирными стрелками показаны направления дренажных путей

В случае кислотообразующих «рыжих» хвостов в зоне окисления, где значения рН паст колеблются от 3.00 до 6.60, а значения УЭП – в пределах 1700-3600 мкСм/см, мы наблюдаем сильную корреляцию между значениями рН и УЭП (рис. 4.20). Степенная зависимость между значениями рН и УЭП (в мСм/м) определяется следующим образом: $УЭП = 1256 \cdot pH^{-1.13}$.

Эти значения имеют нормальное распределение. Коэффициент корреляции R , рассчитанный по методу Пирсона, равен 0.78; это значение является статистически значимым, согласно критерию Стьюдента, при условиях $n = 40$ и $p = 0.01$.

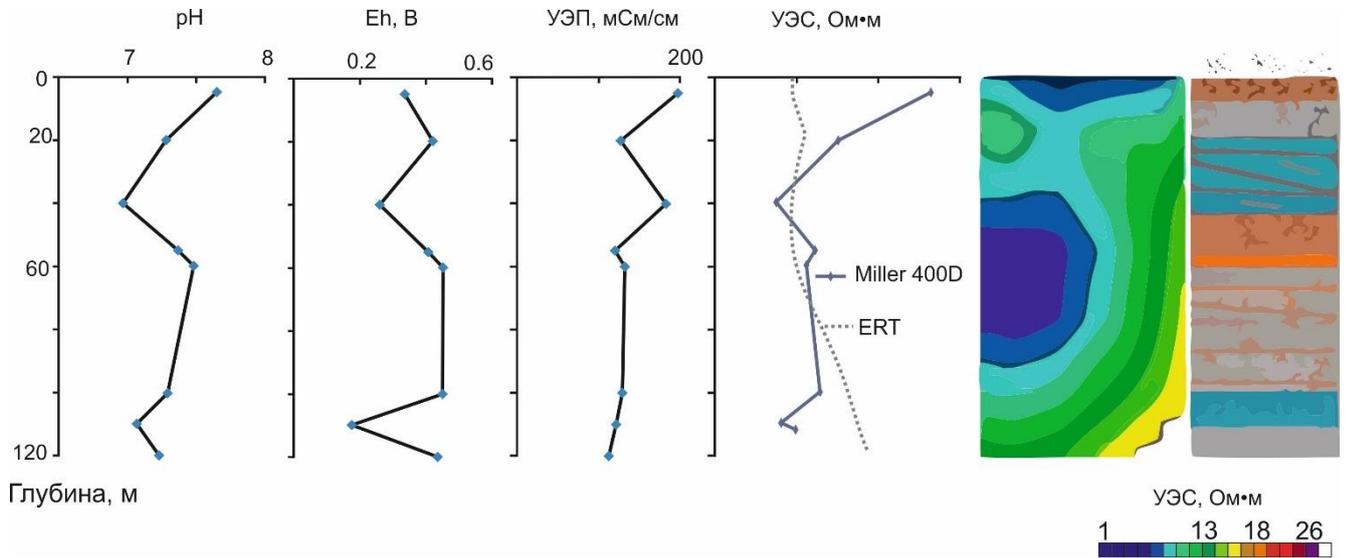


Рисунок 4.18 – Изменение значений pH, Eh, УЭП и сопротивлений по данным электротомографии и резистивиметрии (Miller 400 D) в пастах с глубиной, фрагмент геоэлектрического разреза и схема строения шурфа, северная часть Комсомольского хвостохранилища

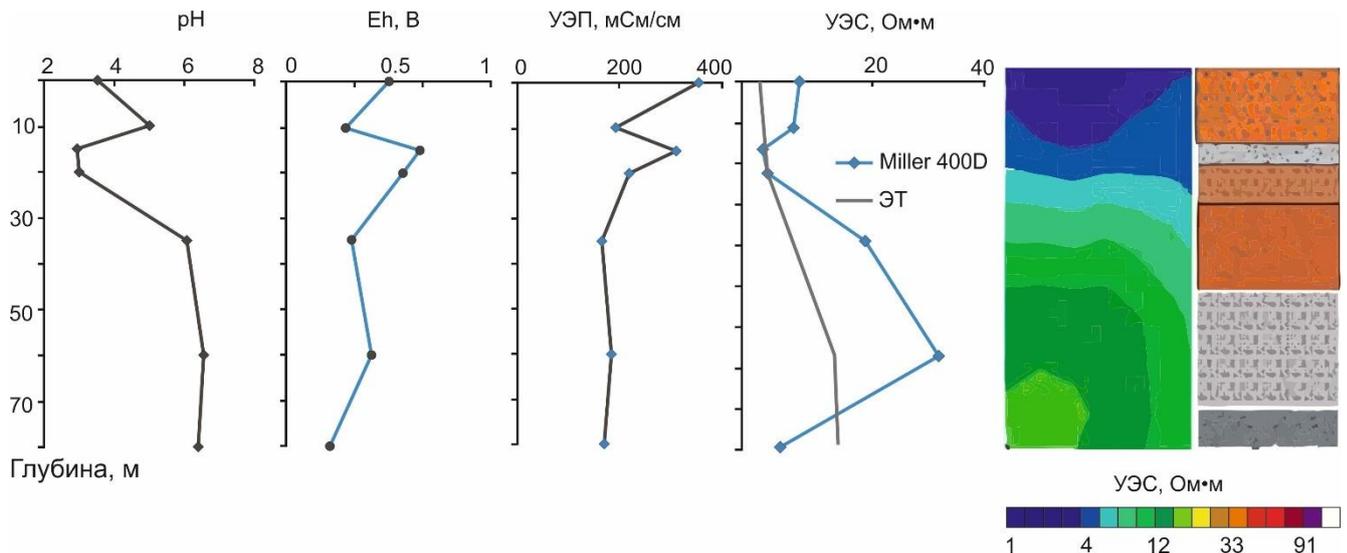


Рисунок 4.19 – Изменение значений pH, Eh, УЭП и сопротивлений по данным электротомографии и резистивиметрии (Miller 400 D) в пастах с глубиной, фрагмент геоэлектрического разреза и схема строения шурфа, южная часть Комсомольского хвостохранилища

Очень высокая подвижность ионов водорода означает, что $[H^+]$ является наиболее важным компонентом растворенных соединений при определении УЭП кислого раствора [Tucholiz et al., 2016].

В нейтральных «серых» хвостах не отмечается значимой корреляции между значениями рН и электропроводностью паст. Можно предположить, что основной вклад в их общую проводимость вносит минеральный скелет. Коэффициент корреляции между общим количеством металлов (Ca, Mg, K, Na, Fe, Zn, Pb, Cu, Ag) (S_{Me} , в %) в серых неокисленных хвостах и УЭП (в мСм/м) равен 0.85. Это значение является статистически значимым согласно критерию Стьюдента, когда $n = 40$ и $p = 0.01$.

Однако мы не наблюдаем строгих корреляций между УЭП и содержанием сульфидной серы, а также между УЭП и уровнем влажности.

Эти результаты показывают, что зоны высокой проводимости в окисленных хвостохранилищах указывают на локальные участки с высоким потенциалом образования кислоты и сосуществующими кислыми поровыми растворами. В свою очередь минерализация порового раствора зависит от окислительно-восстановительных условий. При низких значениях рН и высоких Eh происходит активное окисление сульфидных минералов и растворение вторичных минеральных фаз. Следовательно, чем ниже рН пасты, тем выше УЭП (рис. 4.20). Области повышенной проводимости в неокисленных «первичных» хвостах указывают на проводимость минерального скелета.

Таким образом, ЭТ позволяет очертить границы техногенных отложений и подземного стока (жирные стрелки на рис. 4.16 и 4.17). Зная концентрации рудных элементов в твердом материале и среднюю мощность залежи, можно рассчитать суммарные текущие ресурсы в хвостах (в тоннах): 1300-22 000 As, 3-16 Ag, 150-270 Cu, 1000-1500 Zn, 1000-2400 Pb, 22-28 Hg, 13-50 Cd. Повышенное содержание As и Hg представляет потенциальную опасность для окружающей среды. Тем не менее извлечение рудных компонентов уменьшит затраты на переработку отходов и рекультивацию загрязненной территории.

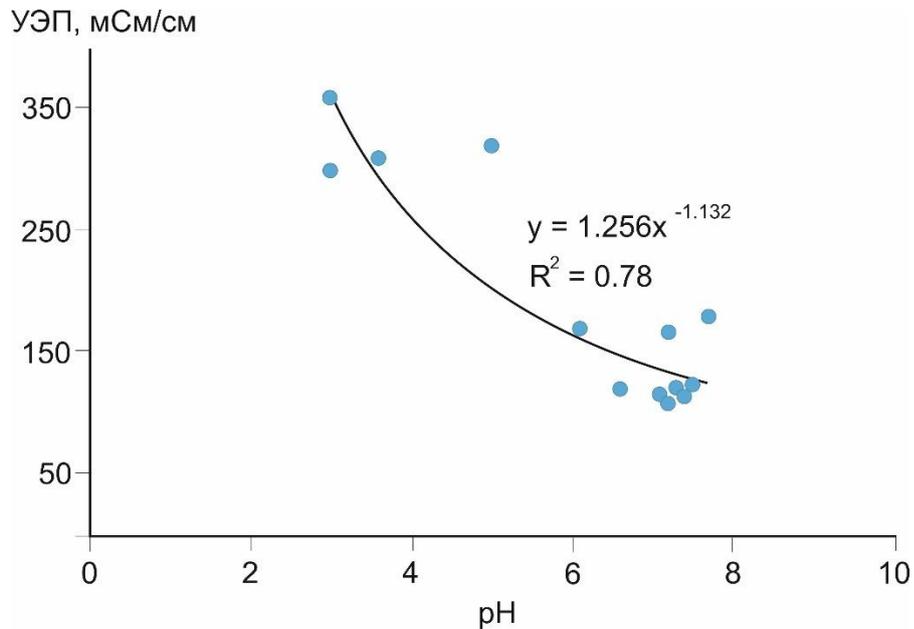


Рисунок 4.20 – Взаимосвязь между рН и УЭП в пастах

4.5. Шахтаминское хвостохранилище

4.5.1. Состав вещества

Распределение физико-химических параметров твердого вещества (рН пасты, окислительно-восстановительный потенциал (Eh, мВ) и электропроводность) неоднородно по глубине (табл. 4.15). Пробы из сезонно-талого слоя (до 50 см) характеризуются кислой реакцией среды (рН 2.65-2.87), окислительной обстановкой (+710+784 мВ) и электропроводностью 860-1400 мкСм/см. Предположительно, в этом горизонте активно протекают реакции окисления вещества, формируется кислый дренаж.

В составе вещества определен широкий спектр химических элементов (табл. 4.15). Отличительной особенностью шахтаминских хвостов является присутствие значимых концентраций Mo, Cu, Zn, Pb. Найдены золото и индий, а также потенциально опасные элементы – мышьяк, ртуть и таллий. Особенности распределения элементов по глубине связаны скорее с неоднородностью складирования вещества, чем с процессами преобразования в ходе гиперкриогенеза.

Таблица 4.15 – Состав вещества отходов в Шахтаминском отвале (шурф 1)

	ШХТ-1/0	ШХТ-1/1	ШХТ-1/2	ШХТ-1/3	ШХТ-1/4	ШХТ-1/5	ШХТ-1/6	ШХТ-1/7
Глубина, см	15	35	50	65	105	160	160	170
рН пасты	2.7	2.9	2.8	4.8	6.3	6.3	5.9	6.1
Eh, мВ	790	770	710	59	540	520	530	530
χ_2 мкСм/см	1400	1400	860	830	403	360	270	220
	%							
SiO ₂	46	46	48	46	46	45	43	45
Al ₂ O ₃	10	12	12	13	14	14	16	14
Fe ₂ O ₃	6.7	6.7	12	8.7	8.1	13	11	9.3
K ₂ O	8.9	10	10	10	11	11	12	9.4
Na ₂ O	1.2	4.9	4.6	5.4	6.2	7.6	5.1	5.9
MgO	0.49	0.80	0.80	0.88	1.1	1.0	1.6	0.95
TiO ₂	0.35	0.51	0.53	0.48	0.53	0.56	0.64	0.58
BaO	0.0770	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.24
	г/т							
P	800	600	700	700	900	800	1000	600
Mn	200	200	1300	3200	1800	1900	1900	1500
V	33	43	48	49	49	55	65	53
Li	37	38	42	42	43	35	54	35
Be	1.3	2.1	2.2	2.4	1.9	2.6	2.6	2.8
Cr	42	50	104	87	39	82	26	47
Co	1.0	2.3	3.6	5.1	4.7	6.1	4.6	4.5
Ni	10	10	10	10	10	10	10	10
Cu	240	170	190	390	350	240	260	100
Zn	480	270	490	780	1200	870	1800	860
Ga	15	17	17	18	18	20	24	20
Ge	2.7	2.4	2.3	2.6	2.2	2.3	2.6	2.6
As	160	77	53	30	52	39	52	26
Se	7.1	6.5	9.4	6.6	9.4	8.7	8.7	6.1
Rb	240	250	260	240	250	240	340	260
Sr	87	200	180	220	250	290	220	300
Y	8.0	9.0	9.0	20	15	16	19	17
Nb	12	17	15	14	13	17	16	20
Mo	340	1100	910	640	400	520	580	720
Ag	24	5.8	5.7	1.9	6.1	2.8	4.1	1.3
Cd	2.1	1.5	2.2	2.7	5.8	4.7	11	4.5
In	1.0	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.5	0.2
Sn	8.7	9.3	9.8	8.3	7.1	10	15	11
Sb	94	17	18	11	21	10	29	8
Te	1.3	1.3	1.1	1.0	1.0	1.8	3.5	1.3
Cs	8.8	8.9	9.1	9.0	8.2	8.6	18	8
Ta	0.40	1.0	0.90	0.80	0.70	0.90	0.90	1.1
W	180	86	150	110	78	110	90	74

Продолжение таблицы 4.15

	ШХТ-1/0	ШХТ-1/1	ШХТ-1/2	ШХТ-1/3	ШХТ-1/4	ШХТ-1/5	ШХТ-1/6	ШХТ-1/7
	г/т							
Au	0.63	0.96	0.16	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Hg	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Tl	3.4	2.9	2.7	2.5	2.4	2.6	4.1	2.8
Pb	4000	840	840	280	1200	390	400	260
Bi	32	11	12	5.9	10	11	27	3.0
Th	6.4	6.0	10	13	9.0	11	15	13

4.5.2. Связь геохимических и геофизических данных

Дополнительное зондирование по «микропрофилю» длиной 14.1 м с шаг между электродами – 30 см было проведено для уточнения геоэлектрической зональности отвала. Подробнее процедура описана в главе 3. Здесь автор акцентирует внимание на том, что такую вариацию метода именует “микроэлектротомографией” для ускорения описания последовательности действий, которые привели к получению геоэлектрического разреза до глубины 3 м, хотя термины «микроэлектротомография» и «микропрофиль» и не получили широкого распространения в литературе. Полученный разрез позволяет рассмотреть зональность вещества с детальностью 15 см, определить участки с наиболее контрастными УЭС для заложения шурфов. На рисунке 4.21 продемонстрирован разрез по «микропрофилю», где на отметке 10 м в верхней части разреза отмечено расположение шурфа.

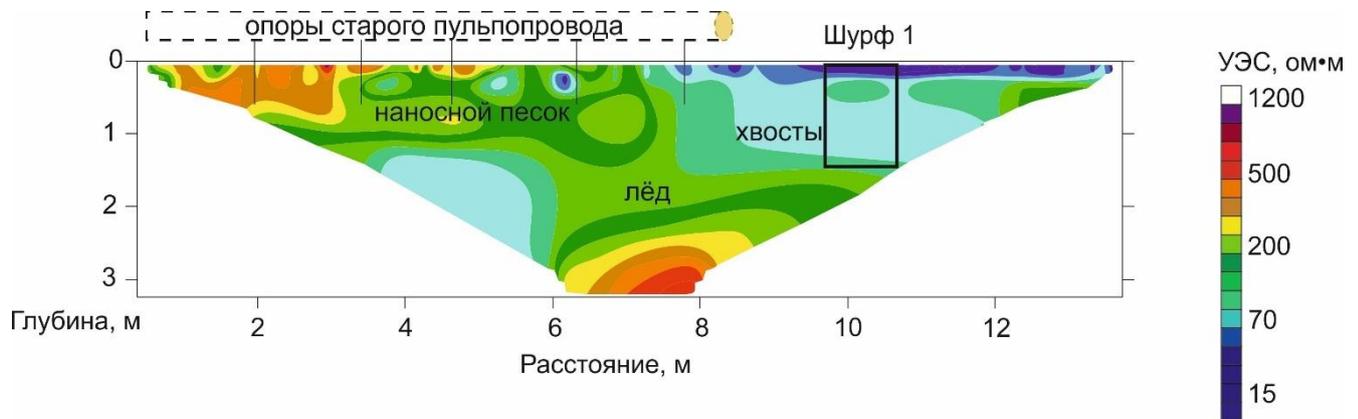


Рисунок 4.21 – Геоэлектрический разрез по профилю микроэлектротомографии

В самом верхнем поверхностном горизонте идёт активный вынос вещества за счёт окисления и выщелачивания атмосферными осадками, техногенные потоки хорошо маркируются данными электротомографии ($УЭС \leq 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Глубже сезонного талого слоя (1.6 м) на границе с зоной вечной мерзлоты формируется техногенный геохимический барьер, на котором концентрируются металлы (рис. 4.22). На геоэлектрических разрезах по данным электротомографии такие слои можно выделить при переходе от проводящих зон к низкопроводящим (рис. 4.21, 4.22). Ещё один геохимический барьер формируется в подповерхностном слое (первые 50 см) за счет смены физико-химических условий (Eh падает, pH растёт), что находит своё отражение в росте сопротивления в материале ниже этого горизонта (рис. 4.22). В самом же барьере мы наблюдаем резкий скачок суммарной концентрации металлов.

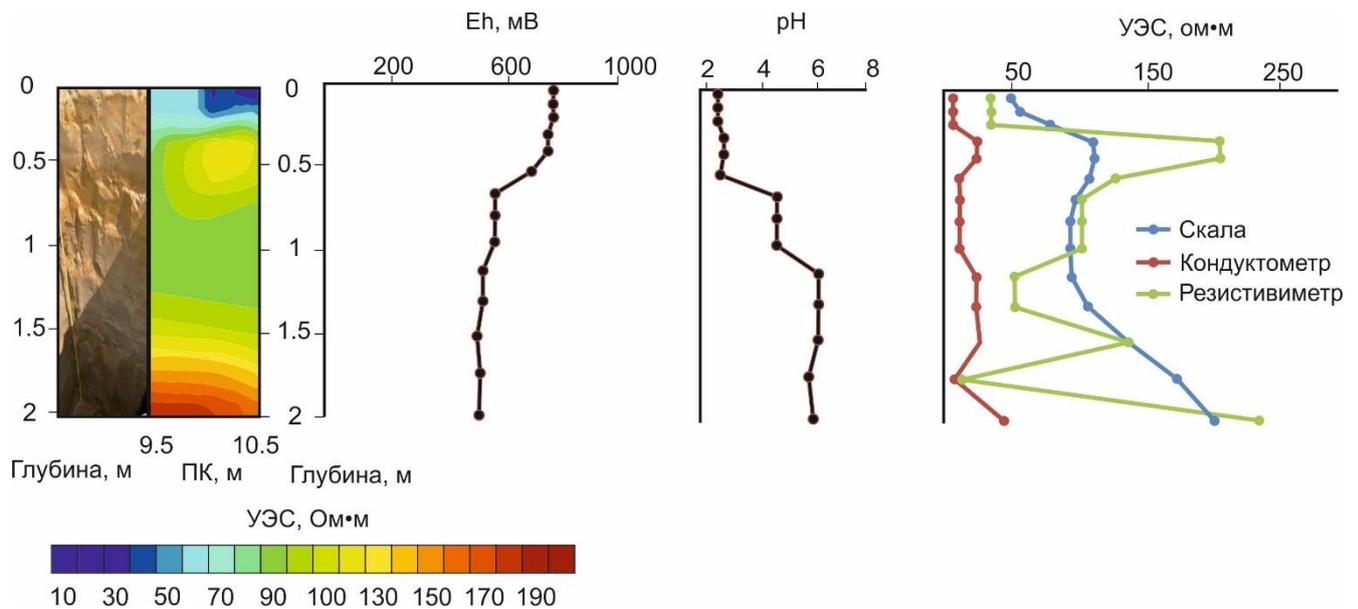


Рисунок 4.22 – Сопоставление данных микроэлектротомографии и физико-химических параметров среды в веществе Шахтаминского отвала (шурф 1)

4.5.3. Состав поровых растворов

Для Шахтаминского хвостохранилища были изучены поровые воды вещества отходов из шурфа 1. Значения pH поровых вод скачкообразно растёт от 2.65 на глубине 0-15см, до 6.11 на глубине 162-169 см (рис. 4.23).

Повышенные концентрации Ca, Mg, Mn, Si и Al (рис. 4.23) в поровых водах у поверхности, вероятно, связаны с реакциями нейтрализации с участием карбонатных и алюмосиликатных минералов (кальцит CaCO_3 , кварц SiO_2 , доломит $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, сидерит FeCO_3 , калиевый полевой шпат, мусковит), присутствующих в веществе хвостохранилища. Рядом с поверхностью Fe, Zn, Pb, Cu, As, Sb, Te (рис. 4.24) переходят в поровые воды за счет окислительного растворения сульфидных минералов (пирита, галенита, вульфенита, молибденита).

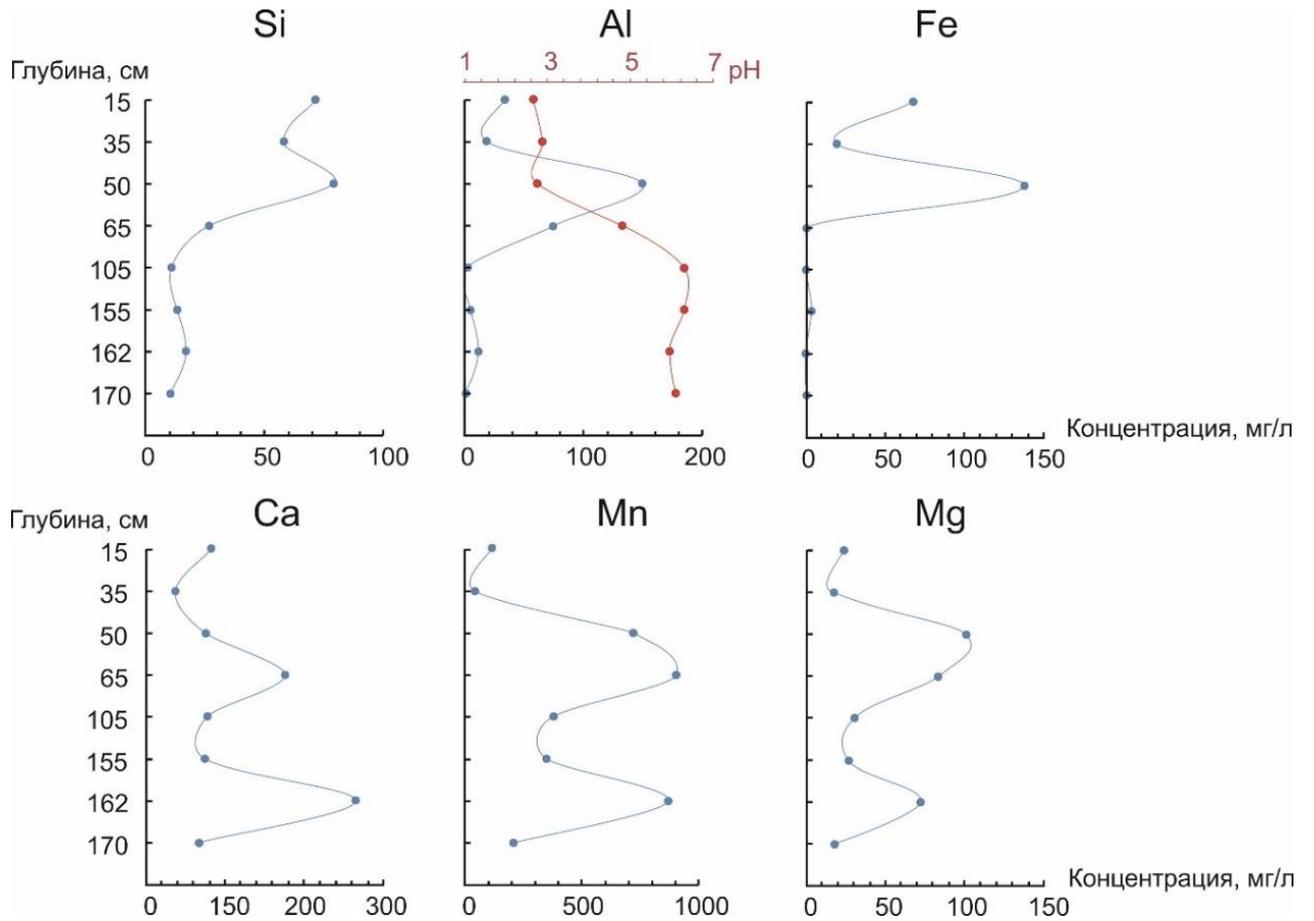


Рисунок 4.23 – Распределение концентраций породообразующих элементов в поровых водах по глубине шурфа ШХТ 1 в Шахтаминском хвостохранилище

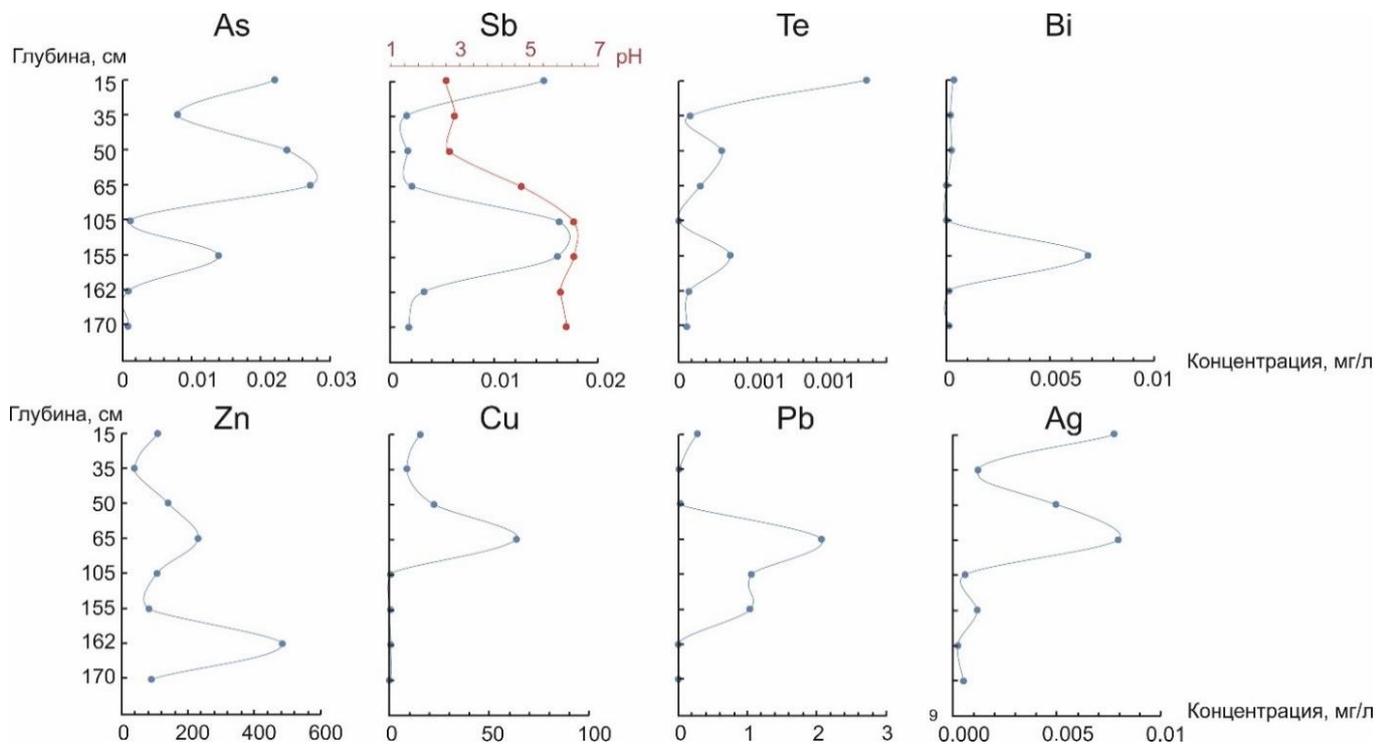


Рисунок 4.24 – Распределение концентраций металлов и металлоидов в поровых водах по глубине шурфа ШХТ 1 в Шахтаминском хвостохранилище

4.6. Дарасунское хвостохранилище

4.6.1. Состав вещества отходов

Основные минеральные фазы, присутствующие в хвостах, представлены слюдой, Fe-Mg хлоритом, смектитом, кварцем. Рудные минералы отходов включают сульфиды, сульфаты, оксиды и гидроксиды железа, свинца, цинка и меди. В кеках цианирования доля сульфидов составляет около 46 мас. %, из них на долю пирита приходится 86 % мас. В меньшей степени присутствует арсенопирит – 5.7 %. Массовая доля халькопирита, галенита и сфалерита составляют 0.3, 0.2 и 0.1 мас. % соответственно.

Хвосты относятся к мелко-среднезернистому песку, распределение среднего диаметра частиц по глубине свидетельствует о неоднородности материала: на глубинах 0-65 см преобладают частицы с диаметром частиц 86-300 мкм, глубже залегают пылеватые частицы размером 16-28 мкм. Значения pH паст распределяются относительно однородно по всей глубине шурфа: от 7.08 до 8.50 единиц, среда окислительная (Eh – от 350 до 444 мВ), за исключением горизонта на

глубине 73 см, который характеризуется падением Eh до 191 мВ. Электропроводность хвостов – от 90 мкСм/см у поверхности до 1818 мкСм/см в самой глубокой точке шурфа (113 см). Влажность хвостов варьирует от 5.1 % в самом верхнем горизонте до 30 % на глубине 73 см (табл. 4.16).

Среди породообразующих элементов преобладают кремний, алюминий и железо, концентрации всех элементов (Si, Al, Fe, Na, K, Mg, Ti, P) выше кларковых для земной коры (табл. 4.16). Концентрации P, Mg, K, Al, Fe в среднезернистых песках на глубинах 0-65 см ниже, чем в более глубоких горизонтах с пылеватым материалом, в то время как кремнием, натрием и титаном в большей степени обогащены верхние среднезернистые пески.

Таблица 4.16 – Физико-химические параметры и концентрации порообразующих элементов (весовые % оксидных форм) вещества отходов Дарасунского хвостохранилища (пробы D1-D9, на различных глубинах шурфа) и сравнение со средними концентрациями химических элементов в земной коре

Параметр	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	Кларк земной коры ¹
Глубина, см	10	40	60	70	75	80	90	110	140	
pH пасты	8.5	8.2	7.9	7.2	7.2	7.1	7.2	7.2	7.2	
Eh пасты, мВ	350	370	410	440	390	190	430	440	440	
УЭП, мкСм/см	90	98	290	880	1500	1700	1400	1500	1800	
Влажность, %	5.1	10	10	20	27	30	29	23	25	
Средний размер частиц, мкм	300	202	160	86	24	16	22	28	20	
SiO ₂	62	65	64	62	51	51	51	53	40	67
Al ₂ O ₃	31	27	28	27	34	34	33	33	29	15
FeO	8.4	7.6	7.3	8.0	9.0	8.7	8.6	9.1	9.9	5.0
Na ₂ O	7.9	4.6	4.5	4.5	3.0	2.9	3.2	3.2	3.0	3.3
K ₂ O	6.0	4.8	4.0	4.3	6.2	6.1	5.6	4.8	5.5	2.8
MgO	2.7	2.2	2.3	2.4	2.9	3.0	3.1	3.6	4.1	2.5
TiO ₂	0.90	1.0	1.0	0.94	0.86	0.92	0.83	0.89	0.94	0.64
P ₂ O ₅	0.38	0.38	0.42	0.51	0.57	0.58	0.59	0.55	0.59	0.15

¹Rudnick, Roberta L., and Shan Gao. "Composition of the continental crust." Treatise on geochemistry (2003): 659.

Концентрации широкого спектра микроэлементов превышают кларковые значения (табл. 4.17), но особенно ярко проявлены аномалии для мышьяка (в 1400 раз), сурьмы (200 раз), висмута (1700 раз), серебра (57 раз) и золота (387 раз). Причем, наибольшее накопление химических элементов характерно для горизонтов с преобладанием пылеватых частиц на глубинах 67-113 см, эти же слои выделяются как зоны с наименьшими сопротивлениями среды на геоэлектрическом разрезе (рис. 4.25).

Таблица 4.17 – Концентрации микроэлементов (г/т) в веществе отходов Дарасунского хранилища (образцы D1-D9, различные глубины шурфа) и средние содержания микроэлементов в верхней части земной коры. Жирным курсивом выделены концентрации, превышающие кларки земной коры.

Параметр	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	Кларк земной коры ¹
Глубина, см	0-10	11-53	54-65	66-68	69-73	74-83	84-106	107-113	114-140	
Ba	650	610	540	580	640	610	650	630	720	624
Mn	460	1100	1100	1200	1200	1200	1200	1300	1300	1000
Sr	270	300	250	240	230	210	210	200	210	340
V	100	110	120	120	140	130	130	130	150	90
Cr	93	77	68	110	73	63	69	63	81	83
Rb	84	66	59	61	100	100	89	78	93	150
W	66	51	11	49	18	17	27	29	47	1.3
Cu	65	170	240	350	930	970	870	640	780	47
Zn	65	240	280	320	540	490	450	300	350	83
Co	23	13	13	13	16	19	16	18	23	18
As	16	1200	1500	2200	3400	3500	4800	2400	2600	1.7
Pb	11	110	250	300	580	620	580	270	280	16
Se	10	4.6	7.2	9.0	6.9	11	6.1	5.2	2.2	0.05
Mo	5.2	4.3	4.8	5.9	4.3	5.9	8.2	5.3	7.0	1.1
Sn	3.4	2.5	2.4	3.2	5.7	4.4	5.4	2.3	4.7	2.5
Be	1.8	1.8	1.8	2.8	2.6	1.6	2.0	1.8	2.4	3.8
Sb	1.3	33	100	110	130	160	170	120	120	0.5
U	1.3	1.9	1.4	1.8	2.7	2.6	2.3	1.4	1.7	2.5
Tl	0.93	0.90	0.77	0.86	1.6	1.4	1.4	1.2	1.4	1.0
Hg	0.50	0.50	0.63	0.50	1.4	1.8	1.3	0.57	0.85	0.083
Au	0.45	0.14	0.23	0.40	0.61	0.74	0.86	0.70	1.1	0.0015
Bi	0.36	4.0	8.0	11	25	30	28	17	17	0.009
Cd	0.33	1.0	1.2	1.6	2.2	2.3	2.2	1.4	1.6	0.13
Ag	0.24	1.2	2.1	2.8	6.6	7.7	6.9	3.9	4.6	0.07
In	0.10	0.20	0.22	0.25	0.42	0.43	0.45	0.33	0.31	0.25

¹Rudnick, Roberta L., and Shan Gao. "Composition of the continental crust." Treatise on geochemistry 3 (2003): 659.

4.6.2. Сопоставление геофизических и геохимических данных

Геоэлектрический разрез, построенный по профилю микроэлектротомографии, даёт представление о чередовании слоёв техногенного вещества с различной электропроводностью (рис. 4.25а). По всей длине профиля (14.1 м) выделяется поверхностный высокоомный слой глубиной до 50 см, ниже которого расположен проводящий горизонт мощностью около 1 м до глубины около 1.5 м, далее снова следуют относительно малопрободящие грунты. Фрагмент геоэлектрического разреза (рис. 4.25б) сопоставлен с данными геохимического опробования шурфа, выкопанного на глубину сезонно-талого слоя до мерзлых пород (глубина сезонного промерзания – 1.4 м) для верификации сопротивлений среды химическим составом. Верхние слои до глубины 53 см в зоне активного криогенеза подвергаются интенсивному выветриванию за счёт сезонных колебаний температур и влажности, происходит выщелачивание и вынос с водными потоками широкого спектра химических элементов. Такие слои характеризуются более крупным размером частиц, меньшей влажностью (5-10 %), чем остальные горизонты, низкой электропроводностью и окислительно-восстановительным потенциалом (табл. 18, пробы D-1, D-2), относительно низкими концентрациями элементов по сравнению с нижележащим пылеватым материалом (табл. 19, пробы D-1, D-2), маркируются на геоэлектрических разрезах как зоны относительно повышенного сопротивления (рис. 4.25б).

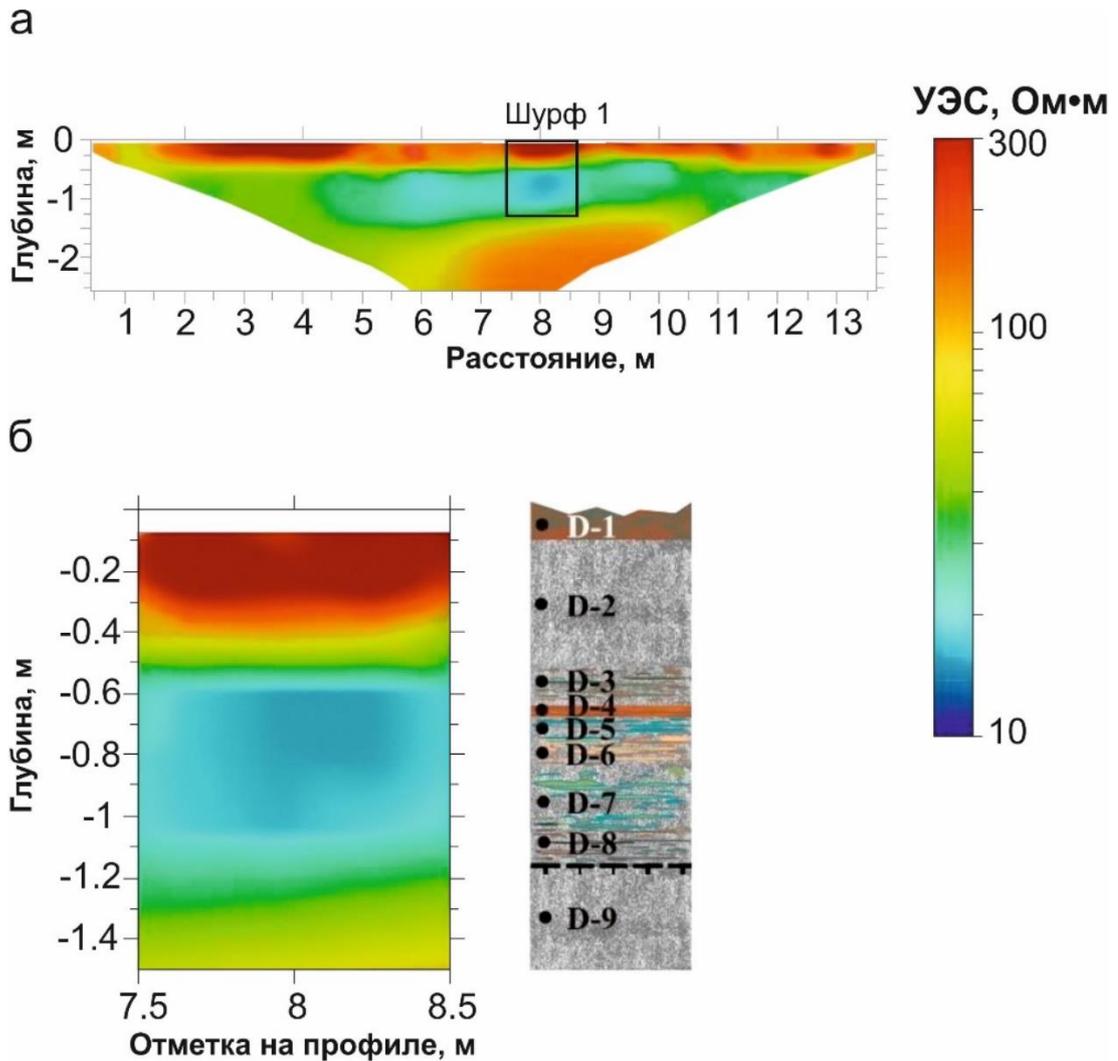


Рисунок 4.25 – Геоэлектрический разрез по профилю микроэлектротомографии (а), сопоставление фрагмента геоэлектрического разреза (б слева) с описанием шурфа (б справа)

В промежуточном горизонте на глубинах 50-113 см располагается пылеватый влажный материал (влажность 25-30 %) с повышенными значениям E_h , в котором в чрезвычайно высоких концентрациях накоплены мышьяк (до 4831 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 с одной стороны, а с другой – в нём протекают процессы

окисления (о чём говорят высокие Eh пасты) и преобразования твердого вещества с формированием подвижных комплексов химических элементов в поровых растворах, готовых к транспорту при помощи капиллярного поднятия и просачиваний дренажа. Такие горизонты отвечают зонам пониженного сопротивления на геоэлектрическом разрезе, полученном при помощи метода электротомографии (рис. 4.25). 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 обнаружен физико-химический геохимический барьер на глубине 65-70 см с резким скачком значений Eh (рис. 4.26) и концентраций химических элементов. Ещё один геохимический барьер, концентрирующий химические элементы, определяется на глубине 113 см на границе с мерзлым грунтом. Горизонты глубже 113 см представлены мёрзлыми грунтами, зоной относительного «химического покоя» с низкими скоростями химических реакций, что находит своё отражение в пониженной электропроводности среды. Важно, что активный слой с точностью до 5 см трассируется методом микроэлектротомографии, что позволяет и в дальнейшем использовать данный подход для оконтуривания горизонтов выщелачивания и концентрирования вещества. Подобные пылеватые пески с высокими окислительно-восстановительными потенциалами и концентрациями химических элементов соответствуют проводящим зонам на глубине 4-15 м (рис. из раздела 6.6), то есть ниже горизонтов сезонного промерзания.

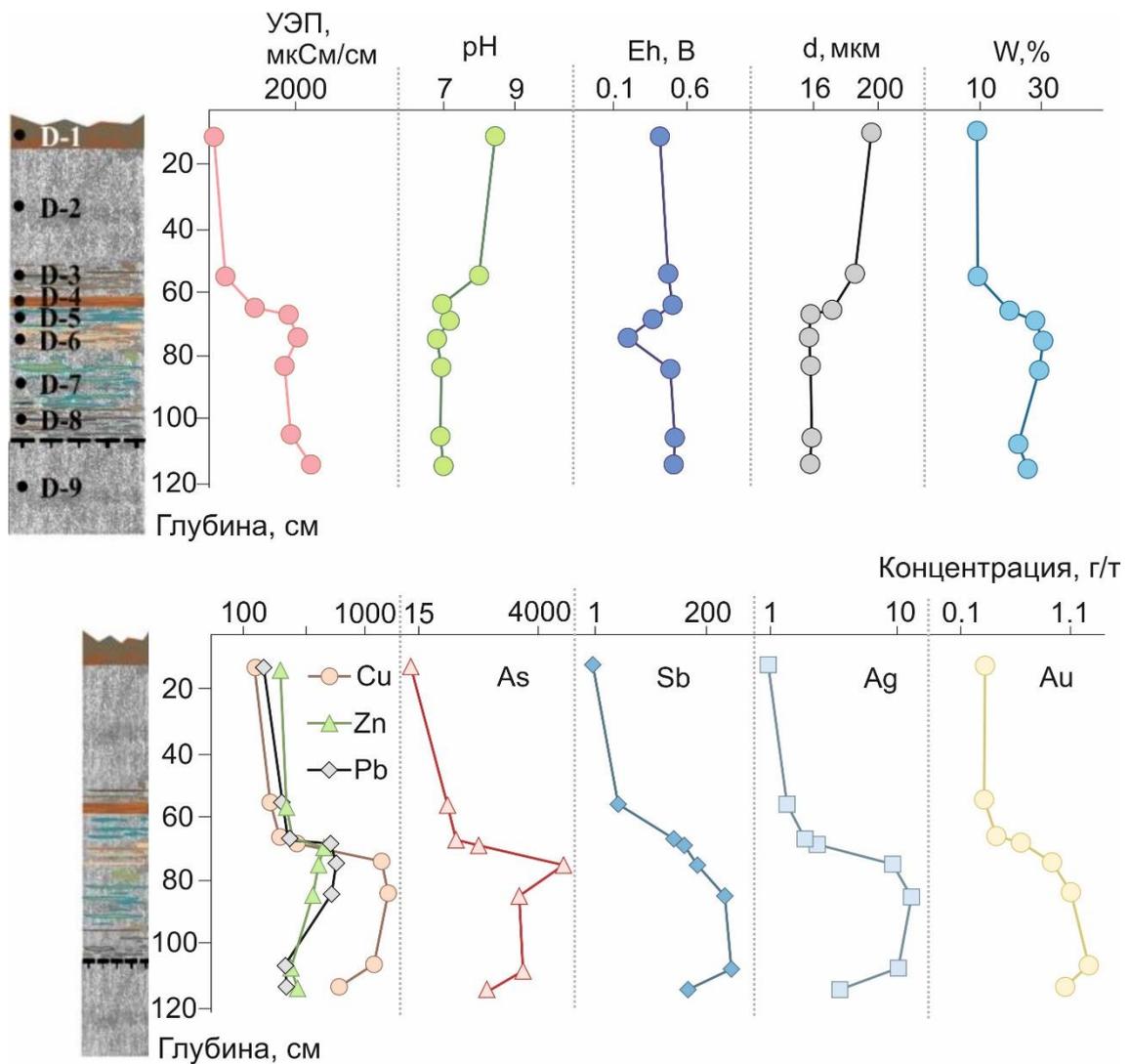


Рисунок 4.26 – Распределение физико-химических параметров, среднего диаметра частиц, влажности вещества и концентраций химических элементов в твёрдом веществе по глубине шурфа из Дарасунского хвостохранилища

В итоге по совокупному анализу геофизических и геохимических данных можно заключить, что зона активного выветривания и водного выщелачивания существует на поверхности отходов до глубины 50 см, где расположены дезинтегрированные среднезернистые пески, далее расположен пылеватый плотный увлажнённый слой, в котором сконцентрирована большая часть сульфидных минералов (до глубины 1.4 м).

4.6.3. Состав поровых растворов

По разрезу шурфа от поверхности до глубины 113 см значение рН поровых вод плавно падает с глубиной от 8.18 (0-10 см) до 7.21 (106-113 см) (рис. 4.27). Для верхних частей разреза характерно обеднение в содержаниях породообразующих компонентов (Si, K, Na, Mg, Mn), а также металлов и металлоидов (Zn, Cu, Sb, Mo), видимо интенсивно выносимых из зоны окисления вниз по разрезу. Содержание железа и алюминия выше в верхних горизонтах. Среди металлов исключение составляет висмут, концентрации которого довольно стабильны по всему разрезу с небольшими колебаниями.

Неравномерное распределение растворённых форм элементов свидетельствует о наличии геохимических барьеров, предположительно на глубинах 65-67 см и 78-83 см, где происходят скачкообразные изменения рН, вследствие чего идёт переход элементов (Mg, Al, Na, K, Si, As, Sb, Zn, Cu, Zr, Nb, Ta, Te) (рис. 4.27-4.29) в раствор или же сорбция элементов (Cr, Fe, Ag, Pb, Bi). Было предположено, что As, Sb, Ag, Pb, Ni, Cu, Zn, Si, содержания которых более высокие во вторичных минералах, чем в первичных - пирите и арсенопирите, привносятся из поровых растворов.

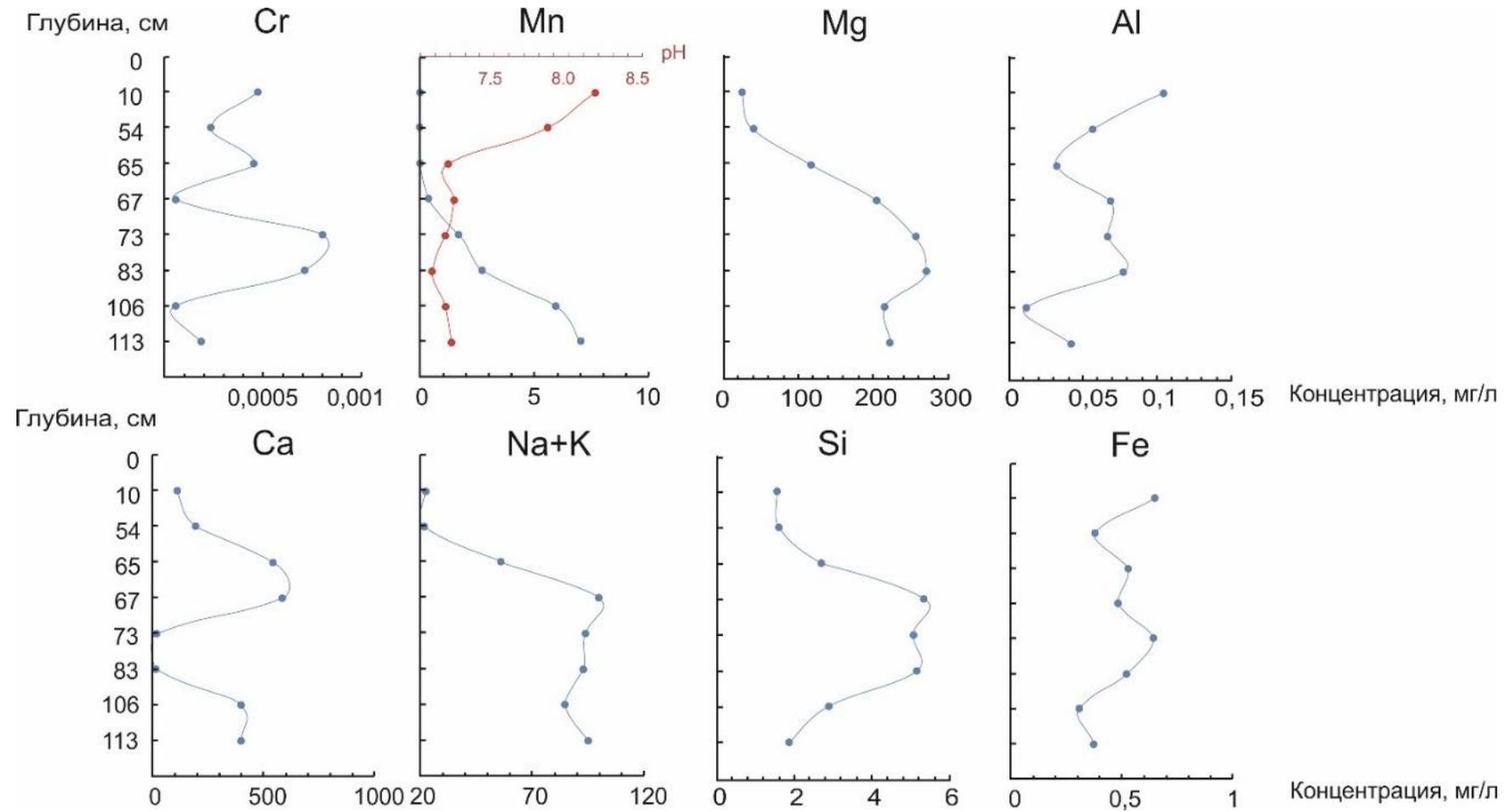


Рисунок 4.27 – Распределение концентраций породообразующих элементов в поровых водах по глубине шурфа из Дарасунского хвостохранилища

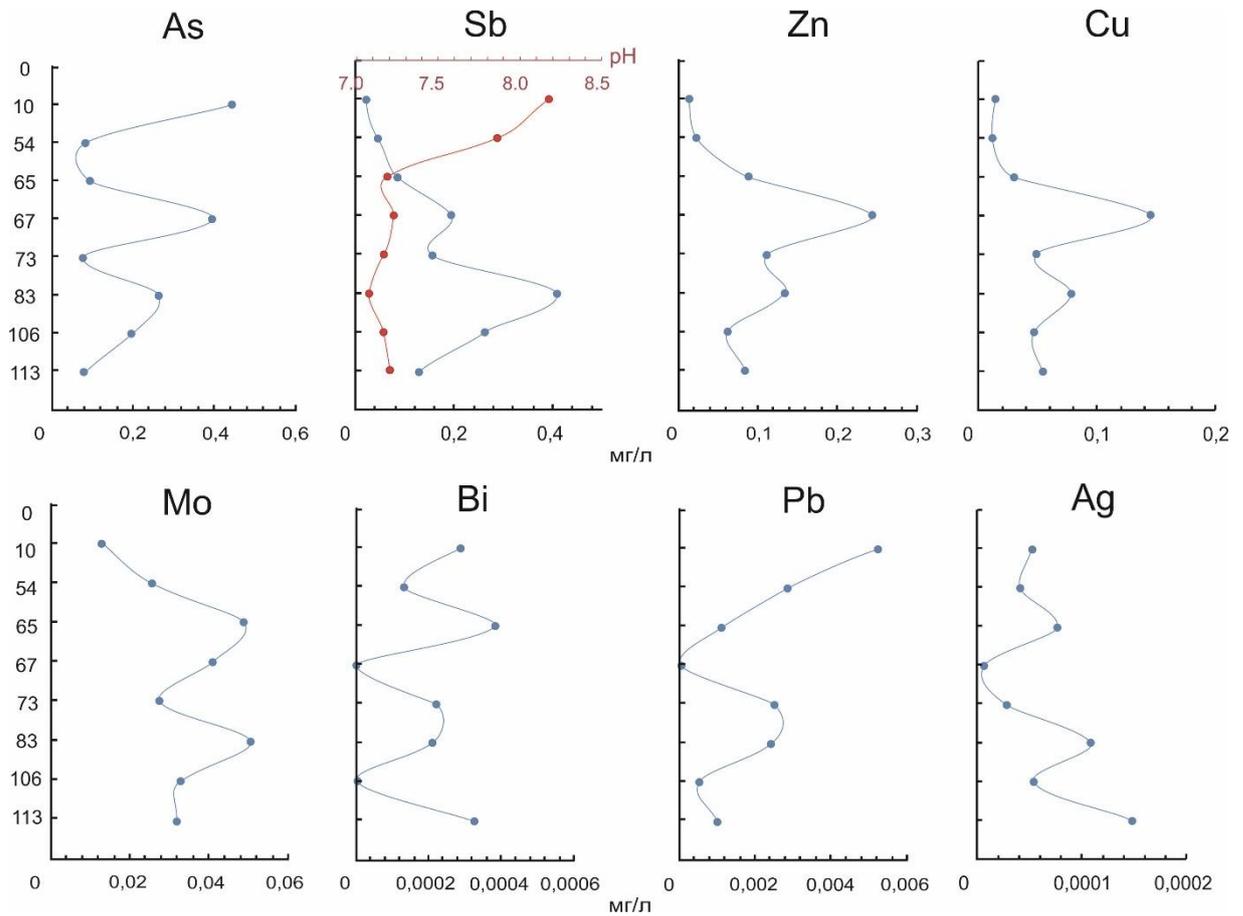


Рисунок 4.28 – Распределение концентраций металлов и металлоидов в поровых водах по глубине шурфа из Дарасунского хвостохранилища

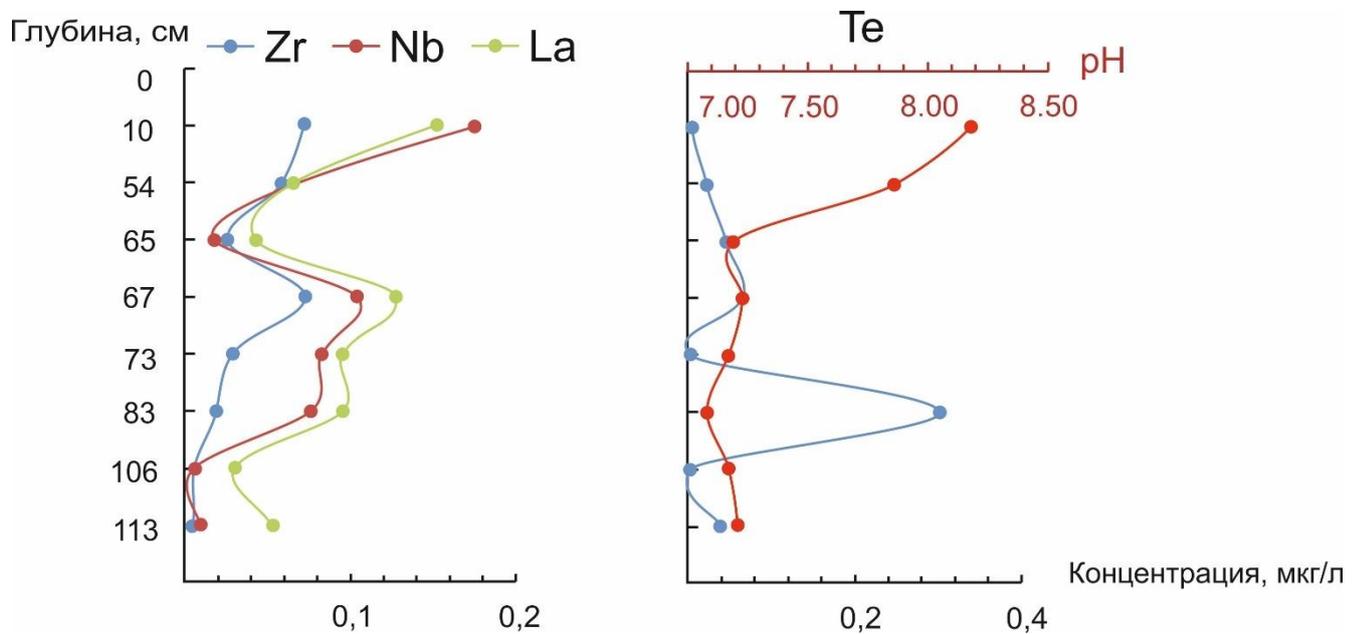


Рисунок 4.29 – Распределение концентраций металлов и металлоидов в поровых водах по глубине шурфа из Дарасунского хвостохранилища

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.

ГЛАВА 5. ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ МИГРАЦИИ ВЕЩЕСТВА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ С ВОДНЫМИ И ГАЗОВЫМИ ПОТОКАМИ

В главе рассмотрена миграция поровых растворов за пределы техногенной системы, выщелачивание металлов по ходу фильтрации, формирование подземных потоков и их попадание в горизонт подземных вод или речные воды. На примере Урских отвалов и Комсомольского хвостохранилища рассмотрена суточная и сезонная динамика концентраций газов в приповерхностном слое воздуха, описано так называемое «дыхание техногенных систем», рассмотрена роль биотического фактора в формировании состава серо-, азот- и углеродсодержащих летучих соединений.

5.1. Дюков Лог

Фильтрация поровых растворов в направлении естественного стока приводит к циклическому выщелачиванию элементов из отходов и выносу их в подземные воды. Длительное время взаимодействие растворов с веществом отходов в поровом пространстве (вследствие низкой скорости подземной фильтрации) ведет к значительному концентрированию растворённых форм металлов в подземных потоках по сравнению с поверхностным стоком. Примером такого варианта развития событий является хвостохранилище Салаирского комбината Дюков Лог.

Геоэлектрическое строение хвостохранилища Дюков Лог демонстрирует четкую вертикальную зональность, указывающую на наличие протяженных низкоомных зон, в некоторых участках распространяющихся на глубину более 8 м. Зоны высокой проводимости (низкие УЭС) сменяются слабопроводящими горизонтами, играющими роль водоупоров (рис. 4.1).

Результаты геохимического анализа вертикальных разрезов до гл. 2 м свидетельствуют о приуроченности зон низкого сопротивления на разрезах к обводнённым горизонтам, поровые воды которых представляют собой

высокоминерализованные растворы. В среднем, мощность хвостовых песков Дюкова лога – 5 м. Следовательно, обводнённые горизонты в приповерхностном пространстве по нарушенным структурам поставляют растворы во вмещающие хранилище породы, иллюстрацией чему служит, например, профиль № 4 (рис. 5.1). Далее растворы, достигая водоупора, стекают естественным образом в направлении наклона борта долины, в которой расположено хвостохранилище.

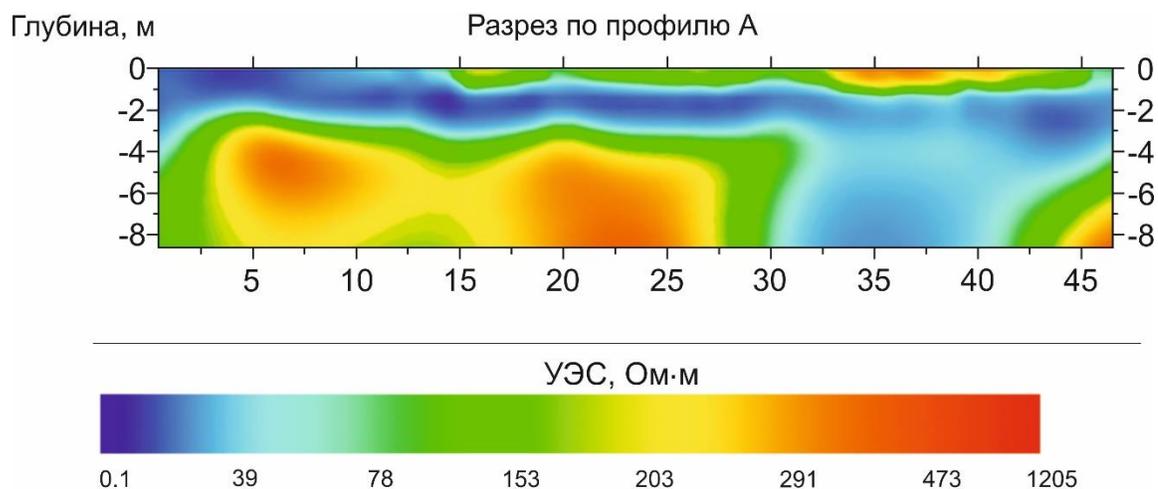


Рисунок 5.1 – Профиль электротомографии в южной части хвостохранилища Дюков лога. Расположение профиля А указано на рис. 3.1., гл. 3

Выщелачивание металлов по ходу фильтрации иллюстрируется гораздо более значительным возрастанием их концентраций в придонном слое воды по сравнению с поверхностным и ещё большим – в поровых растворах (от Северного к Южному водоёму). В поровых водах отстойника, расположенного за пределами хвостохранилища, на природных известняках, Zn и Cd заметно снижают концентрации за счет нейтрализации и осаждения твёрдых фаз (рис. 5.2).

В данном случае идет фильтрация растворов от северной части хвостохранилища в южную и далее в отстойник, расположенный под дамбой для сбора и отстаивания дренажных растворов (рис. 5.2).

Однако, судя по данным электротомографии, в отстойнике нейтрализуется лишь небольшая часть стока из хвостохранилища, попадающая туда, главным

образом, из поверхностного ручья. Основной подземный поток, минуя отстойник, несёт суммарную нагрузку в виде выщелоченных из отходов металлов и затем в виде неявного дренажа попадает в р. М. Талмовая.

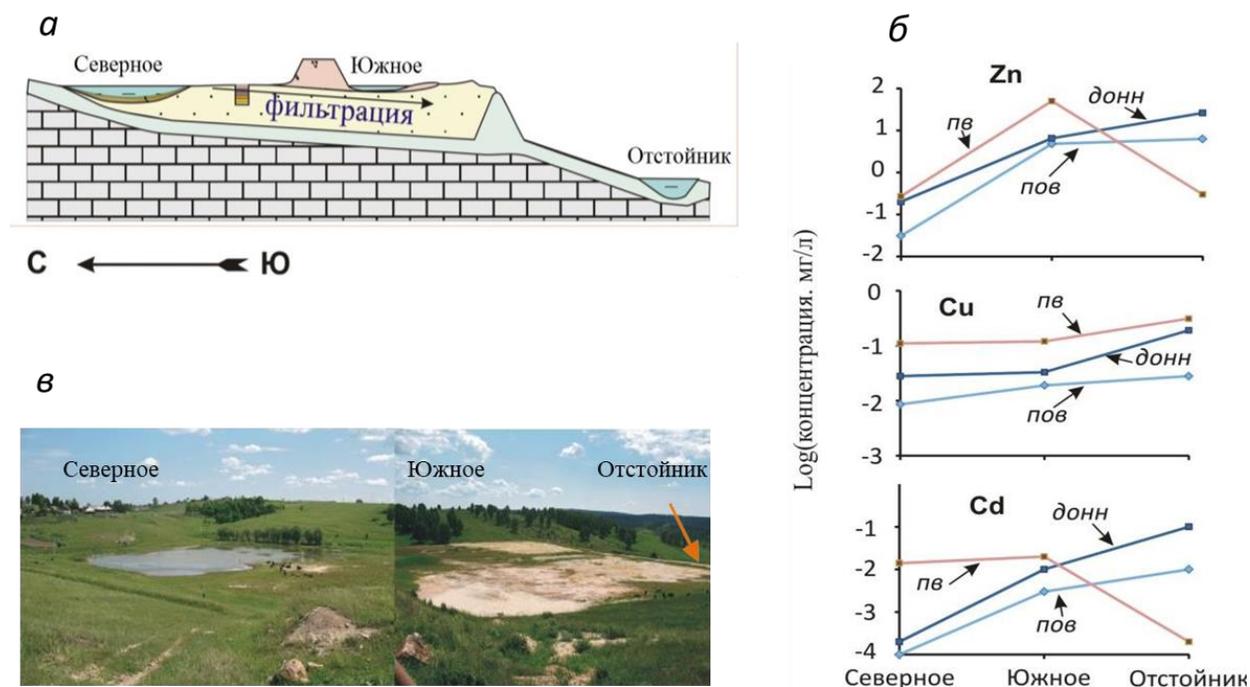


Рисунок 5.2 – Схематический разрез хвостохранилища Дюков Лог (а), изменение концентраций цинка, меди и кадмия в поверхностной воде водоёмов Дюкова лога (пов), их придонном слое (донн) и поровых растворах (пв) (б), фотографии северной и южной частей Дюкова Лога (в)

5.2. Талмовские Пески

5.2.1. Состав подземных вод

Химический анализ проб подземных вод из скважин, расположенных в непосредственной близости от хранилища Талмовские Пески (рис. 2.3, гл. 2.2), подтверждает высокие содержания Cu, Zn, Cd и Pb (табл. 5.1). Концентрации меди находятся в диапазоне от 17 до 230 мкг/л, а концентрации Cd и Pb – от 1.3 до 6700 мкг/л. Концентрации цинка самые высокие по сравнению с другими элементами: до

110 мг/л (проба из скважины 1, табл. 5.1). Важно отметить, что концентрация цинка и кадмия во всех анализируемых образцах выше ПДК химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_в [СанПиН 1.2.3685-21]) на 2-3 порядка. Высока подвижность свинца. Так, например, в пробе из скважины 2 содержание Pb составляет 1300 мкг/л, что выше ПДК_в в 130 раз. Концентрации всех элементов значительно выше среднего содержания в речных водах [Taylor & McLennan, 1985].

Таблица 5.1 – Концентрации элементов в водных пробах из скважин 1-4 (расположение см. рис. 2в), мг/л

Проба	Cu	Zn	Cd	Pb
1	0.12	110	0.57	0.037
2	0.23	25	6.7	1.3
3	0.19	19	0.025	0.028
4	0.17	12	0.016	0.0013
ПДК _в ¹	1.0	5.0	0.0010	0.010
Среднее в речных водах ²	0.0070	0.020	0.000010	0.0010

¹Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [СанПиН 1.2.3685-21]

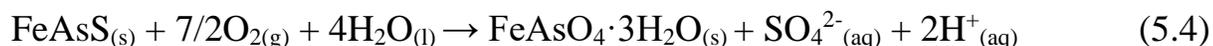
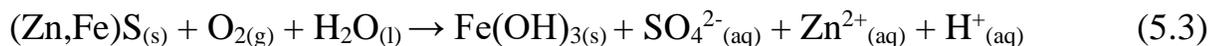
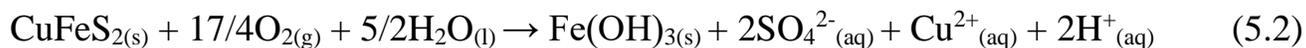
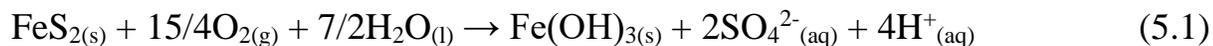
²Согласно [Taylor & McLennan, 1985]

5.2.2. Состав газов в поровом пространстве вещества отходов

Фильтрация поверхностных вод способствует миграции поровых растворов книзу и накоплению растворенных форм элементов в нижних частях разреза [Бортникова, Юркевич и др., 2021]. Температура и концентрации газов закономерно снижаются к нижним горизонтам (рис. 4.6). Наибольшие концентрации газов обнаружены в верхних горизонтах.

Окисление сульфидов, в первую очередь, пирита, ведет к образованию кислоты, выходу металлов в растворы и увеличению минерализации поровых вод (рассмотрены

в разделе 4.2.1) согласно реакциям 5.1-5.4 [Lottermoser, 2010], где обозначениями (s), (g), (l), (aq) обозначены твердая, газообразная, жидкая и растворенная формы вещества, соответственно [Бортникова, Юркевич и др., 2021].



Формирование сероуглерода и диметилсульфида происходит по разным механизмам. Согласно экспериментальным исследованиям [Taylor et al., 1982; Hinkle & Lovell, 2000], сероуглерод (CS_2) и карбонилсульфид (COS) абиогенно генерируются при разложении сульфидных минералов (в основном пирита) в неравновесных условиях. При этом, образование диметилсульфида ($(\text{CH}_3)_2\text{S}$) предположительно может являться результатом жизнедеятельности микроорганизмов, а метилсульфид (CH_3SH) 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_2 следующие взаимодействия в восстановительной обстановке приводят к образованию серосодержащих газов на примере CS_2 и COS (реакции 5.5-5.11) [Бортникова, Юркевич и др., 2021]:



Стоит отметить, что непосредственно механизм данных реакций не до конца раскрыт, и система FeS/FeS_2 (равновесие 5.5) является важным участником абиогенной продукции CS_2 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 5.7-5.11, но и катализатор для этих реакций [Бортникова, Юркевич и др., 2021].

По результатам исследования вещества из всех четырёх шурфов (рис. 3.2б) отмечается возрастание концентраций газов к поверхности, что, по-видимому, объясняется несколькими причинами: 1) происходит закономерное накопление поднимающихся снизу газов; 2) в наиболее прогреваемом слое (20-30 см от поверхности) реакции газообразования идут более интенсивно, в том числе, усиливается бактериальная активность; 3) в поверхностном слое возможно усиление процессов газогенерации под действием УФ-излучения [Du et al., 2017; Бортникова, Юркевич и др., 2021].

5.2.3. Состав аномалий в поверхностных водах

В результате активных взаимодействий в веществе отходов и перехода химических элементов в подвижные формы, а также концентрирования за счет испарения воды, водоёмы, сформированные на поверхности отходов, содержат высокие количества многих компонентов. Вода реки характеризуется существенно более низкими концентрациями элементов по сравнению с водоёмами, но многие из них превышают фоновые значения в 3-8 раз (SO_4^{2-} , Ca, Cr, Mn, Zn, Pb, Sr), а в некоторых точках концентрации элементов превышают предельно допустимые концентрации вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{рх}) [Приказ., 2016]: SO_4^{2-} , Ca, Sr, Cd – в водоёмах; Al, Mn, Fe, Zn, Pb – на всем опробованном интервале реки (табл. 5.2, 5.3) [Бортникова, Юркевич и др., 2021].

При этом, существенной разницы между концентрациями всех рассматриваемых веществ (Mn, Cd, Zn, SO_4^{2-}) в реке до взаимодействия с отходами и

после этого нет. Возможно, это связано с установлением состояния, при котором незначительно поступление в водоток различных соединений из отходов, непосредственно взаимодействующих с водой.

Отметим, что превышение над ПДК_{рх} установлено в воде реки для Al и Cu практически в каждой точке, над фоновыми значениями – только в водоёмах. Но для этих элементов разработанные нормативы ПДК_{рх} ниже, чем фоновые значения: по Al – 0.083 [Колубаева и др., 2010], ПДК_{рх} – 0.04 мг/л [Приказ..., 2016]; по Cu фон 0.0023 [Шварцев и др., 1996], ПДК_{рх} – 0.001 мг/л [Приказ..., 2016]. Поэтому обсуждение аномалий этих элементов здесь не приводится. При этом, существование водоёмов с концентрациями элементов, намного превышающих их фоновые значения и ПДК_{рх} означает возможность поступления этих растворов с сезонными потоками в реку. Состав воды реки не является статичной ситуацией, изменение метеорологических условий может привести к существенному возрастанию концентраций многих токсичных компонентов, которые накапливаются в водоёмах вследствие описанных выше процессов.

Таблица 5.2 – Состав воды реки Малая Талмовая, водоёмов на поверхности хвостохранилища в сравнении с фоновыми концентрациями для рек Западной Сибири, электропроводность УЭП в мкСм/см; HCO_3^- - Cu в мг/л

Эл-ты	Вода р. М. Талмовая				Водоёмы на хвостохранилище			Фон для рек Западной Сибири		ПДК _{рх} [Приказ.. , 2016]
	мин	макс	среднее	ст.откл	МТ-3/20	МТ-5/20	МТ-5'/20	(Колубаева и др.,2010)	(Шварцев и др., 1996)	
pH	7.2	8.5	8.0	0.40	3.5	7.3	7.1	7.6	7.6	
УЭП	180	290	210	34	3800	1200	920	нд	нд	
HCO_3^-	210	260	240	13	н.о.	250	190	360	130	
SO_4^{2-}	54	60	57	1.9	2600	990	700	3.6	15	100
Cl^-	5.1	6.0	5.3	0.27	1.6	2.0	2.8	3.3	6.3	300
Ca^{2+}	84	95	88	4.0	460	500	310	89	32	180
Mg^{2+}	8.9	9.7	9.2	0.28	200	55	36	14	6.9	40
Na^+	8.7	9.8	9.2	0.36	8.3	14	12	11	10	120
K^+	1.1	1.7	1.3	0.18	5.6	1.9	2.8	1.4	1.6	50
Si	3.4	3.7	3.5	0.11	32	4.4	2.3	4.8	2.5	нд
Fe	0.20	0.3	0.24	0.03	800	1.3	0.85	5.3	1.0	0.1
Mn	0.07	0.16	0.12	0.029	78	30	15	нд	0.019	0.05
Al	0.014	0.25	0.085	0.081	67	0.13	0.23	0.083	нд	0.04
Ba	0.056	0.064	0.06	0.0023	0.005	0.011	0.014	0.036	0.047	0.74
Sr	0.30	0.32	0.31	0.006	0.33	0.63	0.50	0.15	0.19	0.4
Zn	0.12	0.19	0.15	0.021	1200	21	64	0.012	0.030	0.01
Cu	0.0046	0.0072	0.0054	0.0007	41	0.075	0.12	0.0008	0.0023	0.001

Примечание: нд – нет данных

Таблица 5.3 – Концентрации микроэлементов (мкг/л) в водах реки Малая Талмовая, водоёмах на поверхности хвостохранилища в сравнении с фоновыми концентрациями для рек Западной Сибири и ПДК_{рх}

Эл-ты	Вода р. М. Талмовая				Водоёмы на хвостохранилище			Фон для рек Западной Сибири		ПДК _{рх} [Приказ.. , 2016]
	мин	макс	среднее	ст.откл	МТ-3/20	МТ-5/20	МТ-5'/20	(Колубаева и др.,2010)	(Шварцев и др., 1996)	
Pb	4.1	6.4	5.4	0.72	290	110	44	0.7	0.8	6.0
Cd	0.42	0.60	0.54	0.061	2300	60	200	0.12	0.24	5.0
Cr	6.3	13	11	2.3	60	14	15	5.1	2.8	70
Co	0.38	0.49	0.44	0.039	340	44	24	0.32	0.60	10
Ni	0.63	1.1	0.92	0.14	830	30	51	1.4	1.0	10
As	1.9	2.2	2.1	0.14	32	0.8	0.9	0.16	нд	50
Sb	0.50	0.65	0.57	0.053	0.34	0.59	1.0	0.07	0.4	нд
Se	0.17	0.70	0.43	0.21	34	1.8	4.2	нд	нд	2.0
Mo	0.67	1.1	0.77	0.14	0.93	0.30	0.52	нд	нд	1.0
V	0.38	0.52	0.44	0.045	6.3	0.030	0.037	нд	нд	1.0
U	1.1	1.2	1.2	0.032	120	1.8	0.78	0.67	0.51	нд

Примечание: нд – нет данных

5.3. Урские отвалы

5.3.1. Подземный дренаж

Для системы дренажных стоков Урского отвала выявленная вертикальная миграция растворов по природным разломам была подтверждена обнаружением в подземных водах маркирующих загрязняющих элементов: As, Zn, Cd, Be и др. (рис. 5.3).

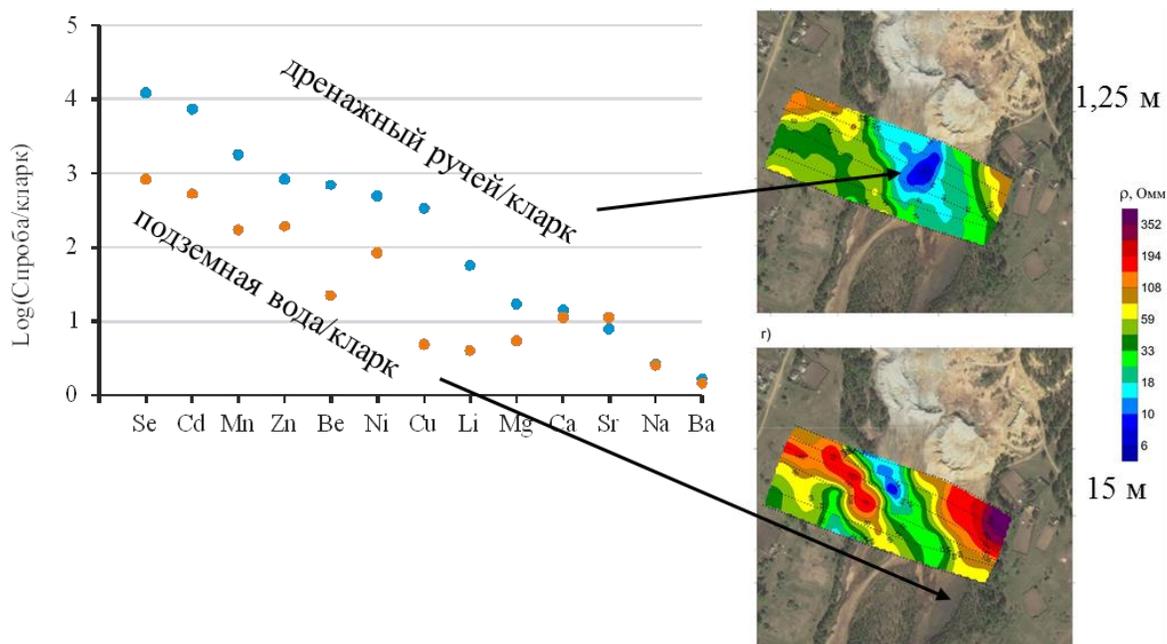


Рисунок 5.3 – Распространение поверхностного (карта УЭС гл. 1.25 м) и подземного (карта УЭМ 15 м) стока дренажа на Урском отвале (правые рисунки) и индикаторные элементы-загрязнители (график слева)

Наличие естественных геологических разломов в зонах распространения дренажных потоков приводит к миграции высокоминерализованных растворов в глубокие подземные горизонты. Примером служит дренажная система Урского отвала. Зональность профилей электротомографии дренажной системы Урского отвала даёт основание определить два направления подземной миграции растворов, причём не совпадающих с направлением поверхностного стока.

5.3.2. Механизмы гипергенных преобразований твёрдого вещества, дренажный сток, гео- и гидрохимические аномалии

Сопротивление среды в исследуемой области варьирует от 1 до 650 Ом·м. Аномалия низкого сопротивления отмечена в центральной части площадки (между барит-пиритовым и кварц-баритовым отвалами), а также у подножия отвалов с глубины 1 м (рис. 5.4а) до 15.5 м (рис. 5.4в). Проводящие зоны связаны как с обводнённостью вследствие просачивания атмосферных вод, растекания дренажных вод в понижении рельефа, так и с механическим сносом техногенного вещества. Кроме того, вероятно растекание грунтовых вод, подпитывающих озеро на северо-востоке от объекта, в направлении с севера на юго-восток (отмечается на глубинах до 15.5 м). Проводящая зона глубиной до 20 м на юго-западе от отвалов совпадает с трещиной, сформированной за счёт размыва дренажными водами. Инфильтрация дренажных вод в разломную зону в юго-восточном направлении от отвала была описана ранее в работе [Olenchenko et al., 2016] и подтвердилась в рамках этого исследования [Yurkevich et al., 2022].

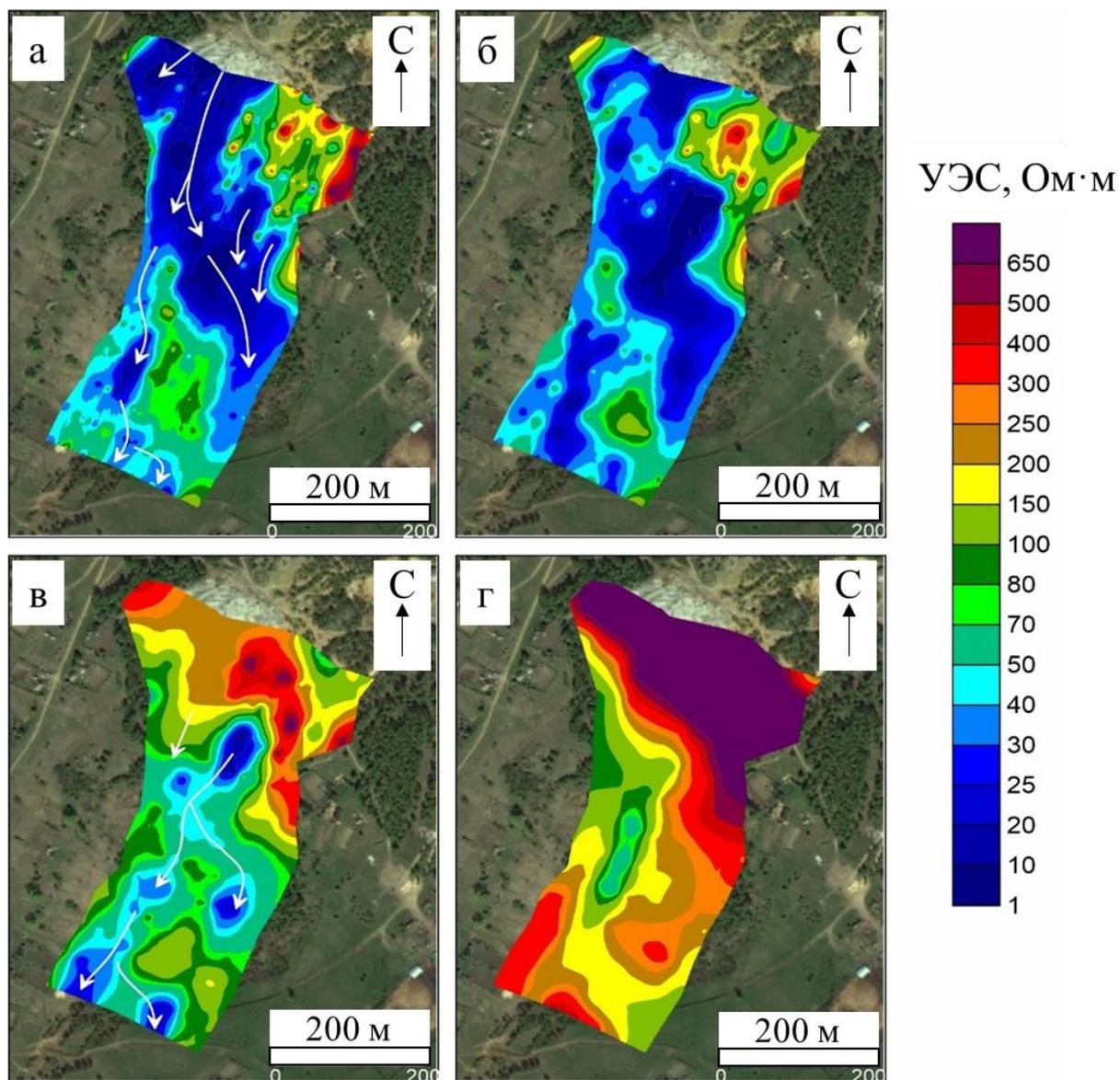


Рисунок 5.4 – Карты распределения удельного электрического сопротивления среды в исследуемой области на глубине 1 (а), 8.5 (б), 15.5 (в) и 30.5 м (г). Белые стрелки означают направления поверхностного дренажа

Цвет отложений (светлый в северной части и темный в южной части, рис. 2.4, гл. 2.3) связан с концентрацией в их составе ферромагнетиков и, следовательно, с их повышенной (в северной части) и пониженной (в южной части) магнитной восприимчивостью (рис. 5.5).

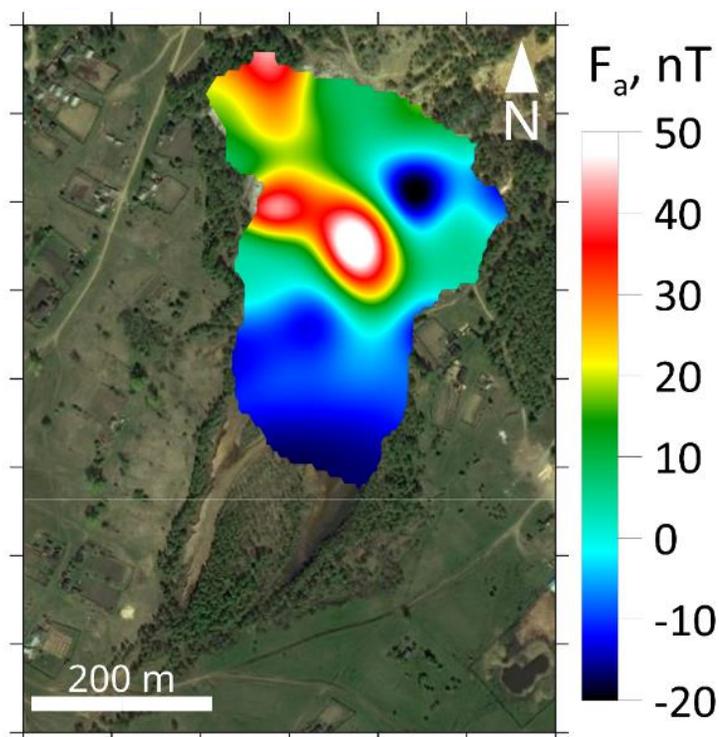


Рисунок 5.5 – Аномалии модуля вектора магнитной индукции в исследуемой области

Цифровая модель рельефа позволяет проследить отдельные особенности рельефа – водотоки, насыпи. Основной водосбор происходит в северо-западной части участка с образованием водотоков, впадающих в ручей в южной части. Основная насыпь подвергается интенсивному размыву на юго-западном склоне, здесь образуются эрозионные овраги. Материал с этого склона попадает в русло центрального водотока и частично образует делювиальный шлейф к югу от насыпи, вероятно, препятствуя стоку обтекающего насыпь водотока с востока, что приводит к заболачиванию юго-восточной части (рис. 5.6).

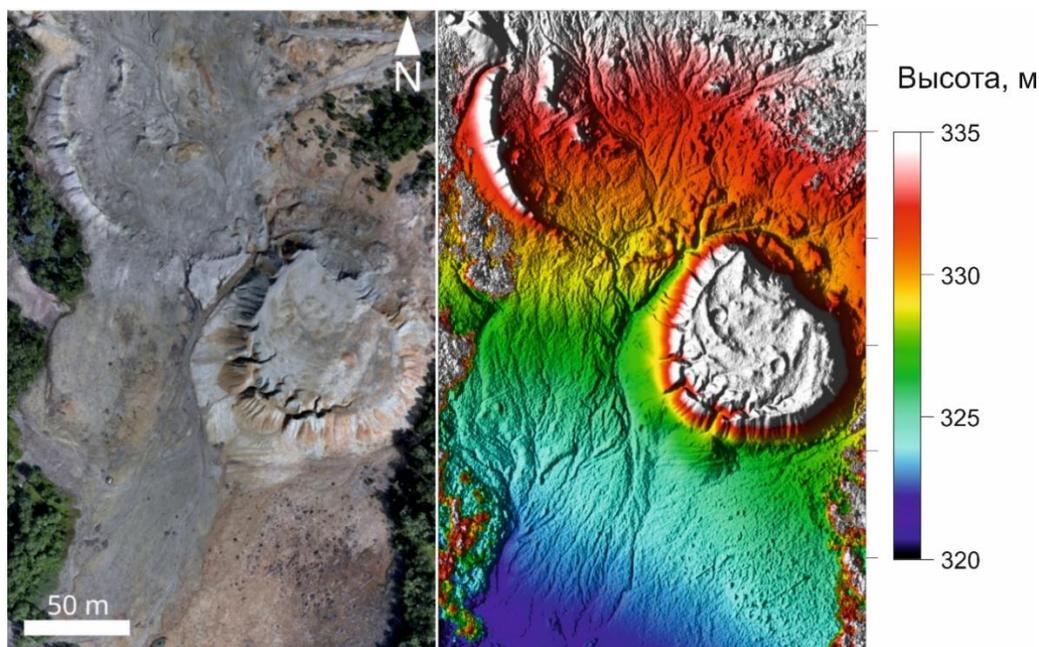


Рисунок 5.6 – Фрагмент ортофотоплана и цифровая модель рельефа

Термометрическая модель (рис. 5.7) демонстрирует ряд температурных аномалий:

1. Ручей, огибающий насыпь, с температурой около $+12+13$ °С. Источник водотока – подземный, а его кислая реакция среды (рН 2) обусловлена реакциями взаимодействия воды в ручье с веществом кварц-баритового отвала по ходу его течения (см. небольшие светлые области вдоль ручья, рис. 5.7).

2. Прогретые солнцем западные склоны насыпи ($+23+24$ °С).

3. Повышенная температура в верхней части склона насыпи ($+20+24$ °С) и пониженная в нижней ($+17+22$ °С) – предположительно, следствие экзотермических реакций, т.к. в верхней части осыпь “свежая”, в нижней же сложен материал, осыпавшийся ранее, в котором реакции уже прекратились.

4. Прогрев в зоне фильтрации, причиной которого являются экзотермические реакции в насыпи, откуда поступают прогретые растворы. Отметим, что таким же прогревом (белые области на рис. 5.7) отмечены промоины на теле отвала, по которым распространяются поверхностные сезонные потоки дождевой и снеготалой воды.

5. Участки пониженных температур в северной части снимка связаны преимущественно с затененными местами.

Таким образом, зона фильтрации, отмеченная низкими удельными электрическими сопротивлениями, низкими значениями модуля вектора магнитной индукции и прогревом на $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению со складированным кварц-баритовым веществом, не подвергающимся активному взаимодействию с водой. Автор полагает, что в зоне фильтрации активно протекают процессы взаимодействия «вода-порода», сопровождающиеся окислением остатков сульфидных минералов и растворением сульфатных соединений с выделением тепла. Отметим, что по данным газоаналитических исследований показано, что в данной зоне происходит активное газовыделение, в том числе газов биотического происхождения ($\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$) за счет метилирования сульфидсодержащих соединений бактериями *Bacillus Mycooides* (п. 5.3.3). Интересно, что в этой зоне обнаружен локальный разогрев грунта под шапкой снега до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ при исследованиях отвала в феврале при температуре окружающей среды $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Именно в этой зоне в зимнее время мы наблюдали максимум эманаций $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$ по сравнению с бесснежными участками отвала [Yurkevich et al., 2019; Юркевич и др., 2019].

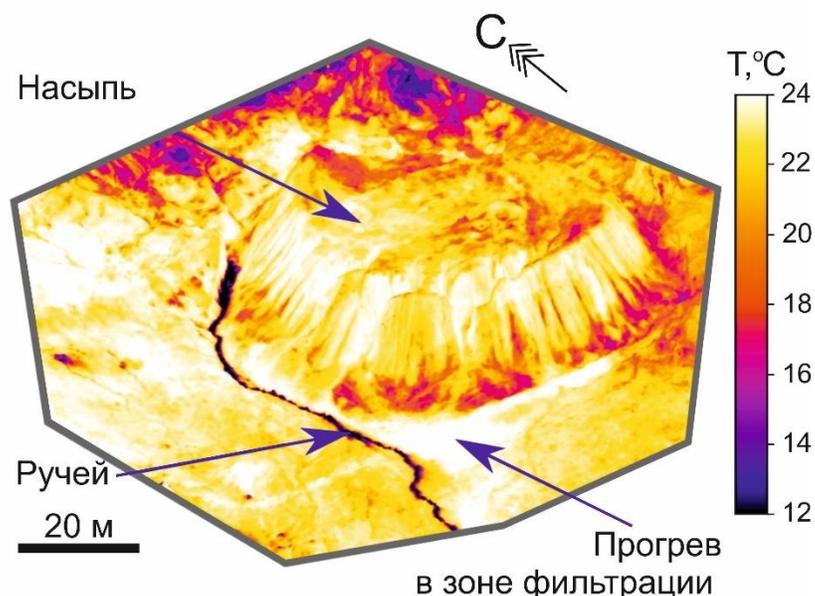


Рисунок 5.7 – Цифровая модель температуры поверхности Урского отвала (рисунок выполнен Цибизовым Л.В.)

Интеграция 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, рис. 5.8). В зоне (II) (рис. 5.8), кислый дренажный поток разрушает корневые системы деревьев, растворяет минеральные комплексы почвы, вымывает и выносит с водным потоком породообразующие элементы. В зоне III (рис. 5.8) 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.

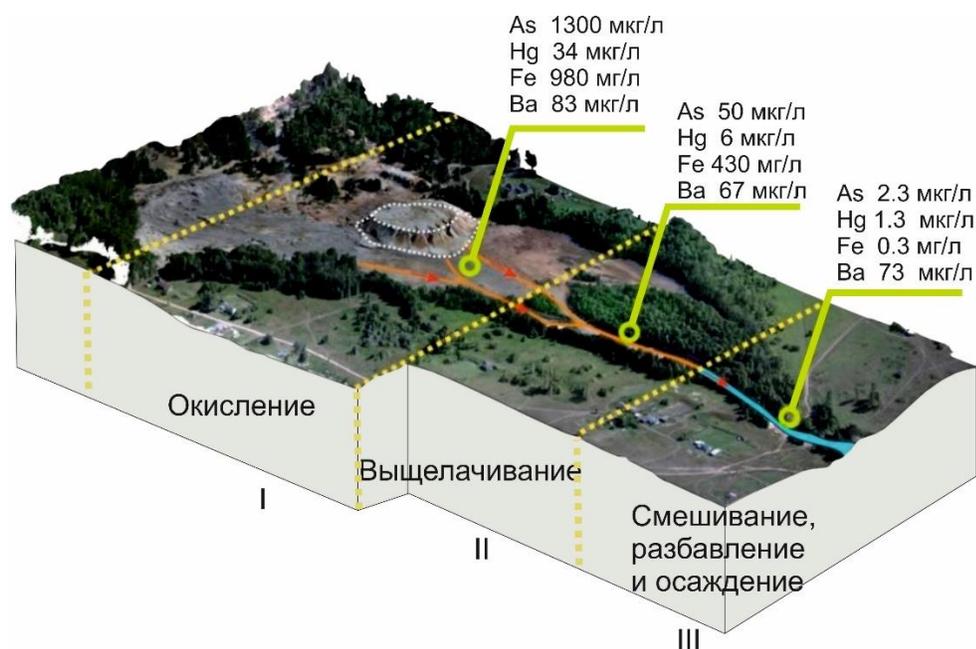
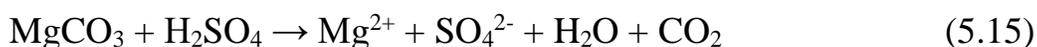
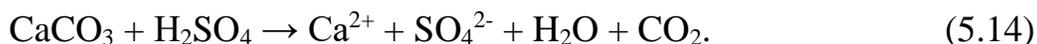
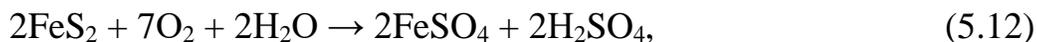


Рисунок 5.8 – Принципиальная схема строения Урской дренажной системы: распределение зон окисления, выщелачивания и смешения

Грунты в зоне окисления до глубины 5 м имеют значения УЭС до 10 Ом·м, характеризуются низкими значениями модуля вектора магнитной индукции и нагревом на +5 °С по сравнению с твердым веществом в отвале, не подвергающимся активному воздействию воды. Мы полагаем, что в этой зоне активно протекают

процессы взаимодействия вода-порода, сопровождающиеся окислением сульфидных минеральных остатков и растворением сульфатных соединений с выделением тепла.

Высокие концентрации Fe в дренажном растворе обусловлены его выщелачиванием из сульфидных минералов (пирита и пирротина) в зоне гипергенеза (реакции 5.12-5.15) [Смирнов, 1955; Kelly et al., 1988; Плюснин, Гунин, 1997]:



Несмотря на окислительные условия ($E_h +600$ мВ), низкие значения pH (3.61) (табл. 5.4) способствуют образованию соединений Fe^{2+} [Gogoi et al., 2018], характеризующихся высокой растворимостью и подвижностью. Сульфатный класс дренажных вод и Ca-Mg тип минерализации связаны с окислением сульфидов в хвостах, растворением кальцита и доломита и выщелачиванием Ca и Mg.

Растворение халькопирита, сфалерита, галенита и арсенопирита приводит к чрезвычайно высоким концентрациям Cu (3000 мкг/л), Pb (1200 мкг/л), As (1300 мкг/л) и Hg (34 мкг/л) в Урском дренаже, значительно превышающим кларки и предельно допустимые концентрации (табл. 5.5). Особенностью дренажа с Урских отвалов является концентрация Be (3.5 мкг/л), существенно превышающая предельно-допустимую концентрацию в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДКв) (0.2 мкг/л, СанПин 1.2.3685-21), что указывает на опасность этого потока для окружающей среды.

Резкое снижение электропроводности дренажного потока и концентраций химических элементов на расстоянии 200 м от отвала в первую очередь связаны с сорбцией на природных сорбентах, через которые протекает дренажный поток. Например, достаточно эффективна сорбция ионов двухвалентных металлов и мышьяка на торфе [Gogoi et al., 2018; Yurak et al., 2021]. Однако из-за поступления

кислого потока с высоким содержанием растворенных металлов (точка 5'/20, табл. 5.4, 5.5) в тот же дренажный ручей через 90 м электропроводность увеличивается до исходного уровня.

Таким образом, в пределах первых 400 м формируется зона первичного геохимического барьера, на котором за счет сорбции на почвах осаждается основная часть химических элементов. Однако из-за вторичного загрязнения через 400 м вновь образуется кислый поток. И только на расстоянии 1000 м, в месте впадения в реку Ур, происходит разбавление, образующее второй геохимический барьер за счет изменения физико-химических условий среды: значения рН повышаются до 7.81, а значения Eh снижаются до 300 мВ. Главной особенностью вод зоны смешения является низкое содержание Fe и Al в первую очередь за счет осаждения гидроксидных комплексов Fe^{3+} и Al^{3+} $Fe(OH)_{3(T)}$ и $Al_2O_3(H_2O)_{(T)}$ [Brookins et al., 2012].

В зоне смешения формируется железоалюминиевый сорбционный геохимический барьер, способствующий соосаждению других химических элементов на поверхности гидроксидных минералов. Концентрации Cu, Pb и Co уменьшаются на три-четыре порядка, Mn, Cd и Zn – на два порядка, Ni, Be, As и Sb – на один порядок, а Hg – в 4.5 раза по сравнению с концентрацией в растворах дренажной долины (табл. 5.5). Интересно, что концентрация бария в зоне смешения (73 мкг/л) выше, чем в дренажной долине (67 мкг/л). Концентрация бария в реке выше, чем таковая в дренажном стоке и составляет 60 мкг/л, что в три раза выше средней кларковой концентрации (Taylor & McLennan, 1985). Предположительно, водная аномалия Ba отражает региональную особенность поверхностных водотоков данного района и обусловлена составом барит-полиметаллических руд в зоне разломов, по которым протекает р. Ур. Аналогично высокие концентрации Hg (0.6 мкг/л), превышающие уровень ПДК РФ химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (0.5 мкг/л [СанПиН 1.2.3685-21]) (табл. 5.5), могут отражать особенность Урского рудного района.

Таблица 5.4 – Электропроводность (УЭП), рН, концентрации сульфат-ионов и основных катионов в пробах из поверхностных водотоков в районе Урских отвалов. Номера проб указаны на рис. 3.3 б, д.

Проба	Расстояние, м	УЭП, мСм/см	рН	SO ₄ ²⁻ , мг/л	мг/л					
					Na	Mg	Al	K	Ca	Fe
1/20	0	16000	3.61	4500	24	140	350	1.4	230	970
2/20	50	1200	3.82	1500	19	35	20	0.94	100	12
3/20	200	2500	3.55	1100	23	49	43	0.43	81	420
4/20	310	3900	3.62	2300	22	90	220	0.67	120	530
5/20	410	3980	3.48	3200	22	90	220	0.67	110	560
6/20	500	3130	3.55	2100	31	84	150	1.4	140	370
7/20	600	3100	3.71	2000	32	84	150	1.6	140	360
8/20	650	3130	3.68	1800	23	84	150	0.54	120	380
9/20	720	3260	3.49	2500	20	70	160	0.77	120	380
10/20	780	430	7.62	22	6.8	13	0.06	0.95	46	0.03
11/20	940	450	7.81	21	7.7	14	0.09	1.06	49	0.05
15/20	1400	340	7.81	49	7.7	13	0.22	1.66	79	0.64
18/20	1900	460	7.85	40	6.7	13	0.10	0.93	49	0.47
21/20	2500	450	7.58	32	6.9	13	0.08	1.0	50	0.30
35/20	5900	460	7.45	35	7.6	13	0.01	1.4	53	0.78
36/20	6200	370	8.27	29	6.4	11	0.03	1.5	84	0.15
38/20	6500	350	7.59	27	5.6	12	0.01	0.65	35	0.10
38-1/20	6800	250	7.95	20	5.0	12	0.02	0.43	27	0.33
39/20	7700	280	7.87	17	6.2	9.4	0.01	1.1	50	0.02
мин	235	252	3.4	17	5.0	9.4	0.01	0.43	27	0.02
макс	320	16000	8.3	4500	9.7	14	0.22	1.7	86	0.78
среднее	281	1869	6.0	900	6.9	12	0.06	1.2	62	0.21
Кларк ¹					6.3	4.1	0.05	2.3	15	40

Примечание: ¹Кларк – средняя концентрация в водах гидросферы [Taylor & McLennan, 1985].

Таблица 5.5 – Микроэлементный состав поверхностных вод в дренаже у подножия отвала, в водосборной долине, выше по течению реки и ниже дренажного притока

Проба	Высота, м	Расстояние, м	мг/л		мкг/л									
			Mn	Zn	Cu	Cd	Pb	Ba	Ni	Co	Be	As	Sb	Hg
0/20	316	0	19	14	3000	9.1	1200	83	290	260	3.5	1300	9.2	34
2/20	320	50	2.5	0.83	190	1.5	150	59	33	24	0.50	110	2.0	6.0
3/20	324	200	5.7	1.8	580	3.0	240	14	62	47	2.1	48	0.10	6.0
4/20	311	310	17	13	1700	18	250	100	100	150	4.5	83	2.0	6.0
5/20	304	410	17	13	1700	18	210	78	100	150	3.8	82	2.0	6.0
6/20	304	500	14	9.8	1300	15	170	13	90	120	3.2	28	0.10	6.0
7/20	298	600	14	11	1300	14	140	110	88	120	4.0	19	0.10	6.0
8/20	294	650	14	11	1400	12	170	24	95	130	3.6	22	0.10	6.0
9/20	294	750	14	9.2	1200	13	140	140	91	130	3.4	24	2.0	6.0
15/20	256	1400	0.60	0.04	8.4	0.30	2.1	55	3.9	2.4	0.10	2.5	0.20	2.0
18/20	283	1900	0.03	0.01	3.3	0.30	0.19	72	1.5	0.40	0.10	1.3	0.10	0.60
21/20	282	2500	0.01	0.01	3.5	0.30	0.35	73	1.3	0.40	0.10	1.6	0.10	0.60
23/20	260	2900	0.05	0.01	2.8	0.30	0.74	91	2.3	0.40	0.10	3.9	0.20	2.0
27/20	251	3800	0.21	0.01	3.6	0.30	0.85	94	2.0	0.40	0.10	2.9	0.20	1.6
31/20	244	4900	0.06	0.01	3.3	0.30	0.68	91	1.7	0.40	0.10	3.3	0.20	2.0
32/20	242	5200	0.06	0.01	3.1	0.30	0.75	92	1.8	0.40	0.10	3.2	0.20	1.3
33/20	241	5400	0.05	0.01	3.2	0.30	0.42	92	2.0	0.40	0.10	2.9	0.20	1.7
35/20	275	5900	0.004	0.01	2.0	0.30	0.20	90	0.8	0.40	0.10	1.3	0.10	0.60
36/20	235	6200	0.06	0.01	2.9	0.30	0.35	88	1.5	0.40	0.10	2.5	0.20	2.0
38/20	267	6500	0.002	0.01	2.0	0.30	0.20	63	1.0	0.40	0.10	2.2	0.10	0.60
38-1/20	273	6800	0.001	0.01	2.0	0.30	0.31	48	1.0	0.40	0.10	1.6	0.10	0.60
39/20	236	7700	0.02	0.01	2.7	0.30	0.70	46	1.1	0.40	0.10	3.3	0.20	1.8
10/20	294	780	0.02	0.01	2.0	0.30	0.20	60	1.0	0.40	0.10	1.9	0.10	0.60
10~/20	294	820	0.003	0.01	2.0	0.30	0.20	60	1.4	0.40	0.10	2.4	0.10	0.60
10~/20	266	870	0.15	0.01	3.3	0.30	2.5	54	2.4	0.46	0.10	4.3	0.20	2.2

Продолжение таблицы 5.5

Проба	Высота, м	Расстояние, м	мг/л		мкг/л									
			Mn	Zn	Cu	Cd	Pb	Ba	Ni	Co	Be	As	Sb	Hg
11/20	280	940	0.01	0.01	2.0	0.30	0.20	61	1.1	0.40	0.10	1.7	0.10	0.60
ПДК ВОЗ ¹	-	-	0.40	3.0	2000	3.0	10	700	70	n.d.	12	10	20	6.0
ПДК РФ ²	-	-	0.10	5.0	1000	1.0	10	700	20	100	0.20	10	5.0	0.50

¹ПДК ВОЗ – максимально допустимые концентрации элементов в воде по данным всемирной организации здравоохранения [WHO, 2008].

²ПДК РФ – предельно допустимые концентрации (ПДК_в) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [СанПиН 1.2.3685-21].

Концентрация Mn снижается более чем на 50 % по сравнению с зоной смешения (с 0.17 мкг/л до 0.08 мкг/л) в нижнем течении реки и на расстоянии 5-7 км от хвостохранилища. Концентрации Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Co, As, Sb, Be, Hg находятся на одном уровне. Стоит отметить, что концентрация Hg в воде р. Ур после впадения в неё дренажа составляет 1.6 мкг/л, что более чем в 3 раза выше, чем в верхнем течении реки и ПДК химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [СанПиН 1.2.3685-21]. Предполагается, что источником ртутного загрязнения вод р. Ур является вынос этого элемента дренажными стоками.

Таким образом, показано, что заброшенные отвалы, образовавшийся стихийно 90 лет назад, и по сей день являются источниками кислого дренажа с токсичными примесями (As, Hg). Активно идут реакции окисления сульфидных материалов, механический снос с поверхности отвалов, дренаж проникает на глубину до 15 м, продолжается разрушение корневой системы деревьев. Компоненты природной среды (почвы и речные воды) образуют естественные геохимические барьеры, на которых отлагаются химические элементы и нейтрализуются кислоты. Тем не менее концентрации всех элементов в водохранилище, в которое впадает р. Ур, на расстоянии 8 км от хвостохранилища, находятся на том же уровне, что и в зоне смешения. Стоит отметить, что хорошо известна проблема вторичного загрязнения, когда на первом этапе материал отвалов механически сносится по рельефу вниз в речную сеть и переосаждается в донные отложения, а на втором этапе при изменении физико-химических условий среды (снижении рН или повышении Eh) элементы вымываются из донных отложений и вновь попадают в речную воду [Linnik, Zubenko, 2000].

5.3.3. Механизмы образования летучих серо-, селен- и углеродсодержащих соединений. Сезонные и суточные колебания УЭС, температуры и газов

Газовые аномалии по данным полевых исследований

При первичном обследовании Урских отвалов летом 2018 г. при помощи портативного газоанализатора ГАНК-4 в приземном слое воздуха были обнаружены диметилсульфид (ДМС), диметилсульфоксид (ДМСО), диоксид серы (SO_2) и сероуглерод (CS_2) во всех точках профилей (рис. 5.9). Впервые эти газы были зарегистрированы нами в воздухе над Комсомольским хвостохранилищем (Bortnikova et al., 2018), с чего и начались исследования механизмов образования летучих серо- и углеродсодержащих соединений при трансформациях сульфидсодержащих отходов. Исследования летучих органосульфидов в мировой практике начались в 1970-х гг. Широкое распространение получили работы, связанные с диметилсульфидом (ДМС, $\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$), поскольку он является существенным компонентом потока соединений серы в атмосферу [Bates et al., 1992; Brimblecombe et al., 2013; Gourdal et al., 2018], играет глобально значимую роль в цикле углерода и серы и воздействует на климат Земли [Koch & Dahl, 2018].

Продукция ДМС свидетельствует о метилировании сульфидсодержащих соединений микроорганизмами *Pseudomonas sp. and Bacillus sp.* [Юркевич и др., 2019; Yurkevich et al., 2019]. Диметилсульфоксид (ДМСО, $\text{C}_2\text{H}_6\text{SO}$) является продуктом окисления диметилсульфида. Интересным фактом является то, что он вовлечен в осмо- и крио- защиту и механизмы антиоксидантной защиты [Gourdal et al., 2018], поэтому его обнаружение в зимнее время может быть связано с вовлечением в процессы криозащиты микроорганизмов. Дисульфид углерода (CS_2) – метастабильный продукт окисления сульфидных минералов [Hale et al., 2010], один из наименее растворимых серных газов, и может служить индикатором обнаружения сульфидных месторождений.

Наиболее высокие концентрации всех газов отмечены в точках профиля Пр2, пересекающего кварц-баритовый отвал вместе с конусом выноса осыпей вниз

в долину. Концентрация SO_2 значительно превышает концентрацию измеряемых газов: его содержание колеблется от 140 до 3600 мкг/м^3 , в пяти точках профиля превышает ПДК для загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [ГН 2.1.6.1338-03]. На этом же профиле обнаружено наиболее контрастное распределение газов. Максимальные концентрации газов приурочены к точке № 5, расположенной у подножия отвала, затем по профилю они уменьшаются, но остаются выше, чем в точках на отвале.

По профилю барит-пиритового отвала (точки 14-20, рис. 5.9) наблюдается обратная тенденция. Содержание диоксида серы, относительно высокое над вершиной отвала (160-330 мкг/м^3), резко снижается в его предгорьях и долине (23-73 мкг/м^3). Такая же, но менее контрастная тенденция наблюдается и для других газов. Кроме того, по данным ГХ-МС в точках на профиле пирита обнаружен диметилселенид $\text{C}_2\text{H}_6\text{Se}$. В целом между концентрациями газов установлена высокая положительная корреляция (табл. 5.6), что может быть следствием сходного механизма их образования при взаимодействии биотических и неорганических компонентов.

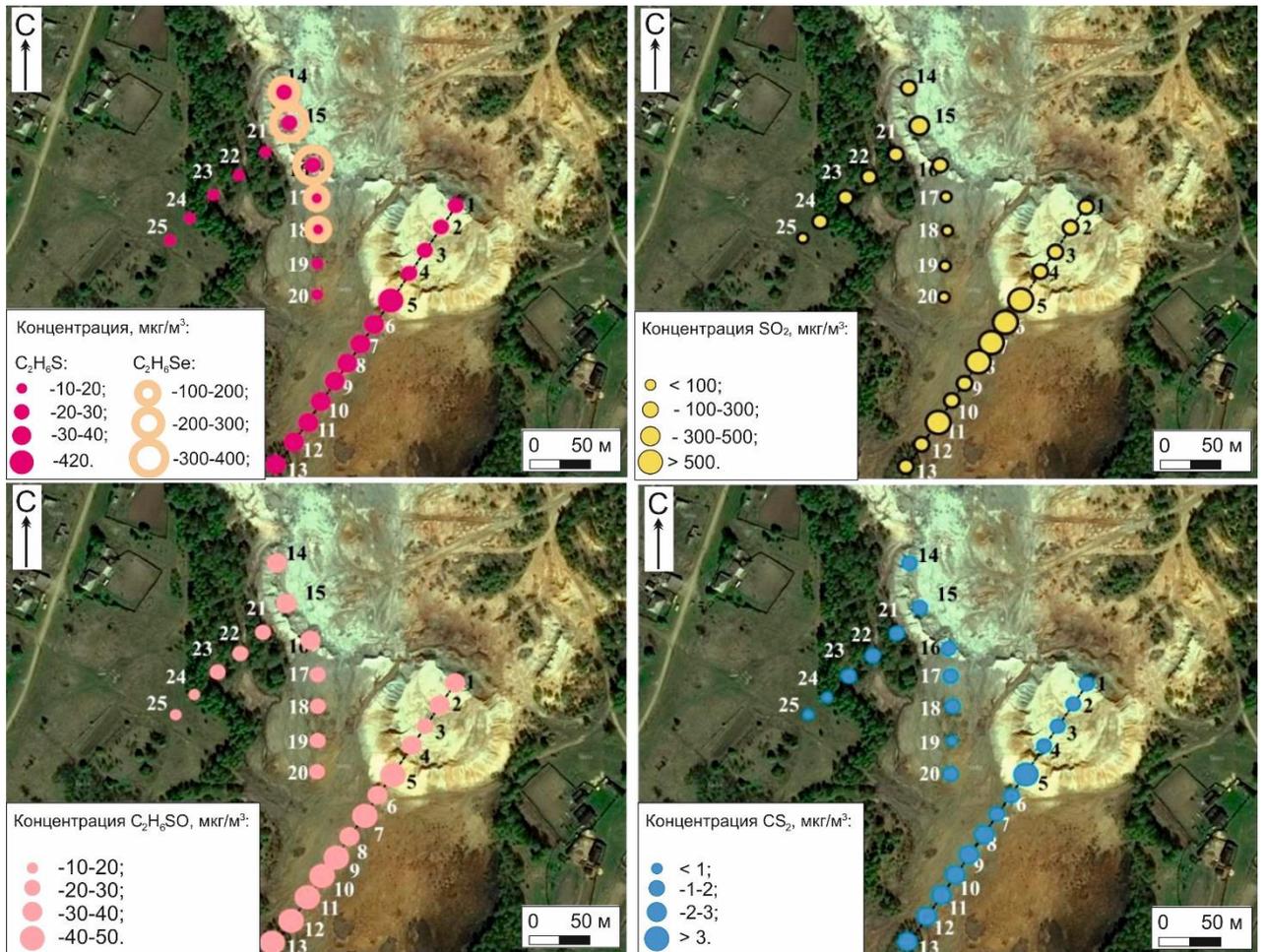


Рисунок 5.9 – Концентрации диметилсульфида, диметилселенида, диоксида серы, диметилсульфоксида и сероуглерода в приповерхностном слое воздуха.

Отметим, что в большинстве точек концентрация ДМСО и диоксида серы превышает концентрацию ДМС и сероуглерода. Это свидетельствует о большей интенсивности окислительных реакций, чем восстановительных.

Таблица 5.6 – Коэффициенты корреляции концентраций ДМС, ДМСО, CS_2 , SO_2

	ДМС	ДМСО	CS_2
C_2H_6SO	0.61		
CS_2	0.73	0.72	
SO_2	0.83	0.66	0.72

Геоэлектрическая зональность

Кварц-баритовый отвал. Летние и весенние наблюдения

Тело отвала сложено неоднородным материалом, что отражается на колебаниях удельного электрического сопротивления в широком диапазоне – от 1 до 350 Ом·м. Области пониженного сопротивления локализованы на глубинах 2.5-7 м от поверхности на пикетах 10-20, 35-50 и 55-60 м по профилю (рис. 5.10).

Поверхность отвала на глубину до 1 м в начальных отметках профиля и до глубины 6 м на пикетах 30 и 60 м сложена рыхлыми сухими породами сопротивлением 30-150 Ом·м. Характер расположения контрастных по сопротивлению сред свидетельствует об инфильтрации кислого дренажа с поверхности в отвал с окислением, выветриванием и разрыхлением исходного отвального материала. Можно предположить наличие фильтрационных каналов на отметках 55 и 65 м по профилю (рис. 5.10).

Склон отвала представлен породами с удельным сопротивлением 30-65 Ом·м на всю глубину зондирования. Материал отвала здесь подвержен интенсивному выветриванию и промерзанию. В предгорьях отвала на пикетах 80-95 м на глубине 1-5 м наблюдается низкоомная аномалия (1-5 Ом·м) мощностью 2.5 м. После отметки 95 м эта аномалия выходит на поверхность и простирается до 190 м и приурочена к грунтам долины, образовавшейся за счет миграции дренажных стоков и выноса глинистой части отходов из отвалов. В основе техногенных грунтов лежат высокоомные грунты природного бревенчатого массива. К концу профиля слой отходов утончается до мощности 1 м на отметке 240 м.

Детальное изучение геоэлектрической зональности проведено на участке с аномальными концентрациями газа – у подножия отвала с захватом его склоновой части методом микроэлектротомографии (рис. 5.11) в весеннее (май) и зимнее (февраль) время. По данным замеров в мае, значения УЭС в подповерхностном пространстве на склоне и у подножия колеблются в пределах 1-200 Ом·м, но под подошвой на глубине 0.5-1.5 м имеется зона пониженного сопротивления, которая, вероятно, соответствует линзе с высокоминерализованными пористыми растворами. Расположение канала выхода инфильтрационных растворов на поверхность соответствует зоне с аномальными концентрациями газа. Наличие

участков, обогащенных тяжелой фракцией (сульфидный материал) в сочетании с поступающими снизу высокоминерализованными кислыми растворами способствует протеканию реакций разложения сульфидов с образованием сернистых газов и более интенсивному выносу химических элементов, чем в верхней части отвала.

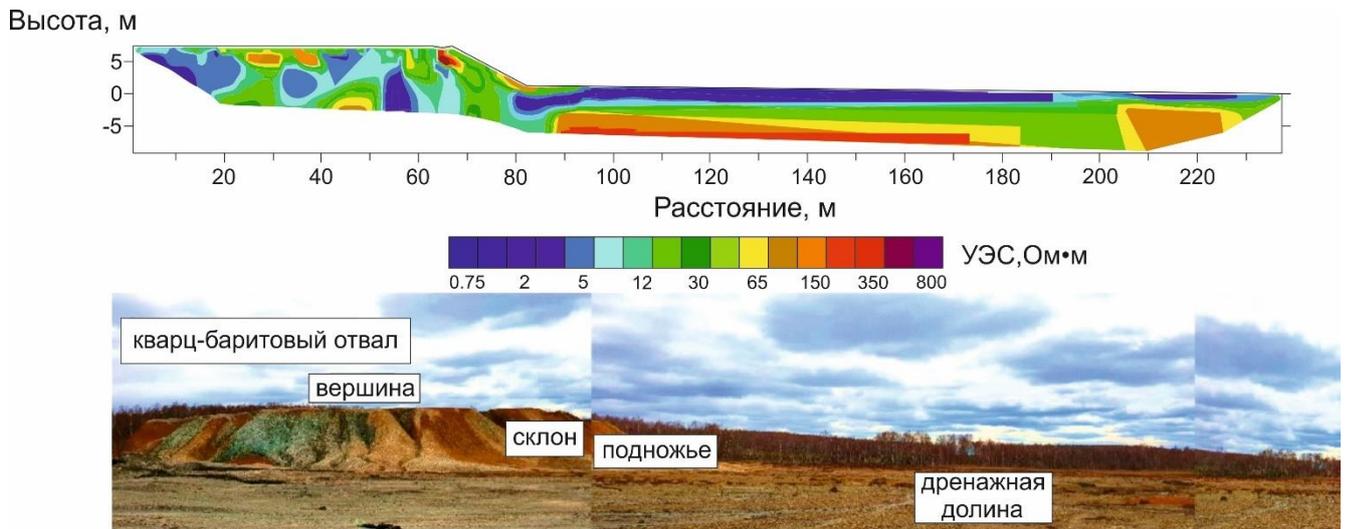


Рисунок 5.10 – Геоэлектрический разрез по профилю 2, пересекающему кварц-баритовый отвал, фотография общего вида отвала и дренажной долины

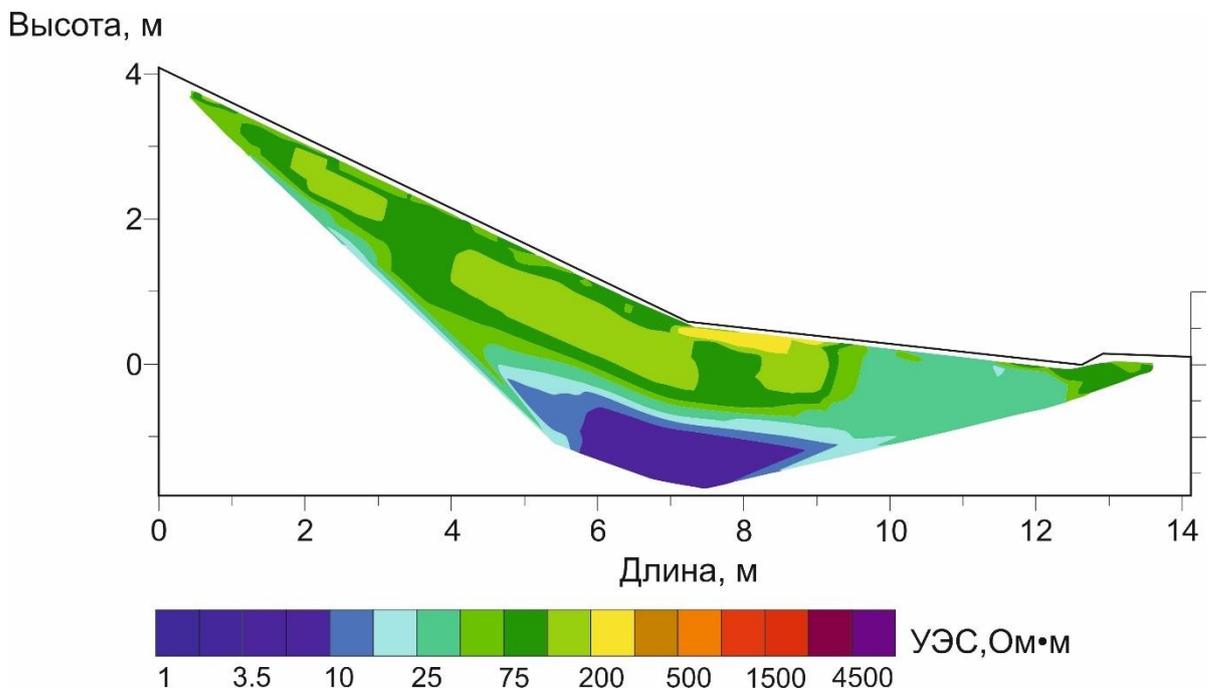


Рисунок 5.11 – Геоэлектрический разрез склоновой части кварц-баритового по профилю микрофотографии Пр. 1 в весеннее время

Кварц-баритовый отвал. Зимние наблюдения

Измерения на том же микропрофиле 1 были повторены в зимнее время (февраль) с одновременным измерением концентраций газа в его точках.

Верхняя часть геоэлектрического разреза по микротомографическому профилю Пр1 (рис. 5.12) до глубины 0.65 м характеризовалась высоким УЭС (500–10 000 Ом·м), что было связано с сезонным промерзанием. Снега на склоне отвала не было, и промерзание было относительно глубоким. В интервале профиля 9.5–11.5 м выделяется аномалия пониженного до 50 Ом·м УЭС. В этом месте разрез был перекрыт слоем снега толщиной 0.5 м, что предотвратило промерзание. Конфигурация линз высокоминерализованных поровых вод в основании разреза остается такой же, как и летом.

Сравнение геоэлектрического профиля с температурными данными показывает, что локальные аномалии пониженного электрического сопротивления в диапазоне 9.5–11.5 м имеют положительную температуру грунта (+0.4 °С), а на остальной части профиля отрицательную (-5 °С (рис. 5.12)).

Выше этой же аномалии отмечается повышенная концентрация ДМС в поверхностном слое (до 0.2 мг/м³) относительно ПДК для загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест (0.08 мг/м³, ГН 2.1.6.1338-03). В остальных точках отбора проб, где верхняя часть разреза отличается высоким УЭС, концентрация ДМС не превышает 0.04 мг/м³ (рис. 5.13).

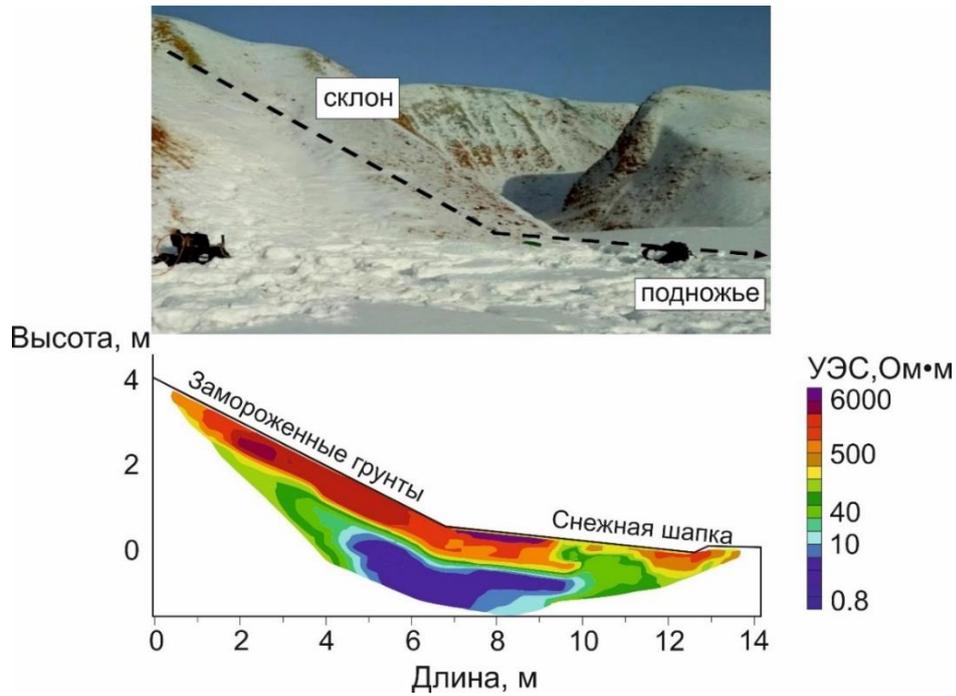


Рисунок 5.12 – Геоэлектрический разрез склона кварц-баритового отвала на микропрофиле 1 в зимнее время

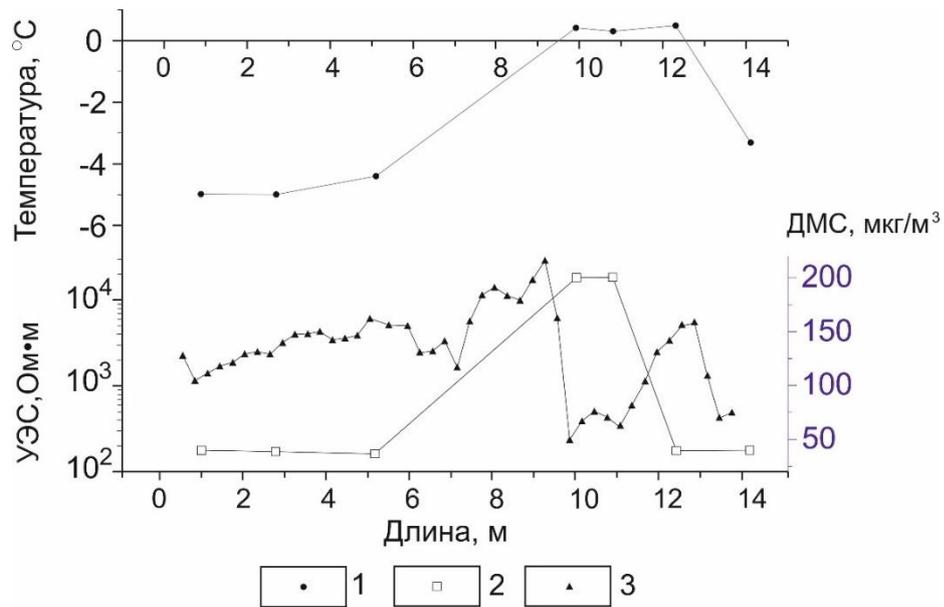


Рисунок 5.13 – Температура (1), концентрация ДМС (2) и удельное электрическое сопротивление (3) на глубине 0.1 м на Профиле 1

Анализ температуры грунта, концентрации ДМС и удельного сопротивления на глубине 0.1 м (рис. 5.13) показывает, что между этими параметрами существует тесная связь. В области положительных температур наблюдаются низкое сопротивление и высокие концентрации ДМС. Однако в точке 12.3 м разреза высокое УЭС связано с сухим состоянием пород при положительных

температурах. Низкая влажность обуславливает низкую активность процессов метилирования и образования ДМС (Yurkevich et al., 2019).

Сезонные наблюдения на кварц-баритовых отвалах показали, что температура почв в июне повысилась на 10-15°C по сравнению с майскими показателями, но распределена менее равномерно. На пикетах 80 и 240 м наблюдаются минимумы, а на 100 м – максимум в результатах как майских, так и июньских измерений.

Эта зона (80-100 м по профилю) соответствует низкоомной аномалии на поверхности отвала, описанной нами выше. Здесь же отмечены скачки концентраций ДМС и ДМСО. По-видимому, в этом районе формируется геохимический барьер, связанный с изменением физико-химических условий при попадании кислых стоков из зоны окисления в почвы. Повышенные концентрации ДМС и SO_2 в долине стока указывают на то, что этот участок «дышит» (рис. 5.9, точка 5). Газообразование может быть связано с развитием специфического биотического сообщества, характерного для переходных зон природно-техногенных систем. О предполагаемом механизме будет написано ниже.

Пирит-баритовый отвал. Летние наблюдения.

На пирит-баритовом отвале, в отличие от кварц-баритового, низкоомные зоны (насыщенные высокоминерализованными поровыми растворами), в которых происходит наиболее интенсивное взаимодействие «вода-отходы», подходят к поверхности в верхней части отвала, а затем сменяются участками с меньшей электропроводностью (рис. 5.14).

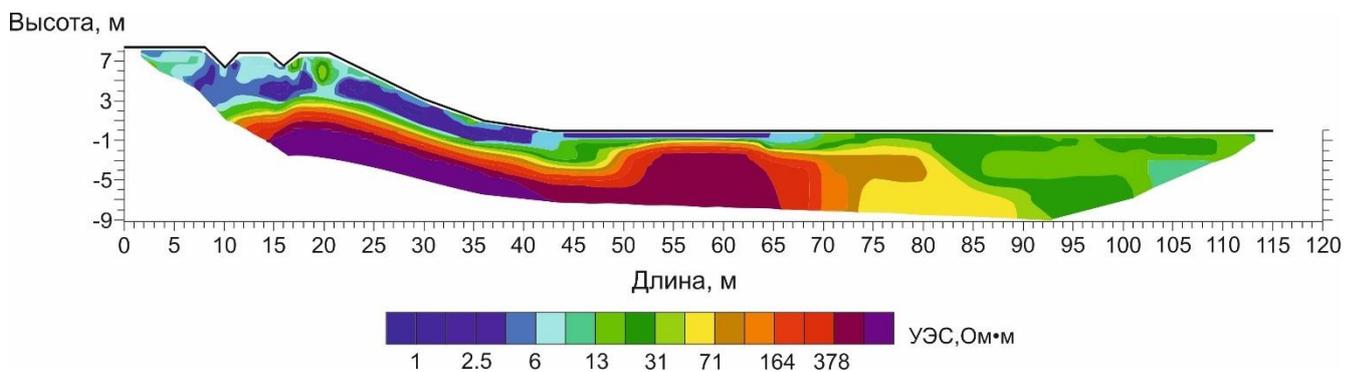


Рисунок 5.14 – Геоэлектрический разрез Профиля 3 на пирит-баритовом отвале, фото с общим видом отвала и дренажной долины

Состав воздуха над поверхностью барит-пиритового и кварц-баритового отвалов по данным хромато-масс-спектрометрии

Около 100 летучих органических соединений было идентифицировано в пробах воздуха над отвалами с помощью анализа ГХ/МС. Концентрации ряда соединений серы, селена и азота, а также альдегидов, спиртов и кислот значительно превышают фоновые уровни (табл. 5.7). Как указывалось выше, по данным портативной газовой съемки в воздухе обнаружены диметилсульфид и диметилсульфоксид, концентрации которых коррелируют друг с другом, что свидетельствует о взаимосвязи процессов, приводящих к газообразованию. ГХ-МС подтверждает наличие в воздухе ДМСО, а также других метилированных форм (содержащих метильные группы $-CH_3$) серосодержащих соединений: диметилдисульфида ДМДС ($C_2H_6S_2$), диметилтрисульфида ДМТС ($C_2H_6S_3$). ДМДС и ДМТС представляют собой летучие органические соединения с неприятным запахом и высокой реакционной способностью, что обусловлено слабостью связей S-S в этих молекулах. Известно, что, например, ДМТС ($C_2H_6S_3$) является продуктом бактериального разложения [Statheropoulou et al., 2007].

Таблица 5.7 – Концентрации органических компонентов в приповерхностном слое воздуха над Урскими отвалами, мкг/м³ [Yurkevich et al., 2019]

Компонент	Формула	Кварц-баритовый	Барит-пиритовый	Фон
Сероуглерод	CS ₂	31	43	93
Диметилсульфид	C ₂ H ₆ S	420	30	15
Диметилселенид	C ₂ H ₆ Se	52	нпо	нпо
Диметилдисульфид	C ₂ H ₆ S ₂	2.3	11	нпо
Диметилтрисульфид	C ₂ H ₆ S ₃	0.3	0.2	нпо
Пиридин	C ₅ H ₅ N	15	нпо	нпо
Формаид, N,N-диметил-	C ₃ H ₇ NO	45	нпо	нпо
N,N-диметилацетамид	C ₄ H ₉ NO	4.2	нпо	нпо
Бензамид, N,N-Диметил-	C ₉ H ₁₁ NO	6.0	нпо	нпо
фенол	C ₆ H ₆ O	3.0	0.4	0.2
Бензонитрил	C ₆ H ₅ (CN)	17	0.2	нпо
Бензил нитрил	C ₈ H ₇ N	0.4	нпо	нпо
2-пиридинкарбонитрил	C ₆ H ₄ N ₂	0.8	нпо	нпо
Гексанал	C ₆ H ₁₂ O	3.2	8.0	0.8
Гептанал	C ₇ H ₁₄ O	0.9	3.4	0.9
Октанал	C ₈ H ₁₆ O	3.2	15	1.0
Нонанал	C ₉ H ₁₈ O	9.8	86	1.1
Деканал	C ₁₀ H ₂₀ O	4.0	9.1	1.0
1-октанол	C ₈ H ₁₈ O	нпо	3.8	нпо
1-нонанол	C ₉ H ₂₀ O	нпо	3.4	нпо
Триметил бутановая кислота	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CO ₂ H	1.1	0.6	0.2
Пentanовая кислота	C ₅ H ₁₀ O ₂	1.0	0.1	0.1
Бензеновая кислота	C ₇ H ₆ O ₂	2.7	0.2	0.1
S ₆ , S ₇ , S ₈	-	1.6	0.2	нпо

Примечание: нпо – ниже предела обнаружения

ДМДС представляет собой широко распространенное природное пахучее соединение, выделяемое многими источниками, такими как бактерии, грибы,

растения и животные. Мы предполагаем, что эти соединения являются метаболитами бактериальной трансформации серосодержащих соединений в сульфидных отвалах, о которой говорилось ранее [Bortnikova et al., 2018]. Кроме того, в отличие от наших предыдущих данных по органическим газам над сульфидными хвостохранилищами [Бортникова и др., 2018, 2019], в данном исследовании была проведена количественная оценка концентраций газов. Примечательно, что соединения, содержащие метильные группы, встречаются в воздухе над кварц-баритовым отвалом в большей концентрации, чем над барит-пиритовым отвалом (табл. 5.7). Кроме того, над кварц-баритовым отвалом обнаружены ароматические соединения: фенол (3 мкг/м³), бензонитрил (17.2 мкг/м³), бензамид, N,N-диметил- (6 мкг/м³). Отмечены высокие концентрации ноналя (C₉H₁₈O) в воздухе над кварц-баритовым (9.8 мкг/м³) и барит-пиритовым (86 мкг/м³) отвалами. Нонаналь действует синергически с углекислым газом [Bowman et al., 2003].

Присутствие сероуглерода CS₂ в воздухе над отвалами фиксировалось ранее [Bortnikova et al., 2018; 2019]. В работах Hale, 1993 и 2010 приведены данные об устойчивости CS₂ в воздухе над сульфидными отложениями, что может быть использовано в качестве индикаторного признака при поисковых работах. В случае Урского хвостохранилища как над кварц-баритовым, так и над барит-пиритовым отвалом были обнаружены высокие концентрации CS₂ (относительно всех обнаруженных органических газов): 31 и 43 мкг/м³ соответственно. Следует отметить, что сероуглерод является летучим соединением второго класса опасности, его среднесуточная предельно допустимая концентрация в воздухе населенных мест составляет 5 мкг/м³, максимальная разовая доза 30 мкг/м³ согласно принятым гигиеническим нормативам в Российской Федерации [ГН 2.1.6.1338-03], т. е. обнаруженные концентрации превышают в 6-8 раз среднесуточные нормы и даже выше предельно-разовых. Учитывая, что изучаемые отвалы расположены на территории поселка Урск, дальнейший мониторинг концентраций этого соединения в поле заслуживает особого внимания и будет

предметом изучения в наших дальнейших исследованиях на этом участке и других подобных объектах.

Относительно барит-пиритового отвала спектр сероорганических соединений в воздухе шире, чем над кварц-баритовым отвалом, кроме того, присутствуют вещества, которые не обнаруживаются в других точках (табл. 5.7).

Диметилселенид (C_2H_6Se) обнаружен над барит-пиритовым отвалом в концентрации 52 мкг/м^3 . Его образование мы объясняем микробиологическим метилированием селенсодержащих соединений (Бортникова и др., 2019). Кроме того, нами впервые обнаружены формамиды, ароматические и гетероциклические соединения (табл. 5.7), даны количественные оценки их содержания [Yurkevich et al., 2019].

N, N-диметил- формамид обнаружен в концентрации 45 мкг/м^3 . Формамид, Это соединение занимает третье место по уровню содержания среди всех сероорганических газов в воздухе над барит-пиритовым отвалом (после C_2H_6Se и CS_2). Вероятно, N, N-диметил- формамид также является участником биотического цикла с метилированием, о котором мы писали выше. Кроме того, интересно, что формамиды являются промежуточными продуктами в цикле метаногенеза и могут быть источником высокотоксичного цианистого водорода HCN [Bipp, Kieczka, 2012].

Известно также, что формамид является безопасным продуктом ферментативной конверсии токсичного цианида, например, фитопатогенными грибами с использованием цианидгидратазы по реакции 5.16 [Mansfield, 2000; Gupta et al., 2010]:



Помимо детоксикации цианида, ряд грибов осуществляют реакцию превращения цианида в формамид 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*.

Поскольку исследуемые нами отходы образуются в результате цианирования сульфидсодержащих руд, можно предположить, что ряд азотсодержащих соединений, находящихся в воздухе над отвалами, например, упомянутые выше производные формамида, являются продуктами биотического превращения цианидов и роданидов. Дальнейшее изучение сезонной динамики азотсодержащих газов над Урскими отвалами может дать информацию об интенсивности биодegradации отходов цианирования в зависимости от времени года, что является актуальной задачей в условиях сибирского климата.

Кроме того, над кварц-баритовыми отвалами обнаружены ароматические соединения: бензамид, N,N-диметил- (6 мкг/м³), фенол (3 мкг/м³), бензонитрил (C₆H₅CN, 17 мкг/м³), бензилнитрил, (C₇H₇CN, 0.4 мкг/м³), бензолпропаннитрил (C₈H₉CN, 0.2 мкг/м³). Что касается вышеописанных нитрилов (C₆H₅CN, C₇H₇CN, C₈H₉CN), то они являются производными синильной кислоты. Их образование может быть связано с трансформацией остатков цианидов, входящих в состав отходов.

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 [Yurkevich et al., 2019].

В данной работе мы комбинируем геофизические и геохимические методы для получения общей картины распределения химических соединений в системе «твердое вещество - поровой раствор - воздух»; автор делает суждения о подвижности химических элементов и органических соединений при гипергенном преобразовании техногенной системы.

Показано, что области, подверженные наибольшим гипергенным изменениям, выявляются с помощью электротомографии как области аномального

сопротивления, эти же зоны характеризуются повышенным газовыделением. Среди этих летучих соединений есть целый спектр опасных органических газов, концентрации которых превышают предельно допустимые, но их происхождение в этих отвалах до конца не ясно и требует дальнейших исследований. Кроме того, токсичность ряда газов не изучена, необходимы токсикологические испытания, актуальность которых не вызывает сомнений в связи с тем, что исследуемые и подобные им отходы расположены рядом с жилыми массивами.

Механизмы образования серо-, селен-, азот- и углеродсодержащих соединений в результате гипергенных преобразований сульфидсодержащих отходов с цианидными остатками

Описанные выше летучие соединения являются продуктами процессов восстановления и окисления, протекающих в отвалах под влиянием биотических и неорганических факторов, и являются неотъемлемыми частями цикла серы, селена, азота и углерода в системе «отходы-поровый раствор-воздух». Понимание законов этого цикла необходимо для установления механизмов миграции химических элементов в условиях гипергенеза при фазовых переходах между твердой, жидкой и газообразной компонентами техногенных систем.

Однако, механизмы образования, а также токсичность детектируемых соединений остаются малоизученными, актуальна задача установления роли биотических факторов в формировании их состава.

Целью экспериментальной работы было определение роли биотических факторов в формировании состава парогазовых эманаций от сульфидсодержащих отходов горнорудного производства на примере Урского отвала. Была проведена серия экспериментов по определению состава серо-, селен-, азот- и углеродсодержащих органических веществ в парогазовой фазе над поверхностью i) автоклавированной пробы вещества отходов; ii) вещества отходов с добавкой культивированной бактерии вида *Bacillus mycooides*.

Подробное описание условий экспериментов приведено в п. 3.3.2.

В результате обработки ГХ/МС данных с помощью программы AMDIS и базы данных масс-спектров электронной ионизации (NIST 2017) в пробах воздуха над автоклавированным образцом вещества Урских отвалов и с добавкой культивированной бактерии вида *Bacillus mycooides*, определен широкий спектр летучих органических соединений (табл. 5.8).

Таблица 5.8 – Состав паровой фазы над пробами через 28 часов после начала эксперимента, мкг/м³

Параметр	Формула	№ колбы, шифр пробы				
		№ 1	№ 3	№ 5	№ 8	№ 0
<i>Селенсодержащие соединения</i>		СБГ	СГ	СБ	С	Г
Диметилселенид	C ₂ H ₆ Se	90	47	н.о.	н.о.	72
Метилселенацетат	C ₃ H ₆ Ose	6.7	0.67	н.о.	н.о.	н.о.
Диметилтиоселенид	C ₂ H ₆ Sse	145	93	н.о.	н.о.	7.5
Метилдиселенид	CH ₃ Se ₂	14	1.2	н.о.	н.о.	9.4
Диметилселенодисульфид	C ₂ H ₆ SeS ₂	14	5.3	н.о.	н.о.	0.5
<i>Серосодержащие соединения</i>						
Дисульфид углерода	CS ₂	68	19	8.0	н.о.	62
Диметилсульфид*	C ₂ H ₆ S	270	370	2500	64	50
Диметилдисульфид	C ₂ H ₆ S ₂	137	95	83.6	н.о.	3.2
Диметилтрисульфид	C ₂ H ₆ S ₃	230	130	18	10	2.1
Диметилтетрасульфид	C ₂ H ₆ S ₄	31	52	н.о.	н.о.	н.о.
Диметилпентасульфид	C ₂ H ₆ S ₅	0.4	2.4	н.о.	н.о.	н.о.
Сера	S ₆ , S ₇ , S ₈	2.4	5.5	н.о.	н.о.	5.9
<i>Азотсодержащие соединения</i>						
Этиловый эфир азотной кислоты	C ₂ H ₅ NO ₃	13	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Метил-этиловый эфир азотной кислоты	C ₃ H ₇ NO ₃	22	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Изобутилнитрат	C ₄ H ₉ NO ₃	17	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Бензонитрил	C ₇ H ₅ N	4.3	0.86	2.8	4.3	10.3
<i>Прочие</i>						
2-Гептанон	C ₇ H ₁₄ O	1.3	0.30	0.30	н.о.	н.о.
2-метилпропановая кислота	C ₄ H ₈ O ₂	28	4.3	н.о.	н.о.	н.о.
3-метил бутановая кислота и 2-метил бутановая кислота	C ₅ H ₁₀ O ₂	43	2.2	4.4	н.о.	н.о.

Примечание: СБГ – питательная среда+ *Bacillus mycoides* +грунт, СГ – питательная среда+грунт, СБ - питательная среда+ *Bacillus mycoides*, С - питательная среда; н.о. – не обнаружено, Г – грунт без питательной среды и бактерий.

Среди селенсодержащих веществ найдены метилированные формы селенидов и их производных (табл. 5.8), классы опасности которых не установлены. В наибольших концентрациях найдены диметилселенид (до 90 мкг/м³) и диметилтиоселенид (до 145 мкг/м³). Более высокие концентрации

метилов в воздухе над пробами отвалов с питательной средой и бактериями (СБГ) в сравнении с пробами без бактерий (СГ) указывает на то, что имеет место биотическое метилирование с участием рассматриваемых нами бактерий *Bacillus mycoidus*.

Среди серосодержащих соединений – диметилсульфид (ДМС), диметил дисульфид, ($C_2H_6S_2$), диметилди-, три-, тетра- и пентасульфиды – продукты метилирования сульфидов, содержащихся в отвалах. Их свойства мало исследованы, токсичность не установлена, исключение составляет ДМС (4 класс опасности по [ГН 2.1.6.1338-03]). Обнаружена элементарная сера в виде циклических аллотропов S_6 , S_7 , S_8 , а также дисульфид углерода (CS_2). Что касается CS_2 , это высоко опасное летучее соединение (2 класс по [ГН 2.1.6.1338-03]) обнаружено в пробе, содержащей питательную среду, бактерии и вещество отвала (СБГ, табл. 5.8) в концентрации 68 мкг/м^3 , что более чем в два раза превышает максимально разовое ПДК для загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест (30 мкг/м^3 [ГН 2.1.6.1338-03]. Однако, в отличие от селенсодержащих веществ, сравнение концентраций в пробе с биотой (СБГ) и без (СГ) не вносит ясности в причастность бактерий к процессу метилирования. Можно предположить, что в эмиссию метилированных серосодержащих соединений вносит вклад питательная среда. Наличие циклической серы в пробах СГ и Г в больших концентрациях (5.5 и 5.9 мкг/м^3 соответственно), чем в СБГ (2.4 мкг/м^3), указывает на закономерно абиотический механизм образования этого соединения. Близкое содержание в парах элементарной серы во всех пробах с грунтом, по-видимому, связано с тем, что она первоначально присутствовала в заметном количестве в твердых образцах. А в силу низкой летучести, ее концентрация оказалась мало подвержена воздействию в ходе данного эксперимента.

Среди азотсодержащих соединений интересны три сложных эфира азотной кислоты – этиловый, метил-этиловый и метил-пропиловый, которые были найдены в концентрациях 13 , 22 и 17 мкг/м^3 соответственно только в пробах с

присутствием *Bacillus mycoides* (СБГ, табл. 5.8). Эти азотсодержащие соединения отсутствуют в воздухе над грунтом без бактерий, что дает основание предположить биотическую природу их образования. Важно, что этиловый эфир азотной кислоты ($C_2H_5ONO_2$) может выступать в качестве алкилирующего агента для сульфидов, кроме того, он токсичен, способен окислять гемоглобин. Один из предположительных механизмов образования $C_2H_5ONO_2$ в природных средах – в результате жизнедеятельности анаэробных пропионовокислых бактерий (*Propionibacterium*) [Белобородова, Белобородов, 2000].

Кроме того, обнаружен бензонитрил (C_6H_5CN), соединение 2 класса опасности, в концентрации до 10 мкг/м³. Бензонитрил является производным синильной кислоты в ходе преобразования цианидных и роданидных остатков в отходах.

5.4. Комсомольское хвостохранилище

5.4.1. Состав поровых и грунтовых вод

Низкие значения pH (1.91), высокие концентрации сульфат-анионов (160 г/л), высокие значения электропроводности (2400 мкСм/см) и окислительные значения Eh (+510 мВ) являются основными характеристиками поровой воды из зоны окисления («красные хвосты») в южной части (табл. 5.9).

Кислые условия благоприятствуют выщелачиванию металлов из твердого материала и растворению вторичных минералов. Эти данные согласуются с ранее полученными экспериментальными результатами взаимодействия вода-порода в лабораторных исследованиях [Abrosimova, Bortnikova et al., 2015]. Концентрации Fe и Al чрезвычайно высоки (42 и 1.9 г/л соответственно), а концентрация As достигает 12 г/л. Эта чрезвычайно высокая концентрация мышьяка превышает таковую в поровых растворах хвостохранилища Co-Ni арсенидной руды (Хову-Аксы) (по данным Бортниковой С.Б.). Высокие уровни мышьяка в растворе определяются как первоначальными повышенными концентрациями мышьяка в поровых растворах,

так и реакциями между твердыми частицами и поровой водой после осаждения [Bortnikova et al., 2012]. Низкие значения pH и высокие концентрации сульфат-анионов и Cu, Mn, Zn, Pb, Se, Sb и Ti в поровой воде отражают растворение вторичных сульфатных минералов, содержащих эти элементы. Условия pH-Eh в основном ответственны за образование соединений As (V) в водных растворах. Концентрации As (III) и As(V) составляют 640 и 11100 мг/л соответственно (табл. 5.9), а основной формой является H_3AsO_4 [Brookins, 2012].

Значения pH в поровой воде из «серых» хвостов в северной части нейтральны (6.81), содержат более низкие концентрации сульфат-анионов, металлов, As и Sb по сравнению с южным окисленным материалом (табл. 5.9); значение УЭП 2510 мкСм/см, что в 10 раз ниже, чем у окисленного «красного» материала из южной части. Несмотря на нейтральный pH, поровый раствор содержит 0.13 мг/л мышьяка и 0.03 мг/л As (III), что свидетельствует о потенциально высокой токсичности. Поверхностный водоток содержит повышенные концентрации SO_4^{2-} (2500 мг/л).

Концентрации As и Sb в речной воде более чем в 10 и 76 раз превышают соответственно предельно допустимую концентрацию в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_в) этих химических элементов в воде хозяйственно-бытового назначения в Российской Федерации [СанПиН 1.2.3685-21]. При этом концентрация мышьяка 59 мг/л, обнаруженная в колодце питьевой воды г. Комсомольска, в 6 раз превышает значение ПДК_в этого химического элемента (табл. 5.9).

Геохимические данные указывают на миграцию дренажа за пределы хвостохранилища, и направление этой миграции определено при помощи электротомографии. Наиболее высокие концентрации исследуемых элементов наблюдались в стоках кислотных дренажей. Попадая в окружающую среду, они смешиваются с нейтральными атмосферными и поверхностными водами, происходит нейтрализация и значительная часть растворенных соединений металлов выпадает в осадок, в основном образуя гидроксиды железа, алюминия и марганца.

Таблица 5.9 – Состав поровых вод, полученных из «серых» хвостов на северной площадке хвостохранилища, и из «рыжих» - в южной части, загрязненного водотока и питьевой скважины, концентрации элементов – в мг/л, В-1÷В-4 – точки на карте (рис. 2.5в)

Параметр	Красная поровая вода В-1	Серая поровая вода В-2	Загрязненный поток В-3	Питьевая скважина В-4	ПДК ¹
рН	1.9	6.8	8	7.2	н.о. ²
Eh, мВ	510	380	230	270	н.о.
ЕС, мкСм/см	24000	2500	1200	640	н.о.
SO ₄ , мг/л	160000	2400	2500	85	н.о.
Mg	2400	110	47	18	н.о.
Ca	430	500	230	67	н.о.
Na	15	12	43	8.1	н.о.
K	18	17	7.3	2.3	н.о.
Sr	0.65	1.0	0.77	0.26	1.0
Al	1900	0.83	н.о.	0.076	0.2
Mn	170	4.6	0.02	0.01	0.1
Cu	75	0.03	0.008	н.о.	1.0
Ba	0.21	0.10	0.082	0.029	0.7
Fe	42000	4.1	0.069	0.064	0.3
Zn	720	0.22	0.01	0.0082	1
Li	1.3	0.03	0.006	0.004	0.03
As общ	12000	0.13	0.098	0.059	0.010
As (III)	640	0.03	н.о.	н.о.	
As(V)	11000	0.1	н.о.	н.о.	
Pb	28	0.11	н.о.	н.о.	0.01
Se	15	н.о.	н.о.	н.о.	0.01
Sb	13	9.1	0.38	н.о.	0.005
B	0.003	н.о.	н.о.	0.028	0.5
Ti	17	0.022	0.006	0.0076	0.1

Примечание: ¹значения ПДК – согласно [СанПиН 1.2.3685-21], ²н.о. – не обнаружены.

Однако мышьяк является подвижным элементом в нейтральных условиях и в повышенных концентрациях обнаруживается в загрязненном водотоке и даже в колодцах с питьевой водой. Изменение физико-химических условий (особенно снижение Eh в глубоких горизонтах) может привести к восстановлению As(V) до его трехвалентной формы, более подвижной и токсичной.

5.4.2. Состав газовых аномалий над поверхностью хвостохранилища

При газовой съемке поверхности хвостохранилища были определены контрастные аномалии SO_2 в воздухе (рис. 5.15). Практически везде над поверхностью хвостохранилища концентрации SO_2 превышают ПДК для загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [ГН 2.1.6.1338-03] особенно в южной части. Таким образом, разница температур окружающего воздуха и хвостохранилища оказывает существенное влияние на газовыделение [Bortnikova et al., 2016]. Содержание SO_2 в воздухе в 12:00 колебалось от 0.011 до 0.079 мг/м³ (рис. 5.16). 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) (рис. 5.17). Следует отметить, что температура поверхности хвостохранилища в 12:00 составляла 12-14 °С, а температура окружающего воздуха – 24-26 °С. При следующем обследовании в 18:00 температура поверхности повысилась до 20-22 °С, а температура воздуха снизилась до 15-16 °С.

Очевидно, что большое влияние на газообразные выбросы оказывает разница температур окружающего воздуха и хвостохранилища. 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 поверхностью хранилища несколько раз в течение суток (рис. 5.16). В первом измерении, проведенном в 11:30, содержание SO_2 составило 0.063 мг/м³. Эти значения постепенно увеличивались до 6.5 мг/м³ (в 18:30), а затем снижались до 0.96 мг/м³ к концу дня.

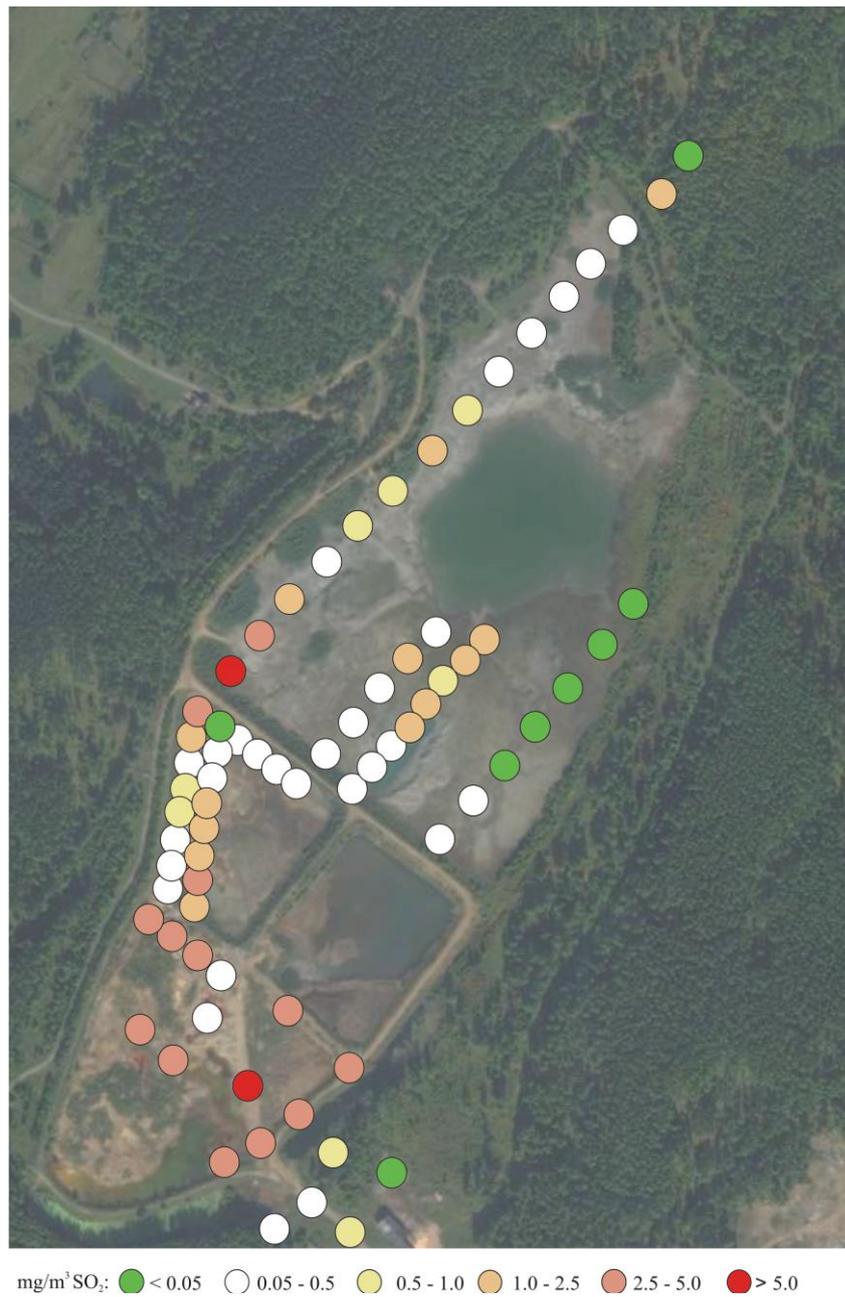


Рисунок 5.15 – Концентрация SO₂ в воздухе над поверхностью Комсомольского хвостохранилища в 18:00

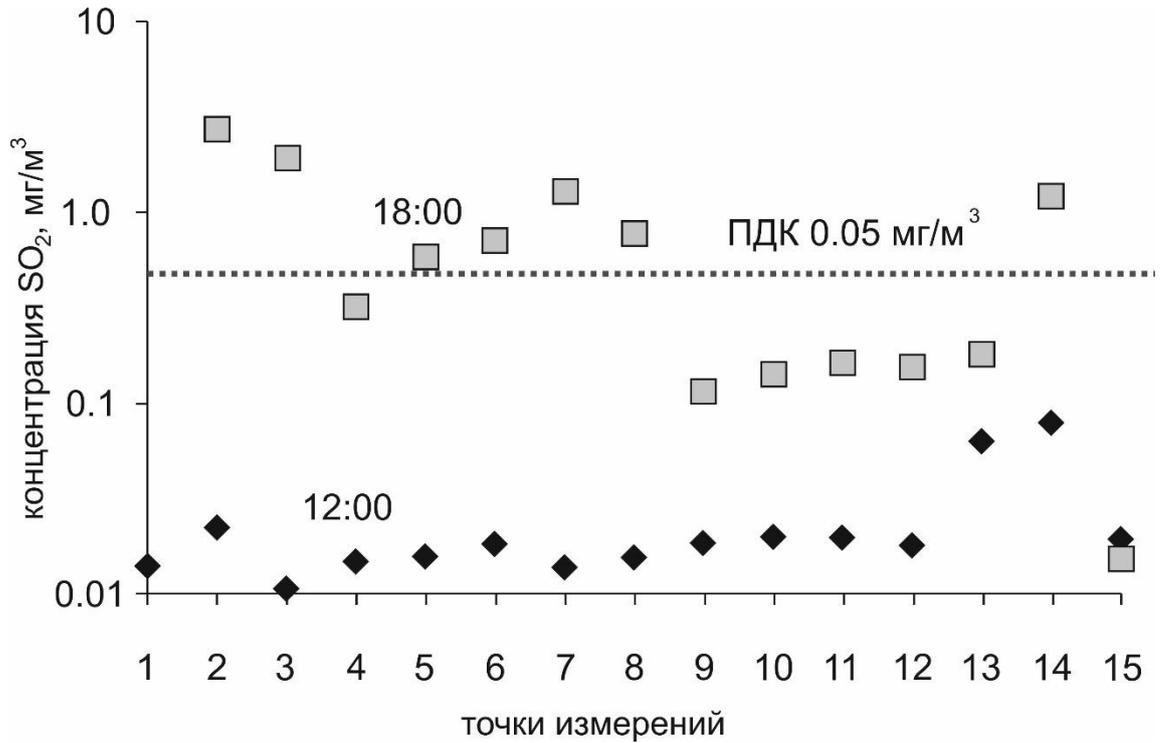


Рисунок 5.16 – Концентрации SO₂ в воздухе под поверхностью хвостохранилища по профилю № 1 в 12:00 (черные ромбы) и 18:00 (серые квадраты)

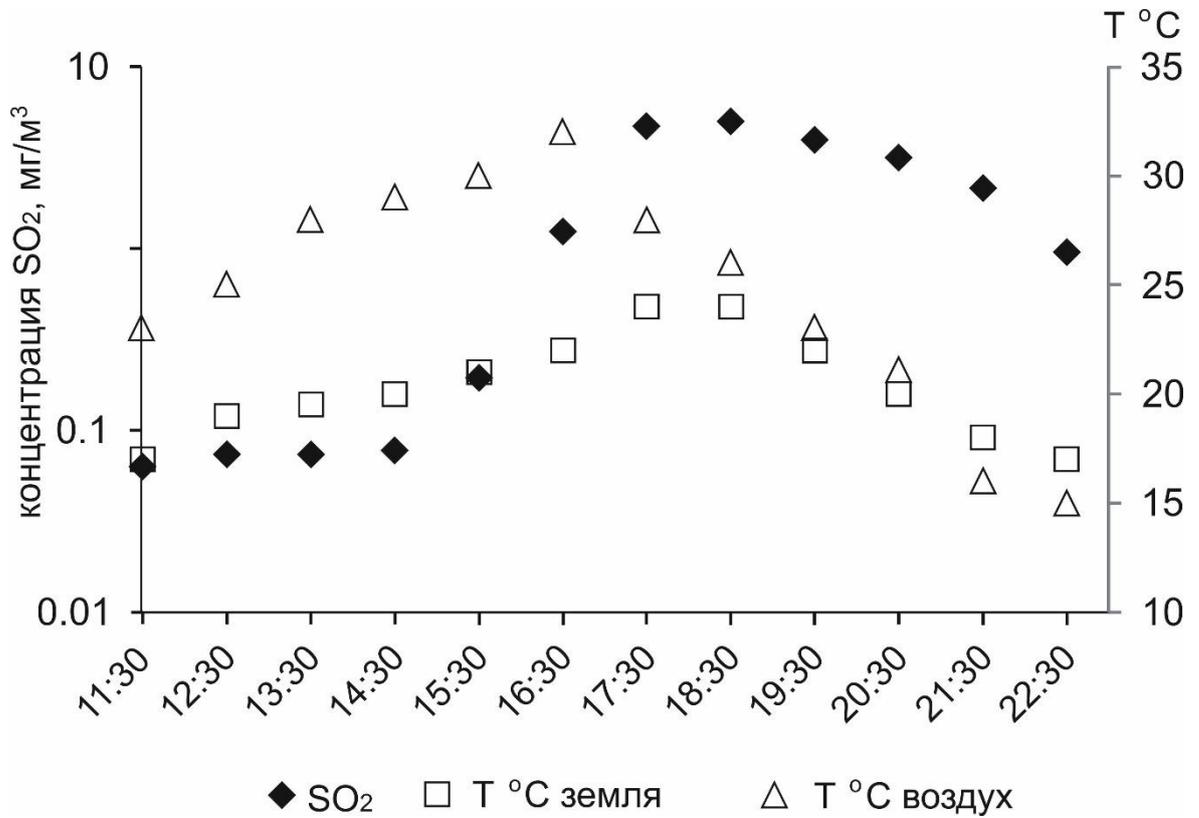


Рисунок 5.17 – Изменения концентрации SO₂ в течение дня

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_2 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 хвостохранилищ аномалии выражены из-за более высоких концентраций сульфидных минералов, что отражается в более высоких концентрациях сульфат-ионов в поровых растворах, чем в северной части (табл. 5.9).

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 ($\text{pH} < 3$) включает несколько стадий. Сначала сульфидная сера гидратируется на поверхности пирита и окисляется до тиосульфата ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), который диспропорционирует до серы ($4\text{S}_4^0_{(s)}$) и тетратионата ($\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$); затем они окисляются до ионов сульфата (SO_4^{2-}) через сульфит (SO_3^{2-}). Этот механизм подтверждается обнаружением элементарной серы, сульфита (SO_3^{2-}), тиосульфата ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) и политионатов (SnO_6^{2-}) в опытах по окислению пирита [Nordstrom, 1982; Moses et al., 1987] и природных условиях [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].

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].

5.5. Шахтаминское хвостохранилище

5.5.1. Состав аномалий в поверхностных водах

Значение рН воды в ручье, стекающем на поверхность отвала, составляет 6.90 ед., Eh соответствует окислительной области (498 мВ), электропроводность – 72 мкСм/см (проба 1, табл. 5.10). В прудах на поверхности отвала (точки 2-4) электропроводность несколько выше, чем во входящем потоке (проба 1, табл. 5.10). В точке 5 отмечены самые высокие значения Eh и низкие рН (5.70), электропроводность 320 мкСм/см, концентрация сульфат-иона 150 мг/л. Значение рН природного ручья, протекающего вблизи водохранилища (точка 6), составляет 6.80 ед., электропроводность – 65 мкСм/см, что находится на одном уровне с потоком, входящим в водохранилище выше по рельефу (проба 1), и концентрация сульфат-иона здесь составляет 15 мг/л. Отметим, что электропроводность воды в водохранилище составляет 280 мкСм/см, а значение рН 7.90 ед. при примерно одинаковом уровне рН и УЭП в реке и питьевом колодце (табл. 5.10, пробы 8, 9).

Таблица 5.10 – Физико-химический состав проб воды: ручей, выходящий на поверхность хвостохранилища из распадка вблизи хвостохранилища (1); пруды на поверхности хвостохранилищ (2-5); естественный ручей, протекающий рядом с хвостохранилищами в более низкой точке рельефа (6); водохранилище (7); река Шахтама (8); колодец с питьевой водой (9)

Проба	рН	Eh, мВ	УЭП, мкСм/см	мг/л		
				SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
1	6.90	500	72	15	0.07	40
2	6.80	510	100	22	0.08	55
3	7.10	510	74	20	0.05	34
4	6.80	510	97	35	0.06	23
5	5.70	560	320	150	0.05	12
6	6.80	520	65	15	0.09	37
7	7.90	490	280	66	1.5	92
8	7.40	480	390	110	1.7	120
9	8.10	470	320	60	1.2	130

Процессы окисления и химического выветривания вещества отходов приводят к выносу химических элементов с водными потоками. Широкий их спектр обнаружен в поверхностных водах вблизи Шахтаминского хвостохранилища в концентрациях, превышающих кларковые содержания для речных вод [Taylor & McLennan, 1985] на 1-4 порядка (рис. 5.18, табл. 5.11). Превышения на 3 порядка характерны для типичных рудных металлов Mn, Zn, Cu, Mo, Cd, Pb. Причем с уменьшением распространенности степень превышения над кларками возрастает (рис. 5.18). Наиболее выражены аномалии для Pb, Cd, а также примесных токсичных мышьяка и таллия.

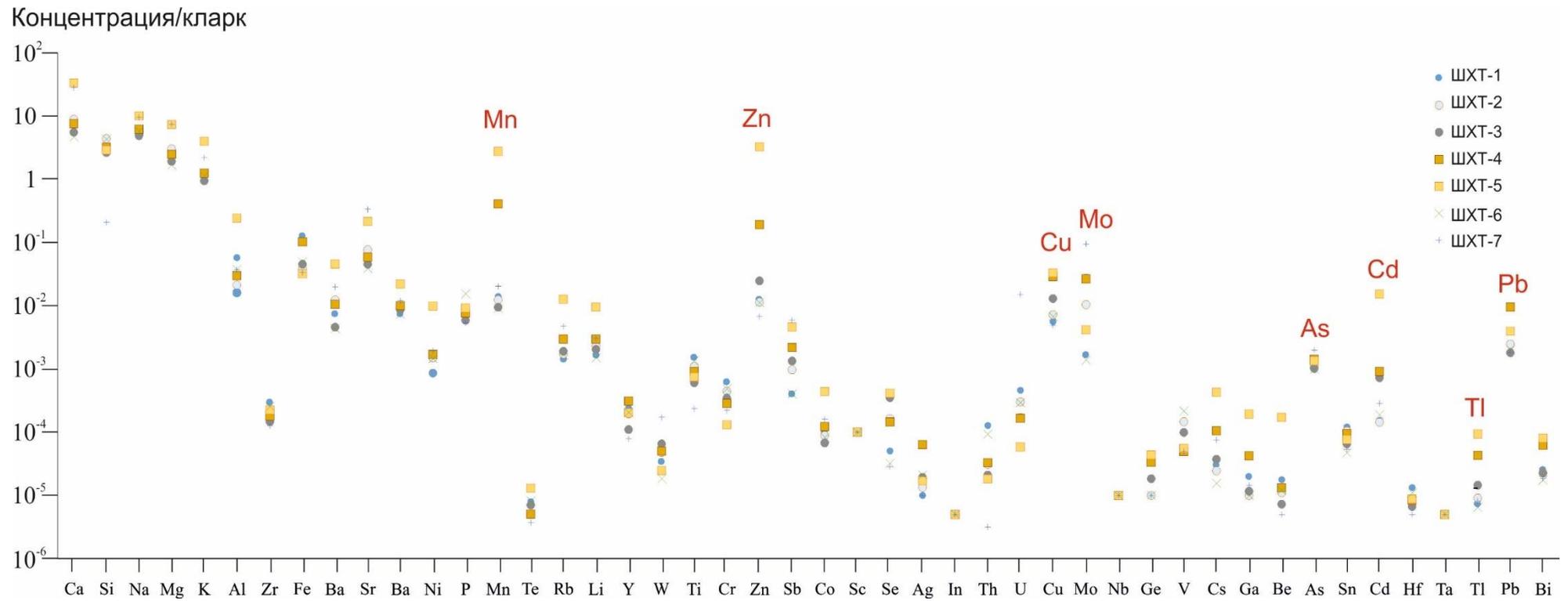


Рисунок 5.18 – Превышения концентраций химических элементов в водах Шахтаминской природно-техногенной системы над кларками для речной воды (Taylor & McLennan, 1985)

Таблица 5.11 – Микроэлементный состав поверхностных вод в окрестностях Шахтаминского хвостохранилища (пробы 1-9): ручей, выходящий на поверхность хвостохранилища из распадка вблизи хвостохранилища (1); пруды на поверхности хвостохранилищ (2-5); естественный ручей, протекающий рядом с хвостохранилищами в более низкой точке рельефа (6); водохранилище (7); река Шахтама (8); колодец с питьевой водой (9). Жирным шрифтом выделены концентрации, превышающие кларковые значения для речных вод согласно [Taylor & McLennan, 1985]

Элемент	Проба									Кларк ¹	ПДК ВОЗ ²	ПДК _в РФ ³
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
	мг/л											
Ca	5.7	9.0	5.5	7.6	33	4.7	28	43	36	12	75	180
Mg	1.9	3.0	1.9	2.5	7.3	1.7	7.5	12	8.9	2.9	н.д.	40
K	1.0	1.1	1.0	1.2	4.0	1.1	2.2	2.8	2.1	2	н.д.	50
Na	4.7	5.1	5.0	6.2	10	6	10	12	7.3	5	200	120
Si	4.5	4.4	2.7	3.2	2.9	4.4	0.2	4.2	8.1	6	н.д.	н.д.
	мкг/л											
Al	57	21	16	30	240	38	37	31	27	160	200	40
Fe	126	38	46	103	32	49	33	66	408	40	300	100
Sr	45	77	45	59	216	39	336	460	487	30	н.д.	400
Ba	7.4	9.2	8.7	10	22	7.3	12	19	10	20	700	700
Ni	1.4	1.5	0.86	1.7	10	1.5	1.9	2.8	1.5	20	70	20
Mn	14	12	9.5	410	2800	9.2	20	29	160	3.0	400	100
Te	0.008	0.005	0.007	0.005	0.013	0.008	0.004	0.008	0.005	3.0	н.д.	3
Rb	1.4	1.7	1.9	3.0	13	1.7	4.8	6.8	6.2	2.6	н.д.	100
Li	1.6	2.3	2.0	2.9	9.5	1.5	3.1	4.3	6.6	2.5	н.д.	80
Y	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	2.5	н.д.	н.д.
Nd	0.2	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1	2.5	н.д.	н.д.
W	0.03	0.05	0.06	0.05	0.02	0.02	0.17	0.06	2.1	2.0	н.д.	0.8
Ti	1.5	1.1	0.6	0.9	0.7	1.4	0.2	1.1	1.5	1.0	н.д.	60
Cr	0.62	0.45	0.35	0.28	0.13	0.48	0.22	0.33	0.27	1.0	50	20

Продолжение таблицы 5.11

Zn	13	11	25	190	3300	11	7	24	8	1.0	3000	1000
Sb	0.40	0.97	1.3	2.2	4.6	0.41	5.9	4.4	1.1	1.0	20	5
Co	0.10	0.09	0.07	0.12	0.44	0.08	0.16	0.21	0.27	0.7	н.д.	100
Sc	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.30	н.д.	н.д.
Se	0.05	0.16	0.35	0.15	0.42	0.03	0.03	0.20	0.02	0.20	40	2
Ag	0.01	0.01	0.02	0.06	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.20	50	50
In	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.20	н.д.	н.д.
Th	0.13	0.03	0.02	0.03	0.02	0.09	0.00	0.01	0.02	0.10	н.д.	н.д.
U	0.45	0.30	0.17	0.17	0.06	0.29	15	28	4.0	0.10	н.д.	н.д.
Cu	5.5	7.2	13	29	34	6.7	4.9	9.1	2.7	0.08	2000	1000
Mo	1.7	10	28	27	4.2	1.4	96	120	34	0.07	70	1
V	0.05	0.15	0.10	0.05	0.06	0.22	0.05	0.27	0.24	0.02	н.д.	1
Cs	0.03	0.02	0.04	0.11	0.43	0.02	0.08	0.17	0.70	0.01	н.д.	н.д.
Ga	0.02	0.01	0.01	0.04	0.19	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	н.д.	н.д.
Be	0.02	0.01	0.01	0.01	0.17	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	12	0.2
As	1.21	1.07	1.02	1.43	1.37	0.99	2.00	0.96	2.98	0.004	10	10
Sn	0.12	0.10	0.06	0.10	0.08	0.05	0.05	0.08	0.06	0.004	1	0.12
Cd	0.15	0.15	0.73	0.92	16	0.19	0.29	0.82	0.14	0.002	3	1
Tl	0.01	0.01	0.01	0.04	0.10	0.01	0.01	0.02	0.01	0.001	н.д.	н.д.
Pb	4.0	2.5	1.8	10	4.0	2.0	1.8	3.7	1.7	0.001	10	10

Примечание: ¹Кларк – средняя концентрация в водах гидросферы по [Taylor & McLennan, 1985]. ²ПДК ВОЗ (предельно допустимые концентрации элементов в питьевой воде, Всемирная организация здравоохранения) [WHO, 2008]. ³ПДК РФ (предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, Российская Федерация) [СанПиН 1.2.3685-21], н.д. – нет данных.

В водных растворах среди элементов, концентрации которых превышают кларковые значения для речных вод [Taylor & McLennan, 1985], представлен широкий спектр элементов: Ca, Mg, K, Na, Al, Sr, Ba, Ni, Mn, Rb, Li, Zn, Sb, Se, Cu, Mo, La, Cs, Ga, Be, As, Sn, Cd, Tl и Pb.

Концентрации Al, Mn, Zn и Cd в водах пруда на поверхности хвостохранилища превышают ПДК химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования по нормативам ВОЗ [WHO, 2008] и РФ [СанПиН 1.2.3685-21] (проба 5, табл. 5.11). Концентрации Mo выше ПДК РФ практически во всех исследованных образцах. Его концентрация колеблется в пределах от 1.4 мкг/л (природный родник, проба 6, табл. 5.11) до 120 мкг/л (р. Шахтама, проба 8, табл. 5.11). Приведем сравнение обнаруженных концентраций Mo в горнопромышленных водах, описанных в различных литературных источниках. Например, по данным [Parviainen et al., 2012], грунтовые воды на глубине 8.4 м в районе хвостохранилища рудника Юлъярви Cu-W-As рудного типа (Финляндия) содержат 32.3 мкг/л Mo. Подземные воды вблизи исторических шахт в районе Сан-Антонио-Эль-Триунфо, Мексика (тип руды Au-Ag-Pb-Zn-As) содержат 5-150 мкг/л [Wurl et al., 2014]. Колодец с питьевой водой в поселке Вершино-Шахтаминский содержит 34 мкг/л Mo. Что касается речных вод, то концентрации Mo в речных водах в районе Гямского медно-полиметаллического комбината в Центральном Тибете составляют 0.6-9.7 мкг/л согласно [Smuda et al., 2014] и 1.12-1.28 мкг/л в воде реки Кочачай в районе свинцово-цинково-серебряного рудника Балья (Турция) [Aykol et al., 2003]. Примечательно, что концентрации Mo в реке Шахтама более чем в 100 раз превышают эти значения.

Для того чтобы проследить взаимосвязь между микроэлементным составом воды поверхностных водотоков вблизи хранилища и составом потенциального дренажного стока, мы сначала рассмотрели особенности состава воды пруда на поверхности хвостохранилища (проба 5, табл. 5.11). Вода здесь характеризуется низкими значениями pH и высокими Eh, что косвенно указывает на окислительные процессы. Об этом же свидетельствуют низкие значения pH паст в верхней части шурфа 1 в непосредственной близости от пруда (pH 2.65, табл. 4.15, п. 4.5.1).

В составе пробы этого водоема выделяется пять групп элементов, концентрации которых превышают кларки речных вод [Taylor & McLennan, 1985] и в то же время значительно превышают концентрации в других исследованных пробах: породообразующие элементы, основные компоненты вмещающих пород, а также Ca, Mg, K, Na, Al, Cs, Rb, Li, Sr; рудные металлы Mn, Cu, Zn, Cd, Pb; металлы-примеси Co, Ni, Ba, Se – халькофильный элемент со сродством к S, выделяющийся в растворы за счет окисления сульфидных остатков в хвостах; Be и Tl – элементы первого класса опасности, обладающие высокой подвижностью в слабокислых и нейтральных средах [Pavoni et al., 2018; Hällström, & Alakangas, 2022]. Полученные данные косвенно свидетельствуют о том, что источниками этих элементов в поверхностных водах вблизи хранилища являются процессы окисления хвостов при взаимодействии «вода–порода».

Вопрос генезисе соединений As дискуссионен: его концентрация в прудах на поверхности хранилища (пробы 4 и 5, табл. 5.11) в 2.5 раза ниже, чем в питьевом колодце поселка (проба 9) и в 1.5 раза ниже, чем в водохранилище (точка 7, табл. 5.11) и находится на одном уровне с концентрациями в природном ручье (пробы 1 и 6) и реке Шахтаме (проба 8). Данных о загрязнении мышьяком поверхностных и подземных вод в районе молибденовых месторождений и их хвостохранилищ не обнаружено; однако описаны случаи загрязнения почвы [Liu et al., 2005].

Сопоставление концентраций химических элементов в твердом веществе складированных отходов с их концентрациями в техногенном озере на поверхности хвостохранилища (рис. 5.19, оранжевая линия) и питьевой скважине в пос. Вершино-Шахтаминский (рис. 5.19, голубая линия) обнаруживает сходные распределения, что дополнительно свидетельствует о техногенном источнике формирования гидрохимических аномалий. Высокой подвижностью обладают кремний, вольфрам, стронций, уран, мышьяк, концентрации которых в питьевой скважине на расстоянии 5 км от хвостохранилища выше, чем в техногенном озере (рис. 5.19).

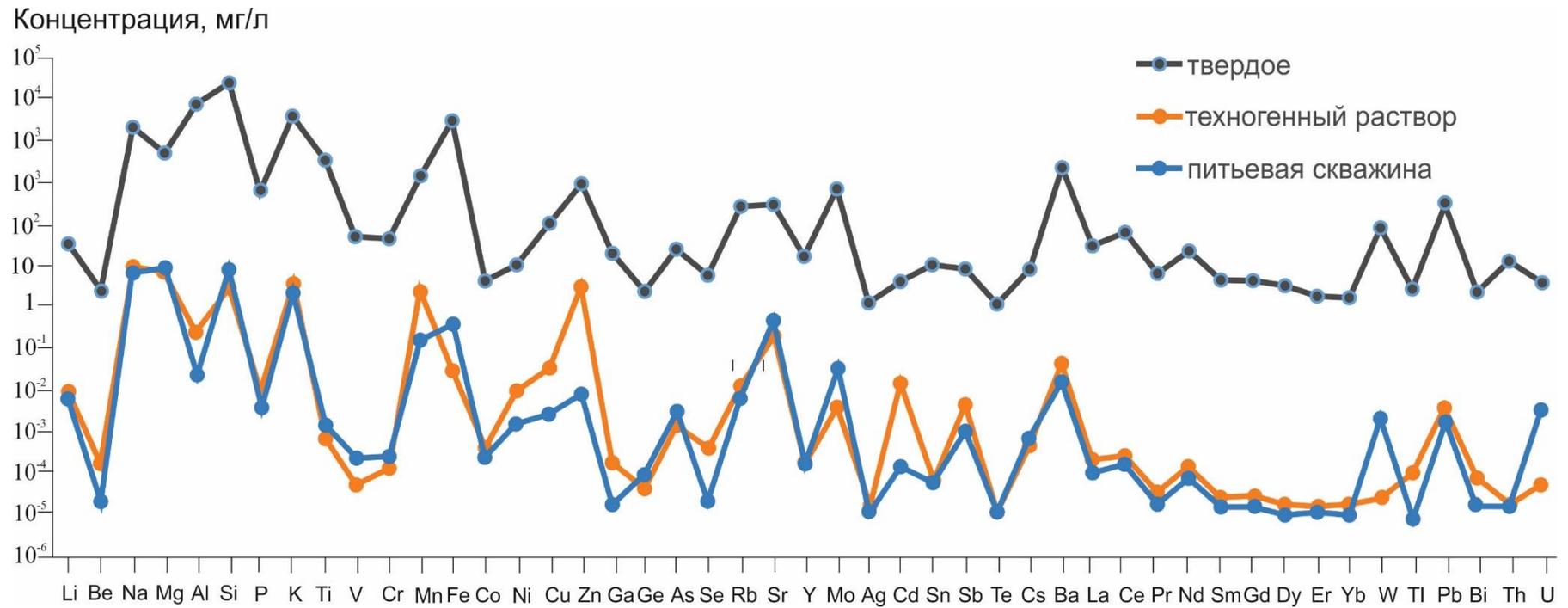


Рисунок 5.19 – Концентрации химических элементов в веществе отходов, техногенном озере на поверхности хвостохранилища и питьевой скважине

Аналогичная ситуация с молибденом — его концентрации значительно выше как в реке Шахтама, так и в водохранилище по сравнению с пробами воды из прудов на поверхности водохранилища, что косвенно указывает на то, что присутствие как мышьяка, так и молибдена в поверхностных водах в первую очередь связано с региональным фоном рассматриваемого района.

Для оценки подвижности химических элементов при переходе из отходов в водный раствор были рассчитаны коэффициенты подвижности по следующей формуле 5.17:

$$КП = \frac{C_{\text{вода}}}{C_{\text{твердое}}} \cdot 10^5 \quad (5.17)$$

где $C_{\text{вода}}$ — концентрация элемента в растворе (проба 5, табл. 5.11), ppm;

$C_{\text{тверд}}$ — концентрация элемента в твердом веществе, ppm (среднее, табл. 4.15, п. 4.5.1);

10^5 — коэффициент пересчета для удобства визуализации в виде диаграммы (рис. 5.20).

При анализе подвижности химических элементов в системе «твердое вещество - раствор» выделяют четыре группы элементов с очень высокой, высокой, средней и низкой подвижностью (рис. 5.20). К *элементам с очень высокой подвижностью* (ОВП, КП = 24-368) относятся: 1) щелочные и щелочноземельные металлы — основные породообразующие компоненты (Na, Li, Mg, Sr), выделяющиеся в раствор в результате выщелачивания из минералов вмещающих пород при конгруэнтном и инконгруэнтном растворении и ионном обмене и 2) попадание металлов Zn, Cd, Mn, Ni в раствор за счет растворения сульфидных минералов руд. *Элементы высокой подвижности* (ВП, КП = 3-10) включают: (1) Sb, Co, Cu, Be, Se, Tl, поступающие в раствор за счет растворения и десорбции примесных компонентов. Обращают на себя внимание бериллий и таллий — элементы первого класса опасности; их концентрации в растворе пруда на поверхности хвостохранилища равны 0.17 и 0.1 мкг/л соответственно (проба 5, табл. 5.11), что в 17 и 100 раз выше кларка соответственно [Taylor & McLennan, 1985]; (2) K, Cs и Rb — элементы, поступающие в раствор за счет растворения

минералов вмещающих пород. В большую группу со *средней подвижностью* (СП, КП = 0.1-2.1) входят As – элемент I класса опасности, а также Mo, Fe и Pb. Наконец, группа *малоподвижных элементов* (МП, КП = 0.02-0.05) представлена Nb, Ti и W.

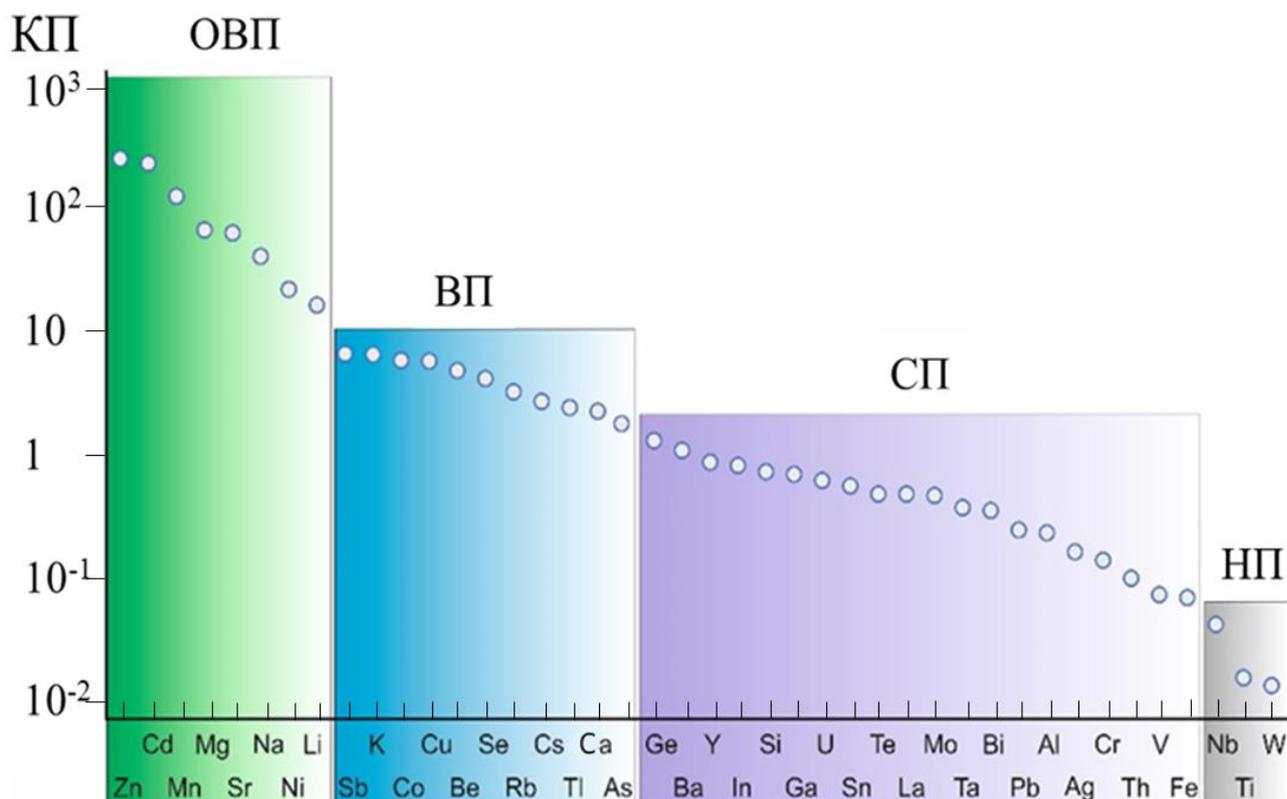


Рисунок 5.20 – Подвижность химических элементов при переходе из Шахтаминского хвостохранилища в раствор. КП – коэффициент подвижности. ОВП, ВП, СП, НП – четыре группы очень высокой, высокой, средней и низкой подвижности соответственно

Анализ главных компонент (АГК) позволил выделить две основные группы исследованных водоемов: I – пробы 1, 2, 3, 4, 6 (ручей, выходящий на поверхность хвостохранилища из распадка (1); пруды на поверхности хвостохранилища (2-4); естественный ручей, протекающий вблизи хвостохранилища в точке ниже по рельефу (6)) и II – пробы 5, 7, 8, 9 (пруд на поверхности хвостохранилища с низкими значениями pH и высокими Eh, что косвенно указывает на окислительные процессы при гиперкриогенезе (5), водохранилище (7), реке Шахтама (8), скважина с питьевой водой (9) (рис. 5.21). Микроэлементный состав воды водохранилища (7), реки Шахтама (8), скважины питьевой воды (9) может быть обусловлен

миграцией химических элементов с дренажными водами, образующимися при окислении шахтаминских хвостохранилищ и выщелачивании элементов из них.

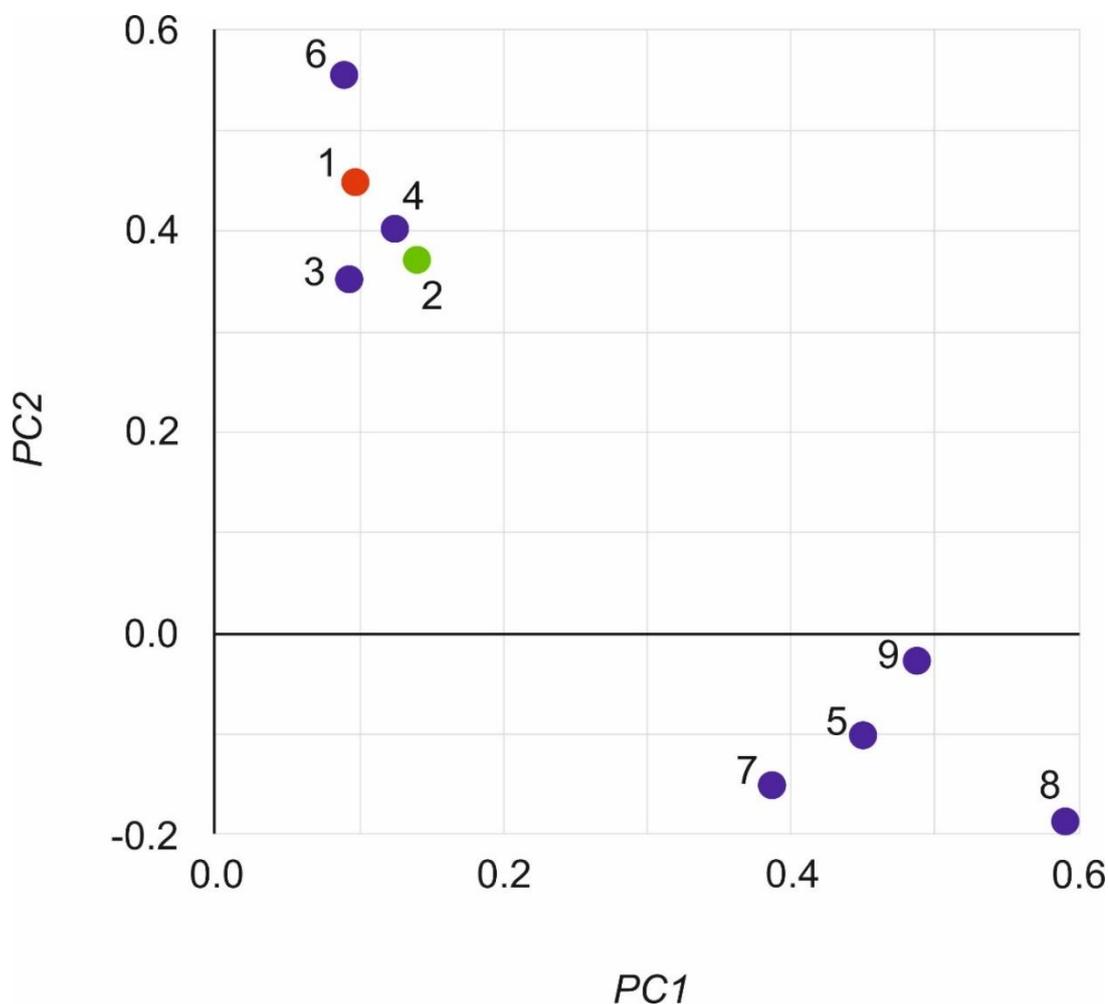


Рисунок 5.21 – График главных компонент по результатам анализа главных компонент микроэлементного состава поверхностных вод в районе Шахтаминского хвостохранилища (пробы 1-9, табл. 5.11)

Рассмотрены гидрохимические аномалии представителей групп ОВП, ВП, СП: Cd, As, Mo, Pb и их химические формы в водных растворах. На рисунке 5.22 представлены гидрохимические аномалии кадмия, мышьяка, молибдена и свинца, выраженные как отношение их концентраций в пробах воды к кларкам в речной воде [Taylor & McLennan, 1985]. Отмечены значительные аномалии кадмия и свинца в прудах на водохранилище (до 7754 и 9657 соответственно в пробах 5 и 4) и в реке Шахтама (408 и 3688 соответственно, проба 9, рис. 5.22). Что касается молибдена и мышьяка, то ярко выраженные аномалии мы отмечаем только для воды водохранилища, реки Шахтама и скважины подземных вод (пробы 7, 8, 9).

Как уже упоминалось выше, мы полагаем, что аномалии в поверхностных и подземных водах Mo и As в основном связаны с региональным фоном данного рудного района. Ещё одним предполагаемым источником металлов в поверхностных и подземных водах может быть миграция дренажных растворов по разломной зоне (локализована при помощи электротомографии, см. п. 6.5).

Аналитическое определение валового содержания элементов в водах, проводимое с целью оценки воздействия на них техногенных факторов, в настоящее время признано недостаточным и часто необъективным. Причина в том, что миграционная способность элементов определяется не столько общим (валовым) содержанием, сколько соотношением существующих форм их присутствия в изучаемой среде [Linnik, Nabivanets, 1986; Florence, 1982]. В результате расчётов, выполненных при помощи Visual Minteq/Wateq4f установлено, что формы миграции Mo представлены преимущественно MoO_4^{2-} , $\text{MgMoO}_{4(\text{aq})}$, $\text{CaMoO}_{4(\text{aq})}$, и незначительным количеством HMoO_4^- и $\text{MoO}_3(\text{H}_2\text{O})_{3(\text{aq})}$. Доля MoO_4^{2-} в русле Шахтамы уменьшается вниз по течению и составляет 72-75 % от общего содержания всех форм молибдена за счет увеличения содержаний аквакомплексов $\text{MgMoO}_{4(\text{aq})}$ и $\text{CaMoO}_{4(\text{aq})}$ (рис. 5.23). Кадмий мигрирует большей частью на всех участках отбора проб в виде свободного Cd^{2+} иона, доля которого несколько снижается за счет увеличения содержания сульфатных и карбонатных аквакомплексов $\text{CdSO}_{4(\text{aq})}$ и $\text{CdCO}_{3(\text{aq})}$. Для Pb, отмечено наибольшее разнообразие форм нахождения, но Pb^{2+} и $\text{PbCO}_{3(\text{aq})}$ доминируют. Доля сульфатных форм в образце 5 (24 %) после снижения техногенной нагрузки сменяется образованием карбонатных комплексов. $\text{PbCO}_{3(\text{aq})}$, $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{2-}$, и PbHCO_3^+ , что, вероятно, связано с изменением pH в сторону подщелачивания.

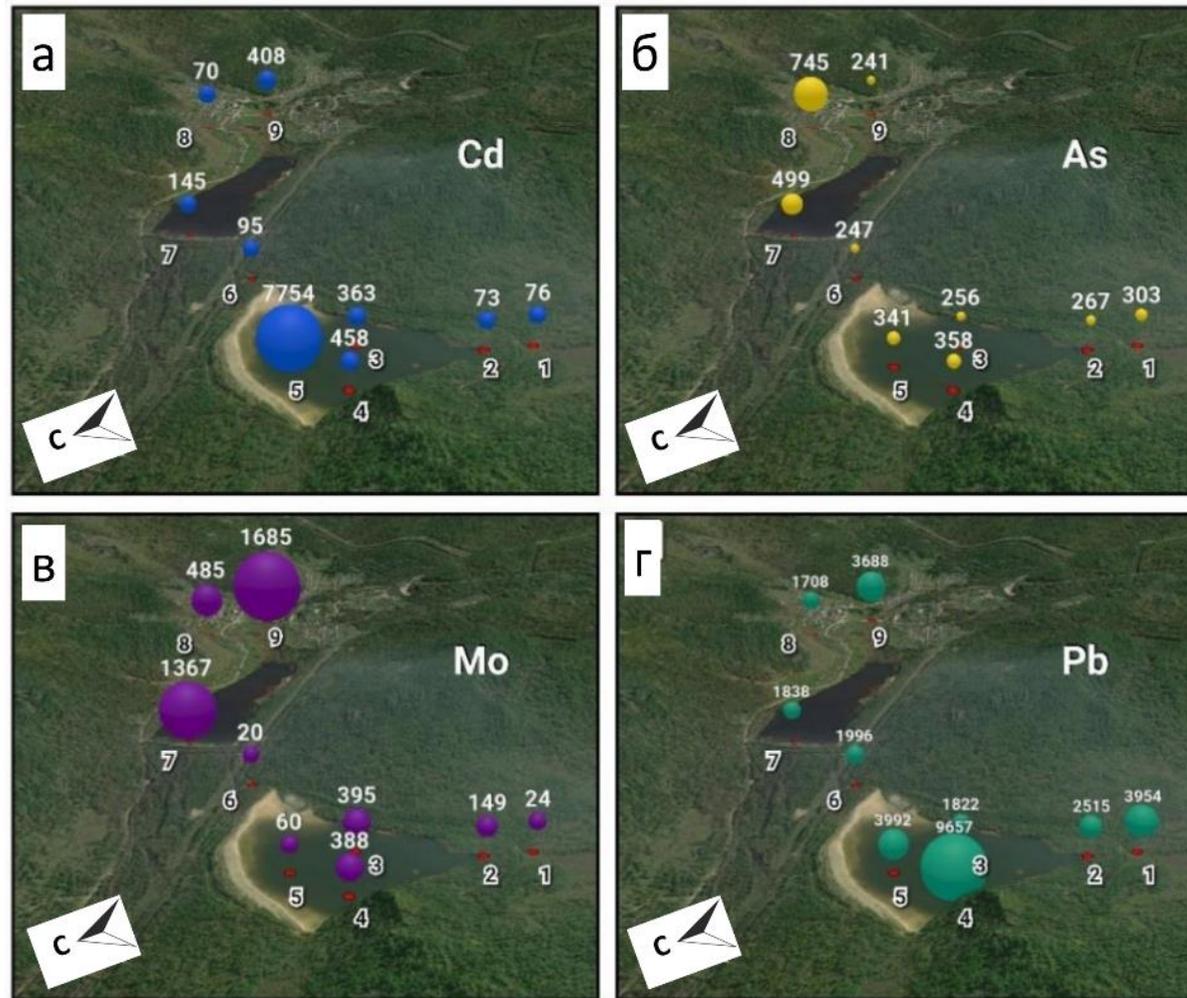


Рисунок 5.22 – Гидрохимические аномалии Cd (а), As (б), Mo (в) и Pb (г) в пробах поверхностных и подземных вод в районе Шахтаминского хвостохранилища. Цифрами обозначен коэффициент превышения кларка для речных вод [Taylor & McLennan, 1985]

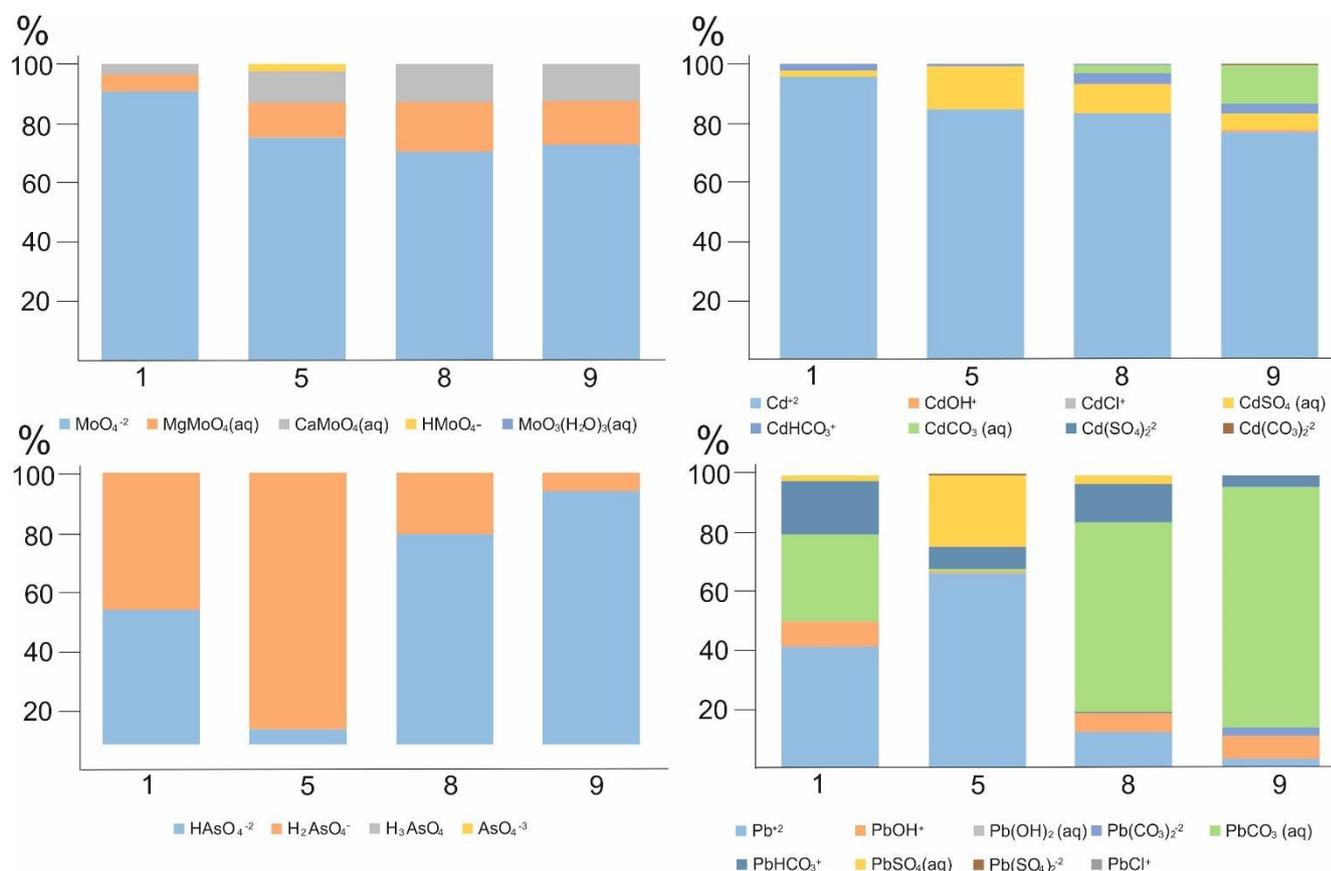


Рисунок 5.23 – Доли химических форм Cd, As, Mo и Pb (в % от общего содержания всех форм элемента) в прудах на поверхности хвостохранилища (пробы 1, 5), р. Шахтама (проба 8) и скважине подземных вод (проба 9). Карта отбора проб представлена на рисунке 3.5

Формы миграции мышьяка в основном представлены HAsO_4^{2-} и H_2AsO_4^- комплексами. При изменении физико-химических условий в скважине и реке, HAsO_4^{2-} является преобладающим комплексом, в то время как в техногенном пруду мышьяк в основном представлен H_2AsO_4^- .

Основными минеральными фазами, по отношению к которым растворы пруда на поверхности хвостохранилища являются пересыщенными, являются Al-гидроксиды и гидросульфаты (табл. 5.12). Поверхность новообразованных гидроксидов алюминия обладает высокой сорбционной емкостью. Металлы и элементы-примеси, находящиеся в растворенной части исследуемых водоемов в районе хвостохранилищ Шахтаминского рудника, могут сорбироваться на поверхности таких минералов и соосаждаться с ними. Благодаря этому процессу такие водоемы обладают высоким потенциалом самоочищения.

Таблица 5.12 – Индексы насыщения растворов по отношению к минеральным фазам ручья, выходящего на поверхность хвостохранилища из распадка (1), пруда на поверхности хвостохранилища (5), реки Шахтама (8), скважины питьевой воды (9). Карта отбора проб представлена на рисунке 3.5

Минеральная фаза	Индексы насыщения растворов по отношению к минеральным фазам			
	1	5	8	9
Диаспор	3.4	3.5	2.7	2
Гиббсит	2.5	2.6	1.8	1.2
Al(OH) ₃	2	2	1.3	0.61
Бёмит	1.7	1.8	1	0.32
Al ₂ O ₃ (s)	0.87	1	-0.52	-1.9
Al ₄ (OH) ₁₀ SO ₄ (s)	0.6	4.3	-2.4	-6.6
Алунит	-1	5.4	-2.6	-7.2
PbMoO ₄ (s)	-0.63	-0.25	0.39	-1
Гидроксиапатит	-7.3	-13	-1.4	0.34
Доломит	-4.2	-6.7	-0.92	0.29
Кальцит	-2.1	-3.2	-0.36	0.27
Арагонит	-2.2	-3.4	-0.5	0.13

5.6. Дарасунское хвостохранилище

5.6.1. Состав аномалий в поверхностных водах

Вода поверхностных водотоков (пробы Д-1, Д-4, карта пробоотбора приведена на рис. 3.6) характеризуется нейтральной реакцией (pH 7.40), минерализацией 1-1.2 г/л, преобладанием сульфатных анионов над хлоридными и гидрокарбонатными анионами (табл. 5.13). В старом отвале концентрация цианид-анионов составляет 4 г/л, что определяет высокое процентное содержание CN⁻ (65 %) в основном анионном составе (проба Д-11, табл. 5.13). Образцы осушенной

пульпы содержат 700 мг/л CN^- (44 %). В основном катионном составе дренажных водотоков преобладают Ca и Mg, за исключением старого отвала (проба Д-11), где основным анионом является натрий (91%). После смешения реки Дарасун с дренажными водотоками растворы нейтральны, минерализация 0.8 г/л, преобладают сульфатные (78 %) и гидрокарбонатные (18 %) анионы.

В составе поверхностных вод Дарасунской техногенной системы обнаружен широкий спектр микроэлементов. Среди этих элементов выделяется группа типичных рудных компонентов (Fe, Cu, Zn, Cd, Pb), примеси (As, Sb, Be, Tl) и благородные металлы (Ag, Au) (табл. 5.14).

Для лучшего понимания механизмов миграции элементов были рассчитаны их формы нахождения в растворе. Химические соединения типичных рудных металлов (Cu, Zn, Cd, Pb) в фоновой точке (ДБ-1) и в водотоках, подвергающихся техногенному воздействию, различаются. Цинк и кадмий находятся в растворе преимущественно в виде свободных катионов со степенью окисления 2+ (Zn^{2+} , Cd^{2+}) с некоторым количеством карбонатных и сульфатных форм. Свинец и медь присутствуют здесь преимущественно в виде карбонатных комплексов $\text{PbCO}_{3(\text{aq})}$ (65 %), $\text{PbHCO}_3^+(\text{aq})$ (11 %), $\text{CuCO}_{3(\text{aq})}$ (81%). Таллий в фоновой воде представлен преимущественно свободным катионом Tl^+ 99,4 %. Бериллий же проявляет типичные свойства комплексообразователя, его основной формой в природной воде является $\text{Be}(\text{OH})_{2(\text{aq})}$ (99.9 %), остальные 0.1 % приходятся на Be^{2+} и $\text{BeCO}_{3(\text{aq})}$ (рис. 62).

В кислом сульфатном рудничном дренаже (проба Д-3, pH 3.6) доля комплексов сульфата таллия увеличивается до 11 %, остальные 89 % присутствуют в виде свободного катиона Tl^+ . В соотношении форм Cu, Zn, Cd в сульфатных водах около 65 % составляют свободные катионы, остальные 35 % – сульфатные комплексы $\text{MeSO}_{4(\text{aq})}$, $\text{Me}(\text{SO}_4)_2^{2-}$. Серебро также проявляет типичные катионные свойства, при этом на Ag^+ приходится 59 % всех его форм, на хлоридные комплексы $\text{AgCl}_{(\text{aq})}$ приходится 31 %, на сульфатные комплексы AgSO_4^- приходится лишь 5.5 %, появляются цианиды $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ (4.5 %).

Только Рb в дренажных водах (проба Д-3) характеризуется преобладанием доли сульфатных комплексов над другими формами (52 %), что объясняется малой растворимостью его сульфатов. Что касается комплексообразующих ионов, то Be^{2+} и Au^{3+} по-разному ведут себя в кислых сульфатных растворах. Доля свободного катиона Be^{2+} составляет 77 %, и только 23 % представлены сульфатными комплексами $\text{BeSO}_{4(\text{aq})}$, $\text{Be}(\text{SO}_4)_2^{2-}$. Напротив, доля свободного катиона Au^{3+} в кислых дренажных водах составляет всего 1 %. Растворенные формы золота представлены преимущественно гидроксидными комплексами $\text{Au}(\text{OH})_4^-$ (68 %) и AuOH_2^+ (31 %) (рис. 5.24).

Таблица 5.13 – Физико-химические параметры, концентрации анионов, катионов и породообразующих элементов (мг/л) в поверхностных водах хвостохранилища Дарасунского рудника. Д-1 ÷ ДФ-2 – названия проб воды, карта отбора проб приведена на рисунке 3.6

Параметр	Дренаж				Река Дарасун до впадения дренажа						Технологические пруды			Река Дарасун после впадения дренажа		Фоновые точки	
	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5	Д-6	Д-7	Д-8	Д-9	Д-10	Д-11	Д-12	Д-13	Д-14	Д-15	ДФ-1	ДФ-2
рН	7.40	4.30	3.60	6.10	7.00	7.00	7.30	6.90	7.20	6.80	8.90	6.90	7.40	7.40	7.10	7.50	7.10
Eh, мВ	480	510	560	540	500	500	490	480	480	460	340	360	340	440	450	480	480
УЭП, мкСм/см	1100	1900	2300	1300	300	250	390	405	830	170	5800	2300	2400	1700	1100	180	84
CN ⁻	0.09	0.09	0.13	0.21	0.09	0.09	0.09	0.09	0.35	0.09	4000	1200	500	0.37	0.32	0.08	0.14
SO ₄ ²⁻	540	1400	1600	810	64	23	97	92	210	55	2000	1500	1500	780	420	32	27
Cl ⁻	15	11	12	9.5	0.20	0.50	12	13	18	0.40	1000	50.0	43	25	13	0.50	0.50
HCO ₃ ⁻	210	9.2	0.0	24	130	120	130	140	220	49	760	49	98	140	130	82	40
Ca	210	290	410	220	34	26	34	43	110	14	87	390	430	320	170	16	7.0
Mg	40	77	93	36	12	7.2	11	13	23	4.0	13	53	46	53	31	6.8	2.2
Na	23	24	26	22	8.7	8.7	14	15	18	8.6	1300	80	77	52	34	6.3	6.6
K	4.3	6.9	7.8	4.3	1.7	1.5	4.2	5.3	2.9	2.2	12	33	36	12	6.1	0.78	1.4
Mn	2.3	10	13	1.4	0.02	0.031	0.031	0.041	2.1	0.015	0.026	0.50	0.29	3.9	0.35	0.012	0.011
Fe	0.38	15	3.8	0.15	0.28	0.026	0.080	0.046	0.26	0.073	0.042	0.26	0.68	0.20	0.032	0.058	0.087
Si	7.3	5.0	7.7	4.8	6.2	6.1	0.84	2.6	6.3	0.98	1.1	2.2	3.8	4.5	5.2	4.6	3.4
Al	0.35	20	30	0.20	0.023	0.017	0.036	0.019	0.045	0.017	0.54	0.2	0.25	0.066	0.14	0.027	0.028

Таблица 5.14 – Содержание микроэлементов в поверхностных водах хвостохранилища Дарасунской техногенной системы. Концентрации As÷Cd - мкг/л; Вi÷Ве - нг/л. Д-1 ÷ДФ-2 – проб воды, карта приведена на рис. 3.6, описание – таблица 5.13

Параметр	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5	Д-6	Д-7	Д-8	Д-9	Д-10	Д-11	Д-12	Д-13	Д-14	Д-15	ДФ-1	ДФ-2
As	83	8.6	240	6.9	37	1.3	11	71	88	22	350	4.5	3.9	65	27	1.1	1.9
P	57	1.0	8.8	1.0	20	1.3	31	22	8	31	8.0	1.0	1.0	23	1.0	3.2	6.3
Sb	37	25	26	18	9.1	0.27	1.4	1.6	10	1.0	1100	10	6.3	18	7.5	1.1	0.36
Zn	31	7500	12000	350	8.7	5.2	10	8.1	14	11	16	37	24	23	25	6.4	5.9
Cu	22	9300	13000	23	12	2.2	6.6	11	30	7.9	230000	190	370	500	710	2.3	3.0
Ba	16	34	5.3	8.2	19	14	19	26	42	26	0.50	29	32	68	7	11	5.0
Pb	7.7	32	6.8	4.2	1.6	1.8	4.1	1.3	6.4	1.6	1.8	4.6	2.5	2.6	3.0	1.3	1.2
Ni	7.0	260	330	24	1.7	0.74	2.0	3.1	4.5	1.8	150	15	8.8	18	7.1	1.4	1.2
Li	5.0	280	500	14	2.4	3.6	2.0	2.3	4.0	8.5	4.6	27	26	14	10	4.0	1.8
Ti	3.9	2.8	4.6	2.2	1.4	1.2	0.85	0.67	1.4	0.50	1.2	1.9	7.0	0.97	2.1	0.99	0.93
Rb	2.4	6.5	15	15	1.0	0.75	1.4	1.2	1.2	1.4	3.0	48	55	8.8	4.3	0.56	1.2
Co	2.0	190	250	21	0.20	0.15	0.26	0.26	2.2	0.22	150	4.9	2.3	20	6.8	0.11	0.089
Mo	1.1	0.56	0.20	2.1	0.88	1.0	0.88	1.5	3.1	0.50	95	22	23	7.1	2.9	0.49	1.2
Cr	0.56	1.1	2.5	0.19	0.34	0.18	0.29	0.34	0.32	0.28	2.5	0.25	0.21	0.30	0.10	0.25	0.26
V	0.52	0.27	1.0	0.05	0.60	0.46	0.85	0.99	0.46	0.21	1.8	0.05	1.4	2.0	0.53	0.16	0.29
Cd	0.33	59	100	3	0.19	0.11	0.15	0.13	0.19	0.18	0.32	0.32	0.20	0.27	0.88	0.17	0.10
Bi	230	82	95	53	29	14	25	68	4700	24	10	10	33	10	10	12	11
Te	160	5.0	120	5.0	35	5.0	36	31	3000	18	32	27	29	67	5.0	5.0	11
Ag	140	83	510	50	10	10	10	10	18	11	3800	10	100	20	18	12	10
W	130	71	110	150	23	14	38	12	360	18	26000	2200	5200	220	50	11	15
Se	50	50	3400	740	180	50	270	63	420	91	32000	1100	44	50	50	50	14
Sn	50	69	28	6.8	43	35	30	74	170	120	140	61	61	150	52	41	35
Tl	42	140	250	130	6.5	4.0	5.1	10	65	6.7	1.0	160	39	87	42	7.3	3.1
Au	31	13	65	1600	5.1	5.0	5.0	5.0	5.0	24	130000	32000	6000	7100	2300	5.0	5.0

Продолжение таблицы 5.14

Параметр	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5	Д-6	Д-7	Д-8	Д-9	Д-10	Д-11	Д-12	Д-13	Д-14	Д-15	ДФ-1	ДФ-2
In	5.8	5.0	12	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.7	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Be	5.0	860	1400	5.0	5.0	5.0	7.6	10	5.0	6.8	5.0	5.0	5.0	17	21	5.6	13

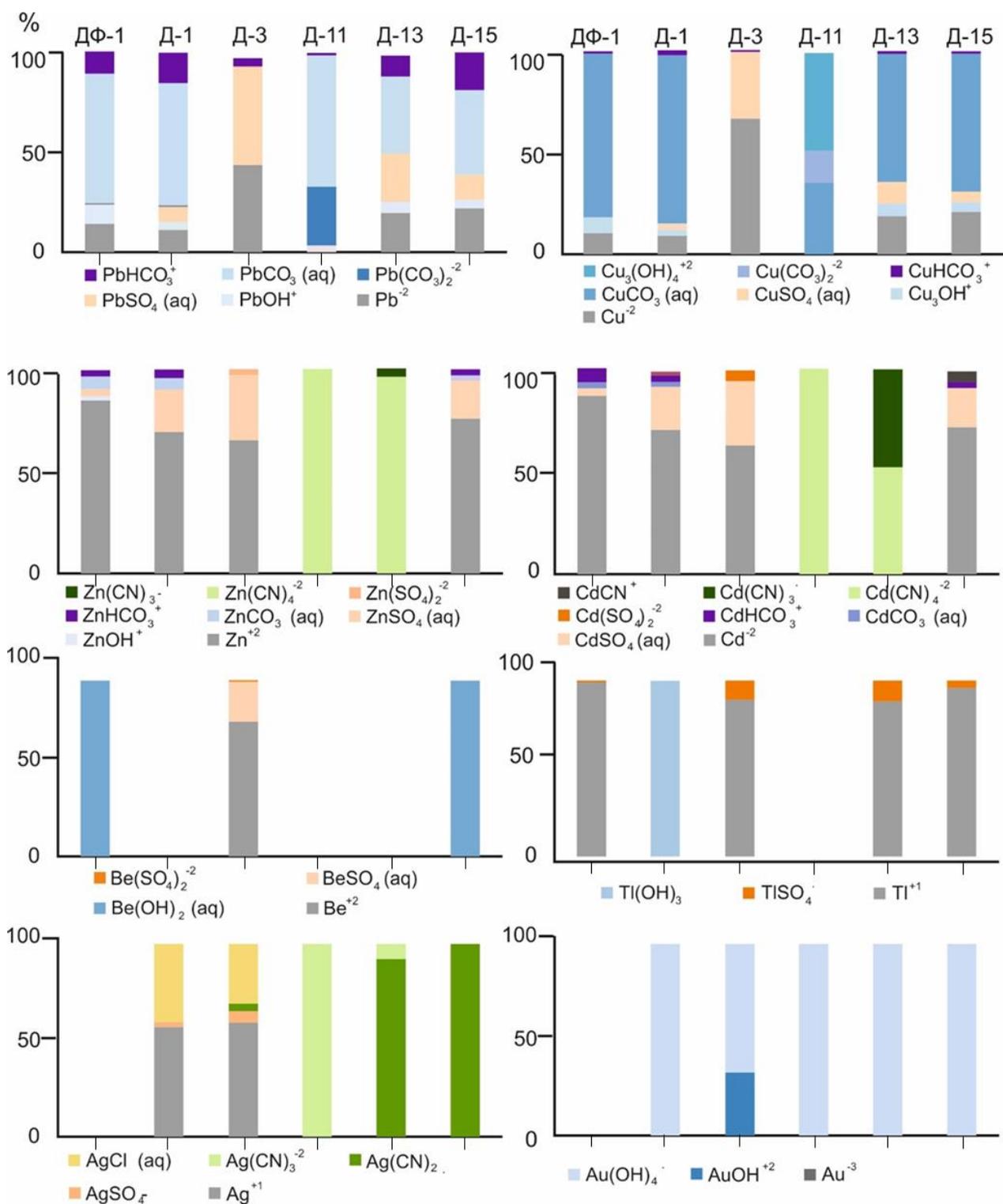


Рисунок 5.24 – Доли химических форм элементов (в % от общего содержания всех форм) в дренаже (Д-1, Д-3), технологических прудах (Д-11, Д-13), реке Дарасун после впадения дренажа (Д-15) и в фоновой точке (ДФ-1)

В слабощелочных водах старого гидроотвала с повышенным содержанием цианидов (Д-11), основные формы Zn, Cd, и Ag – цианидные комплексы. Свинец

представлен в форме карбонатных комплексов $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{2-}$ (29 %), $\text{PbCO}_{3(\text{aq})}$ (66 %), и гидроксидов PbOH^+ (5 %). Медь представлена гидроксидными комплексами $\text{Cu}_3(\text{OH})_4^{2+}$ (48 %) и карбонатами $\text{CuCO}_{3(\text{aq})}$ (34 %), $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{2-}$ (16 %). Преобладающей формой Au является гидроксидный комплекс $\text{Au}(\text{OH})_4^-$ (рис. 5.24).

Доля свободных катионов Cd^{2+} , Zn^{2+} в реке Дарасун ниже хвостохранилища (Д-15) преобладает (70-75 %), но сульфатных комплексов в общем балансе значительно больше, чем в фоновой точке (18 % против 3 %). Доля свободных катионов Pb^{2+} и Cu^{2+} , а также их сульфатных комплексов на 10 % выше, чем в фоновых образцах, карбонатов и бикарбонатов, наоборот, меньше на 20 %, но они составляют основную часть всех форм свинца и меди. Аналогично увеличилась доля сульфатных комплексов таллия TlSO_4^- до 5 % (по сравнению с 0.6 % в фоновой реке), хотя основной ее формой является свободный катион Tl^+ (95 %). Что касается бериллия, то доля его сульфатных комплексов незначительна (0.01%), несколько повышено содержание Be^{2+} (0.1%), но основной формой является $\text{Be}(\text{OH})_{2(\text{aq})}$, как и в фоновом водоеме. Серебро мигрирует в р. Дарасун в виде цианидного комплекса $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$, а Au - в виде гидроксида $\text{Au}(\text{OH})_4^-$ (рис. 5.24).

Сравнение химических форм элементов в реке Дарасун ниже по течению от Дарасунской техногенной системы с таковыми в фоновой точке (р. Жарча) выявило однозначную тенденцию: доля свободных катионов и сульфатных комплексов металлов Cu, Zn, Cd, Pb увеличивается примерно в 10 раз, доля карбонатных комплексов уменьшается на 20 % в результате техногенного воздействия на водоток. Незначительное увеличение доли свободных катионных и сульфатных форм характерно также для Be и Tl. Благородные металлы Ag и Au связаны цианидными, хлоридными и гидроксокомплексами.

5.6.2. Механизмы гиперкриогенной трансформации сульфидсодержащих отходов

При окислении сульфидные минералы разрушаются с образованием кислоты в сезонно-талом слое, так как активная зона гиперкриогенеза образуется за счет

действия замерзания и оттаивания воды при перепаде температуры, металлов и металлоидов из других сульфидных минералов выщелачиваются (арсенопирит, галенит, сфалерит) (реакции 5.18-5.20) [Смирнов, 1955; Плюснин, Гунин, 1997; Parbhakar-Fox and Lottermoser 2015; Hawkins, 2014; Acero et al., 2007]:



Кроме того, в сульфидных отходах протекает реакция окисления пирита с остатками цианидных реагентов с образованием тиоцианат-иона (реакция 5.21) [Breuer et al., 2008; Parbhakar-Fox, 2016]:



Благородные металлы (Ag, Au) вступают в реакцию с цианид-анионом с образованием подвижных растворимых цианидных комплексов (реакция 5.22) [Marsden and House, 2006; Parbhakar-Fox, 2016]:



Медь также охотно вступает в реакцию с цианид-ионами (реакция 5.23) [Ghasemi et al., 2018]:



Длительное взаимодействие тиоцианат-иона с кислородом воздуха приводит к его разложению с образованием сульфат-, бикарбонат-ионов и аммиака (реакция 5.24) [Treatment, 2020]:



Изучение вещественного состава отходов Дарасунского месторождения показало наличие горизонтов, в которых происходит выщелачивание и вынос трех групп химических элементов в зоне гиперкриогенеза: рудных элементов (Fe, Cu, Zn, Cd, Pb), благородных металлов и металлоидов (Au, Ag, As, Sb) и элементов-примесей (Be, Tl). Первые поступают в раствор за счет окисления сульфидных минералов (реакции 5.18-5.21). Золото и серебро мигрируют с водным раствором как в виде коллоидных примесей, так и за счет образования собственных растворимых комплексных соединений с цианидными лигандами (реакция 5.22).

Альтернативным путем поступления меди в раствор из исследованных отходов также является комплексообразование с цианид-анионами. Результаты корреляционного анализа подтверждают такой путь миграции в водных растворах: $KK (Au-CN^-) = 0.97$, $KK (Ag-CN^-) = 0.99$, $KK (Cu-CN^-) = 1$ (табл. 5.15).

Что касается Tl, Be, не образующих в отходах собственных сульфидов, то возможны два варианта ввода в раствор. Во-первых, это растворение вторичных сульфатных минералов. Второй – разрушение сульфидных минералов, в которых они являются примесями. Этот механизм подтверждается положительными значимыми коэффициентами корреляции концентраций этих элементов и сульфат-ионов в растворе: $KK (Tl-SO_4^{2-}) = 0.59$, $KK (Be-SO_4^{2-}) = 0.45$; при отсутствии какой-либо значимой корреляции между концентрациями этих элементов и других анионов в растворе.

Изучение состава поверхностных водотоков вокруг складированных отходов выявило три группы гидрохимических аномалий, свидетельствующих о подвижности химических элементов в системе «дренажные воды-природные поверхностные воды» (табл. 5.15):

- 1) Pb-Co-Ni-Zn-Cd-Cu-Fe-Al-Tl-Be-In типичные рудные металлы и элементы-примеси (Tl, Be, In). Высокие коэффициенты корреляции этих элементов со значениями pH, концентрациями Fe, Al, Mn и SO_4^{2-} указывают на то, что 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 CN^- , Cl^- , HCO_3^- анионами.
- 3) Bi-Sn-Te являются постпереходными металлами и металлоидами, концентрации которых коррелируют только друг с другом при отсутствии значимых корреляций с другими компонентами,

кислотностью или анионами. Их поведение контролируется растворимостью собственных минералов: Bi_2Te_3 , Bi_2S_3 , SnTe , SnS .

Изучение пространственного распределения концентраций элементов в поверхностных водотоках позволило определить гидрохимические аномалии в водах, подверженных антропогенному воздействию. Концентрации химических элементов нормированы на средние концентрации элементов в речных водах Западной Сибири для оценки обогащения относительно регионального фона (РФ) (Shvartsev et al., 1996). Концентрации Zn, Cd в отвале на заводе выше, чем таковые для регионального фона и фоновых концентраций на 2-3 порядка (проба Д-11, табл. 5.14), в реке Дарасун после слияния с техногенным потоком (Д-15), их концентрация выше фоновых показателей. Концентрация Pb выше РФ в фоновой точке, в дренажном стоке и в реке Дарасун после дренажного сброса. Tl обнаружен во всех исследованных образцах. Его концентрация в шесть раз превышает фоновую в реке Дарасун после слияния с техногенным потоком (Д-15). Be обнаружен в кислых водах заводской свалки (рН 3.60) в концентрации 1.4 мкг/л, что на три порядка превышает фоновое значение (табл. 5.14). В нижнем течении реки Дарасун содержится в 3-4 раза больше Be, чем в фоновой точке. Эти факты свидетельствуют о высокой подвижности примесных элементов Tl и Be даже в нейтральной среде.

Концентрации As и Sb повышены по сравнению с фоновыми показателями во всех техногенных водотоках, накапливаются в слабощелочных водах (рН 8.90) старого гидроотвала, аналогично золоту и серебру (Д-11, табл. 5.14), значительно превышают фоновые в р. Дарасун ниже хвостохранилища (Д-15, табл. 5.14).

Концентрация Ag и Au в отстойнике значительно превышала фоновый уровень (проба Д-3, табл. 5.14), а в старом технологическом пруду концентрация Au в растворе составляет 130 мкг/л, что на четыре порядка выше фоновой (проба Д-11, табл. 5.14). Коэффициенты обогащения (КО) растворенного золота в водах бассейна р. Дарасун были рассчитаны и визуализированы в виде карт аномалий (формула 5.25, рис. 5.25).

$$КО = \frac{C_{Au}}{\text{фоновая концентрация}_{Au}}, \quad (5.25)$$

где C_{Au} – концентрация растворенного Au в воде, нг/л;

фоновая концентрация_{Au} – средняя концентрация Au в фоновых речных водах (5 нг/л) согласно данным из табл. 5.14.

Таблица 5.15 – Коэффициенты корреляции для рН, электропроводности (χ) и химических веществ в поверхностных водах р. Дарасун (n=15)

	pH	χ	CN ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Li	Be	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Ag	Au	Al	Pb	In	Tl	Bi	Sn	As	Sb	Te
pH	1																									
χ	0,12	1																								
CN ⁻	0,45	0,87	1																							
SO ₄ ⁻	-0,22	0,90	0,63	1																						
Cl ⁻	0,44	0,85	0,96	0,54	1																					
HCO ₃ ⁻	0,62	0,70	0,86	0,33	0,93	1																				
Li	-0,88	0,23	-0,11	0,48	-0,10	-0,29	1																			
Be	-0,89	0,21	-0,13	0,45	-0,09	-0,28	1,00	1																		
Mn	-0,87	0,22	-0,17	0,47	-0,13	-0,28	0,95	0,95	1																	
Fe	-0,70	0,15	-0,11	0,38	-0,09	-0,24	0,65	0,69	0,73	1																
Co	-0,65	0,58	0,31	0,68	0,36	0,15	0,88	0,89	0,85	0,66	1															
Ni	-0,72	0,51	0,21	0,65	0,26	0,04	0,92	0,93	0,89	0,70	0,99	1														
Cu	0,38	0,84	0,95	0,54	1,00	0,91	-0,03	-0,02	-0,07	-0,04	0,42	0,32	1,00													
Zn	-0,89	0,21	-0,13	0,46	-0,09	-0,28	1,00	1,00	0,96	0,69	0,89	0,93	-0,02	1												
Cd	-0,89	0,21	-0,12	0,46	-0,09	-0,28	1,00	1,00	0,95	0,67	0,89	0,93	-0,02	1,00	1											
Ag	0,35	0,85	0,94	0,57	0,99	0,90	0,02	0,02	-0,03	-0,05	0,46	0,36	1,00	0,02	0,02	1										
Au	0,45	0,87	0,99	0,60	0,98	0,89	-0,12	-0,12	-0,16	-0,11	0,32	0,22	0,97	-0,12	-0,12	0,96	1									
Al	-0,89	0,22	-0,11	0,47	-0,08	-0,27	0,99	1,00	0,96	0,71	0,90	0,94	-0,01	1,00	1,00	0,03	-0,11	1								
Pb	-0,62	0,13	-0,12	0,35	-0,11	-0,21	0,54	0,58	0,67	0,96	0,56	0,60	-0,07	0,58	0,56	-0,09	-0,12	0,60	1							
In	-0,66	0,16	-0,11	0,32	-0,08	-0,18	0,85	0,82	0,75	0,17	0,68	0,71	-0,02	0,82	0,84	0,05	-0,10	0,81	0,08	1						
Tl	-0,78	0,27	-0,11	0,59	-0,18	-0,37	0,79	0,77	0,81	0,47	0,65	0,69	-0,16	0,77	0,77	-0,11	-0,12	0,76	0,46	0,69	1					
Bi	0,07	-0,09	-0,10	-0,16	-0,07	0,12	-0,08	-0,08	0,02	-0,06	-0,11	-0,10	-0,08	-0,08	-0,08	-0,08	-0,10	-0,08	0,07	0,04	0,03	1				
Sn	0,35	0,34	0,35	0,13	0,39	0,51	-0,20	-0,19	-0,04	-0,05	0,01	-0,04	0,37	-0,20	-0,20	0,35	0,39	-0,19	-0,01	-0,18	-0,14	0,55	1			
As	0,04	0,76	0,70	0,55	0,78	0,74	0,36	0,35	0,31	-0,02	0,64	0,57	0,81	0,35	0,36	0,85	0,73	0,35	-0,07	0,50	0,19	0,08	0,37	1		
Sb	0,42	0,83	0,95	0,53	1,00	0,93	-0,07	-0,07	-0,11	-0,07	0,38	0,28	1,00	-0,07	-0,07	0,99	0,97	-0,06	-0,09	-0,06	-0,18	-0,07	0,38	0,80	1	
Te	0,08	-0,08	-0,09	-0,16	-0,06	0,13	-0,08	-0,07	0,03	-0,07	-0,10	-0,10	-0,07	-0,07	-0,07	-0,07	-0,09	-0,07	0,05	0,06	0,04	1,00	0,56	0,10	-0,06	1
Se	0,37	0,85	0,95	0,55	0,99	0,91	-0,01	-0,01	-0,06	-0,07	0,43	0,33	1,00	-0,01	0,00	1,00	0,97	0,00	-0,11	0,02	-0,12	-0,07	0,36	0,83	0,99	-0,06

Повышенные концентрации Au обнаружены во всех исследованных пробах, но концентрация в р. Дарасун ниже техногенной системы (2.3 мкг/л) превышала фон в 460 раз (рис. 5.25). Миграция Au в данном случае происходит за счет выноса растворенных форм с технической водой и дренажными стоками от мест хранения цианидных отходов и комплексообразования с цианид-анионами.

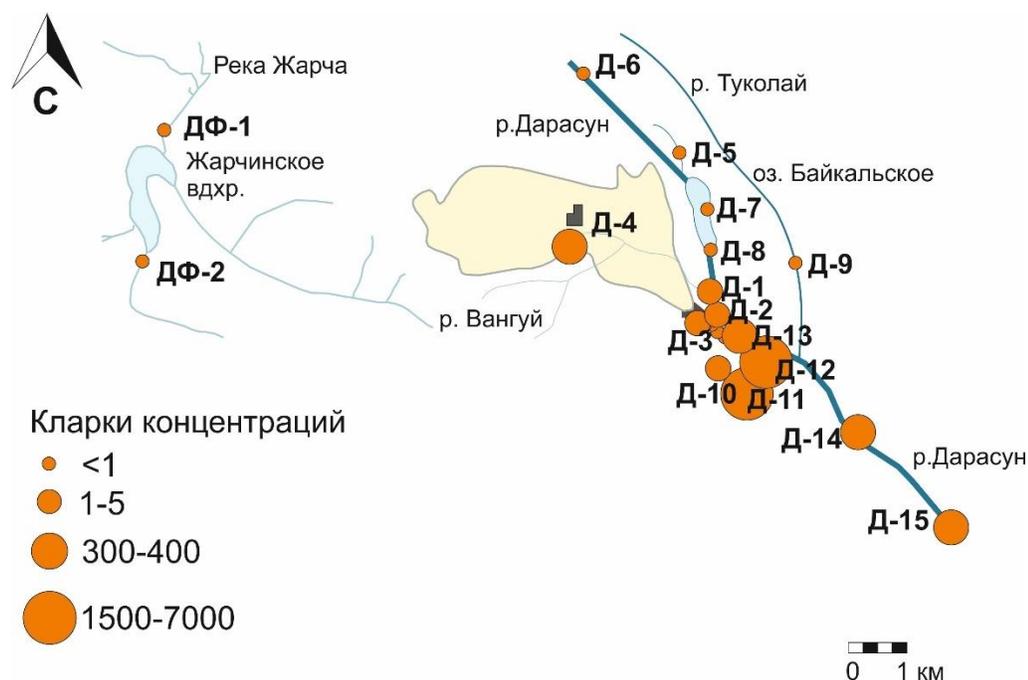


Рисунок 5.25 – Кларки концентраций (КК) Au в дренаже (Д-1 ÷ Д-4), технологических прудах (Д-11 ÷ Д-13), р. Дарасун до (Д-6 ÷ Д-8, Д-10) и после впадения дренажа (Д-14 ÷ Д-15), фоновые точки (ДФ-1 ÷ ДФ-2)

Концентрации общего As и цианид-ионов в исследуемых водах сравнивались с предельно допустимой в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_в) [СанПиН 1.2.3685-21] и визуализировались в виде карт гидрохимических аномалий (рис. 5.26).

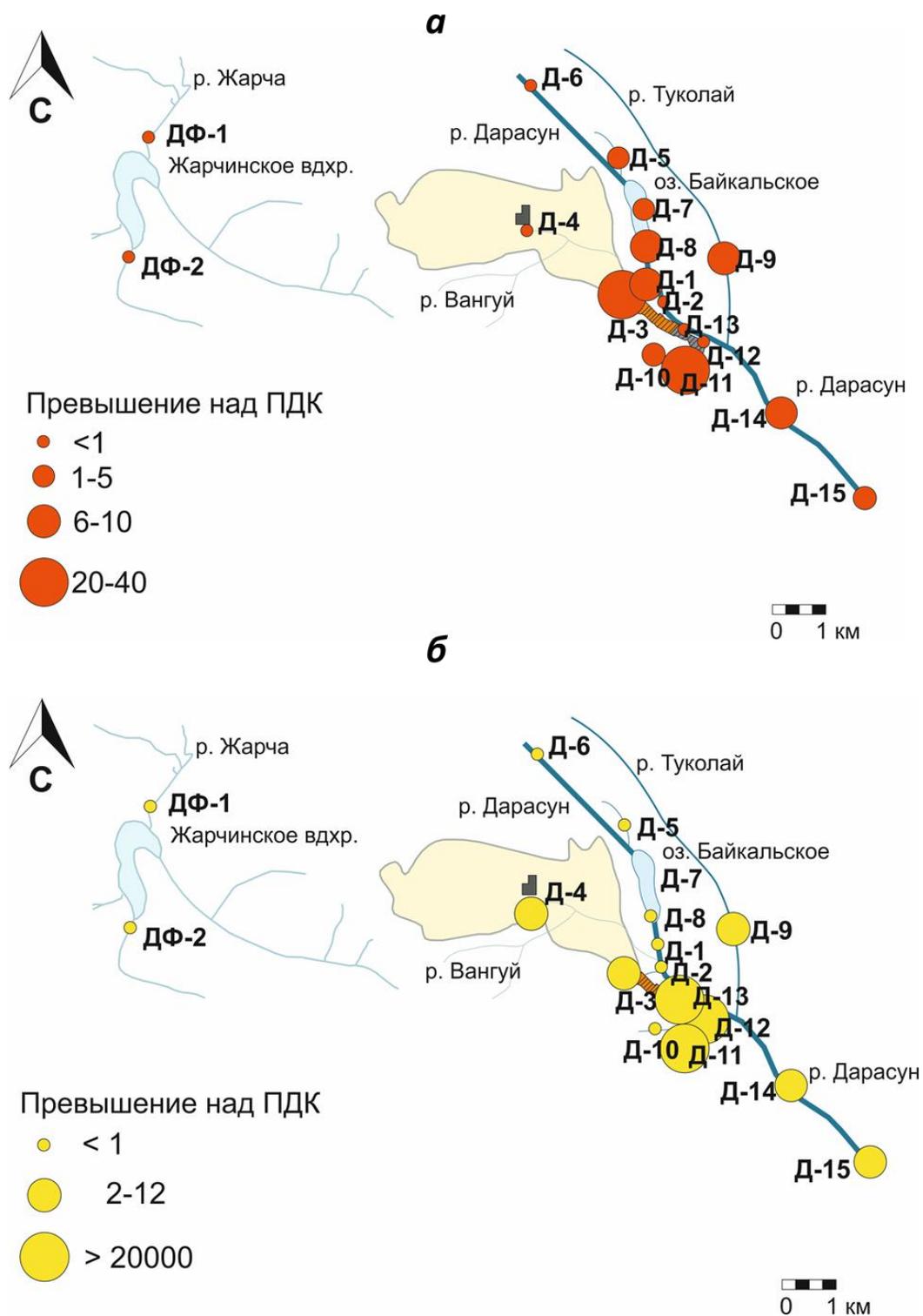


Рисунок 5.26 – Кларки концентраций (КК) As (а) и Mo (б) в дренаже (Д-1 ÷ Д-4), технологических прудах (Д-11 ÷ Д-13), р. Дарасун до (Д-6 ÷ Д-8, Д-10) и после впадения дренажа (Д-14 ÷ Д-15), фоновые точки (ДФ-1 ÷ ДФ-2)

В хвостохранилищах заброшенного Дарасунского рудника произошла активная гиперкриогенная трансформация, окисление отходов, выщелачивание химических элементов, образование высокоминерализованных сульфатных и цианидных растворов. Промытые окисленные горизонты характеризуются высокими электрическими сопротивлениями. Геохимические барьеры с высокой концентрацией металлов находятся во влажных «тонких» слоях с низким удельным сопротивлением. Предполагается, что процессы кислотообразования в сезонно-талом слое оказывают дополнительное оттаивающее воздействие на нижележащие мерзлые горизонты, что в конечном итоге приводит к выщелачиванию из них широкого спектра элементов и переходу их в раствор в подвижных формах. Зона протаивания хорошо визуализируется на геоэлектрическом разрезе как область низких удельных сопротивлений, в связи с чем метод электротомографии может быть использован в дальнейшем для наблюдения за динамикой трансформации тела хвостохранилища в более глубоких горизонтах.

Дренажный сток хвостохранилища Дарасунского рудника представлен высокоминерализованными, кислыми, сульфатными растворами с высоким содержанием цианид-анионов, широкого спектра металлов и металлоидов. При попадании в природные водотоки некоторые химические соединения смешиваются, нейтрализуются и выпадают в осадок за счет кислотной нейтрализации и осаждения.

Дренажный сток хвостохранилища Дарасунского рудника представлен высокоминерализованными, кислыми, сульфатными растворами с высоким уровнем цианид-анионов, широким спектром металлов и металлоидов. При попадании в природные водотоки часть элементов связывается с CN^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- лигандами в подвижные соединения (что позволяет им мигрировать на расстояния до 10 км), другая часть соединений выпадает в осадок за счет нейтрализации.

Совместное действие двух факторов: окисление кислородом воздуха и воды, а также комплексообразование с цианид-анионами, способствует переходу из отходов

в раствор и миграции с водными потоками целого ряда элементов, в том числе элементов 1-го класса опасности (Pb, Be) и цианид-анионов на расстояние до 10 км от складированных отходов.

Итак, 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 и благородные, но и токсичные элементы-примеси, например, талий и мышьяк. Техногенное воздействие отмечается на расстоянии до 10 км от хранилищ.

ГЛАВА 6. РАСЧЕТ ОБЪЕМОВ ТЕХНОГЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ, РЕСУРСОВ ЦЕННЫХ И ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ЭКОЛОГИЧЕСКИХ УЩЕРБОВ И РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ

Информация об удельной электропроводности вещества отходов (паст, поровых растворов или водных вытяжек) служит важной основой для корректной интерпретации данных геофизической съёмки методами электроразведки. Для водонасыщенных песков такие зависимости между УЭС и свойствами среды хорошо описаны в литературе (например, модель Дахнова-Арчи), в то время как взаимосвязи для техногенных сред, особенностями которых является развитая удельная поверхность, проводящий скелет и высокая ионная проводимость порового раствора, в литературе описаны мало.

Идея, которую автор развивает в последние годы, заключается в том, чтобы эмпирически связать удельное электрическое сопротивление техногенной среды, определяемое методами электроразведки, с химическим составом и физико-химическими свойствами изучаемого вещества путём прямого сопоставления геохимических и геофизических данных в верхних частях разреза и сделать экстраполяцию на глубинные горизонты. Таким образом удаётся спрогнозировать изменение состава отвала на глубине. Такая информация оказывается бесценной при подсчёте объемов техногенного вещества и ресурсов металлов, что в свою очередь важно при оценке экологических ущербов и целесообразности переработки

Новизна подхода заключается в том, что применяется метод микроэлектротомографии с шагом между электродами 30 см и детальностью 15 см для сопоставления результатов химического анализа и УЭС среды. Таким образом становится возможным описать вертикальную зональность отвала при помощи электроразведки и спрогнозировать изменение химического состава на глубину: валовых концентраций элементов и их подвижных форм.

Отметим, что в процессе работы с техногенными объектами различного состава автор получил различные уравнения связи между УЭС, удельной электропроводностью вещества отвалов, его петрофизическими характеристиками, кислотностью среды, концентрациями металлов в твердом веществе и водных вытяжках (подробнее об этом написано в главе 4 по каждому объекту в отдельности).

Данная глава освещает результаты расчётов объемов изученных техногенных тел, ресурсов металлов в твёрдом веществе и их водорастворимых форм на основании комплексной геохимической и геофизической схемы исследований, предлагаемой автором:

- съёмка выделенной площадки хвостохранилища при помощи метода электротомографии и многоэлектродной аппаратуры Скала-48 (Скала-48к12) по профилям длиной 110-935 м с шагом между электродами 5 м, определение зон аномальных удельных электрических сопротивлений;
- построение геоэлектрических разрезов по профилям микроэлектротомографии в зонах с контрастными сопротивлениями, с расстановкой электродов с шагом 30 см, получаемое разрешение – 15 см, глубина зондирования – до 3 м;
- опробование шурфов в наиболее контрастных по сопротивлениям зонах;
- определение электропроводности, сопротивления, физико-химических параметров (рН, Eh) и химического состава твердого вещества, паст и поровых растворов;
- выявление взаимосвязи между удельным электрическим сопротивлением с содержанием химических элементов;
- расчёт объёмов техногенного вещества, ресурсов ценных и токсичных элементов.

Ниже приведены описания схем исследований и технология расчёта объемов и ресурсов металлов для каждого объекта в отдельности с учётом индивидуальных особенностей строения каждого изучаемого объекта, а также в связи с тем, что в

течение всего периода работы автором вносились корректировки в общую схему по мере развития применяемых методов и аппаратуры и представления о способах интерпретации полученных результатов.

6.1. Дюков Лог

Вертикальная неоднородность складированного материала проявлена как в изменениях значений рН и электропроводности растворов, так и в распределении концентраций химических соединений (показано на примере шурфов 2 и 3, глава 4). Обобщив полученные данные, можно сделать вывод о том, что горизонты с наибольшими УЭП (около 2000 мкСм/см) характеризуются самыми низкими значениями рН (около 2 ед.), высокими концентрациями серы (10 мас. %), валовыми содержаниями металлов и их подвижных форм. Данные о распределении химических соединений по глубине в шурфах были сопоставлены с геоэлектрическими разрезами по результатам микроэлектротомографии. Было определено, что горизонтам на глубинах 80-120 см с наибольшими значениями УЭП соответствуют слои с самыми низкими сопротивлениями (около 5 Ом·м, темно-синим на геоэлектрическом разрезе, рис. 4.1).

Полученная информация служит основой для построения объемной модели распределения вещества внутри тела отвала: зная УЭС среды, можно перейти к значениям УЭП, а через них – к составу вещества. Такое построение даёт возможность скорректировать наши представления об объемах отвала, оконтурить его границы (зачастую, как в случае с Дюковым Логом, нам это не известно), рассчитать ресурсы ценных и токсичных элементов с учётом общего содержания водорастворимых форм элементов.

Полученные карты распределения УЭС на разных глубинах по результатам электротомографии показаны на рисунке 6.1. Вещество отвалов определяется сопротивлением до 100 Ом·м. Коренные породы, являющиеся барьерами для хвостов, имеют УЭС более 300 Ом·м. Видим, что на глубине 3 м дорога выделяется полосой повышенного сопротивления. На глубине 5 м в интервале 110-200 м

профиля 3 появляется зона пониженного УЭС (5 Ом·м). Такие сопротивления, как было показано выше при помощи прямых измерений и микроэлектротомографии, соответствуют горизонтам с инфильтрацией высокоминерализованных растворов (слои на глубинах 80-120 см на рис. 4.1). Поэтому такая зона пониженного сопротивления (хорошо видна на картах 15 и 20 м в ЮЗ направлении) интерпретируется как вероятная протечка дренажа через дамбу. На глубине 8 м отложения отвалов уже занимают всю площадь исследования. С глубины 15 м северная часть отвала становится высокоомной, то есть мощность отложений хвостов там не более 15 м. Основная часть отложений отвала расположена в южной части участка. На картах по всем глубинам также наблюдается утечка через нижнюю дамбу. Потоки движения фильтрации на картах нанесены белыми стрелками.

Применение метода электротомографии позволило оконтурить тело техногенной системы, рассчитать его объемы. По самым скромным оценкам совокупный объем отвала Дюков Лог составляет 1200 тыс. м³, что при плотности 1.9 г/см³ (архивные данные СЦОФ) составляет 2.3 млн. тонн.

По данным о среднем элементном составе вещества отходов, которые были получены нами при помощи методам ИСП-МС, мы рассчитали ресурсы ценных и токсичных компонентов в отвалах Дюков Лог (табл. 6.1). Так, при концентрации бария 13 мас. % его ресурсы в этом объекте составляют 161 240 тонн, а масса водорастворимых форм – 1.6 тонны. Аналогичным образом было рассчитано, что общий ресурс мышьяка – 490 тонн. Масса водорастворимого As, то есть подвижного при взаимодействии с атмосферными водами, составляет 10 кг, то есть именно такое количество мышьяка потенциально перейдет в раствор под воздействием окислительных факторов, что будет способствовать медленному отравлению окружающей среды в течение длительного времени.

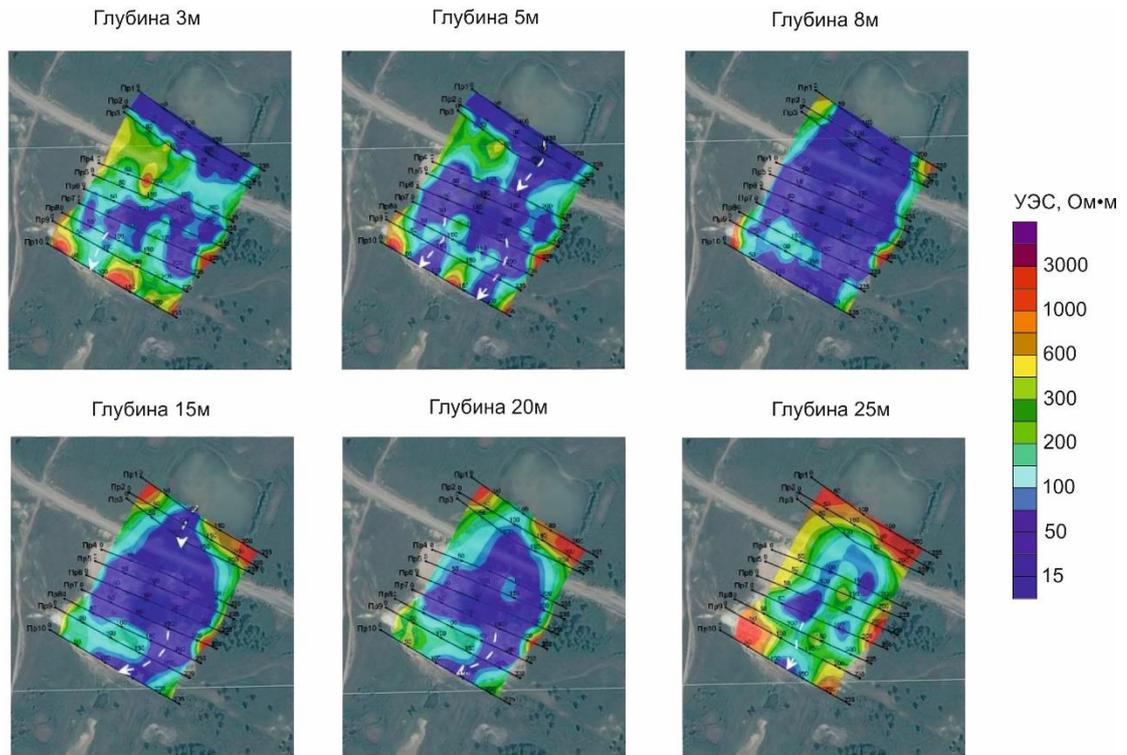


Рисунок 6.1 – Карты распределения УЭС на разных глубинах на участке Дюков Лог

Таблица 6.1 – Валовые концентрации, масса водорастворимых форм, ресурсы химических элементов в отвалах Дюков Лог

	Va	Pb	Cu	Zn	As	Co	Ni	Au	Ag	Cd
Концентрация, г/т	130000	4900	400	3700	400	2.0	7.3	0.25	30	16
Ресурсы, тонн	160000	6000	480	4400	490	2.4	8.8	0.30	36	19
Водорастворимые формы, %	0.001	0.021	0.10	0.28	0.002	0.39	0.29	0.003	0.003	0.575
Водорастворимые формы, тонн	1.6	1.3	0.48	12	0.01	0.009	0.025	$9 \cdot 10^{-6}$	0.001	0.11

6.2. Талмовские Пески

Геоэлектрическая зональность на профилях электротомографии свидетельствует о горизонтально-слоистом строении хвостохранилища, верхняя часть которого (до 15 м глубиной) представляет собой среду с низким УЭС 0.1-50 Ом·м (рис. 6.2). При этом, наиболее проводящие зоны (0.1-20 Ом·м) протягиваются до глубины 5 м, и отдельными участками до 10 м (профили 2 и 4). Толща песков

подстиляется (на глубине 10-25 м) относительно высокоомными горизонтами, являющимися водоупорами (нижнекембрийские известняки гавриловской свиты ϵ_{1gv}).

Из полученной геоэлектрической зональности исследуемой площадки следуют два вывода: 1) внутреннее строение хвостохранилища довольно однообразно, мощность всей толщи песков и зон с узкими диапазонами УЭС с некоторыми колебаниями одна и та же, что дает возможность экстраполировать такое строение для всего хвостохранилища; 2) в некоторых локальных участках (профили 2 и 4) отмечается протягивание высокопроводящих (низкоомных) зон ниже глубины зондирования (10 м), что может быть интерпретировано как распространение областей с высокоминерализованными поровыми растворами, которые могут попадать в горизонты подземных вод, что описано для исследуемых объектов в главе 5.

Построенная 3D модель исследованного участка на хвостохранилище Талмовские Пески (рис. 6.3), составляющем 101000 м³, и рассчитанные объёмы сред с заданными параметрами УЭС позволили оценить ресурсы данного участка хвостохранилища и количество водорастворимых форм металлов и металлоидов (табл. 6.2).

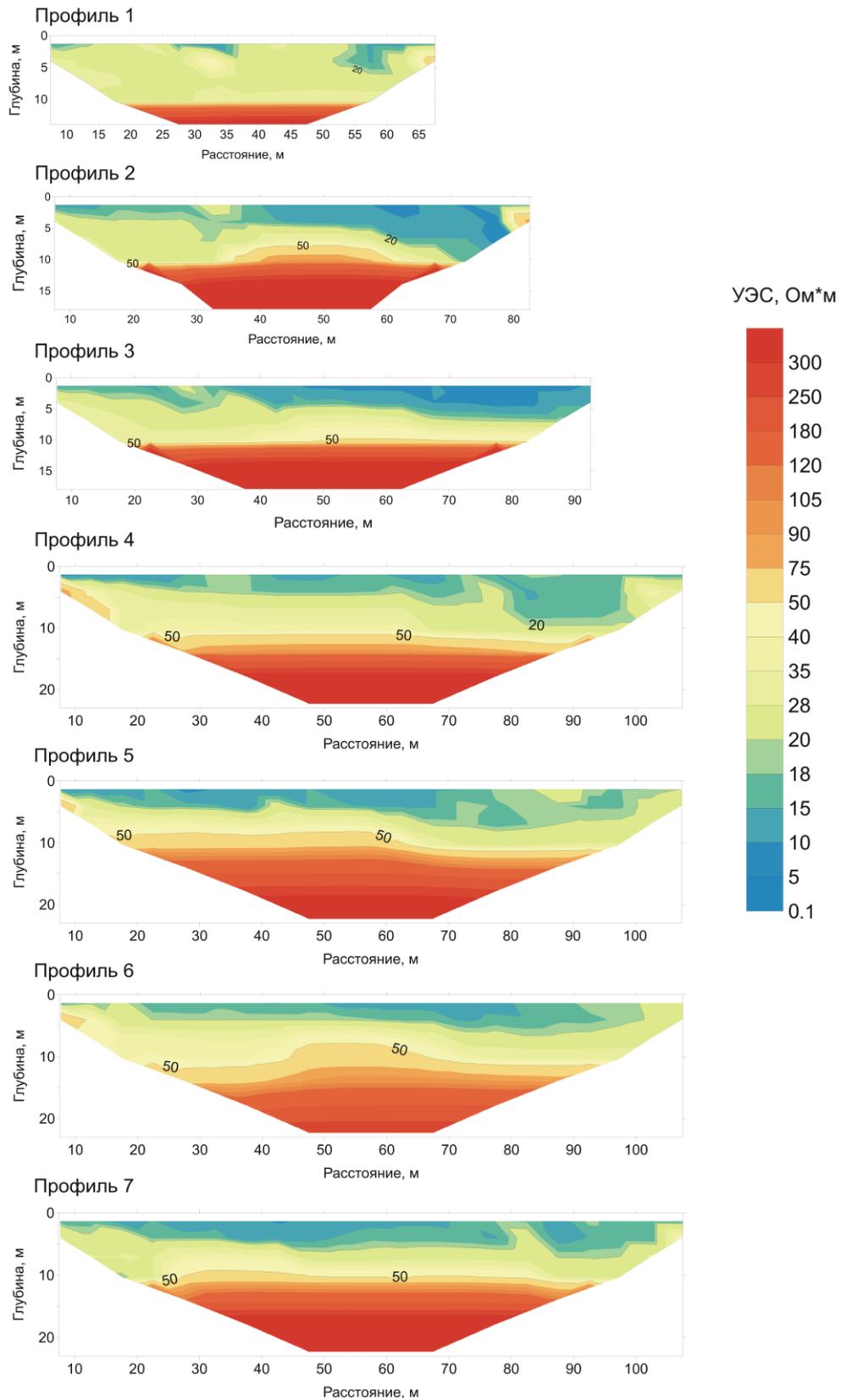


Рисунок 6.2 – Геоэлектрические разрезы на участке хвостохранилища Талмовские Пески. Номера профилей и их расположение указаны на рисунке 3.2 (глава 3)

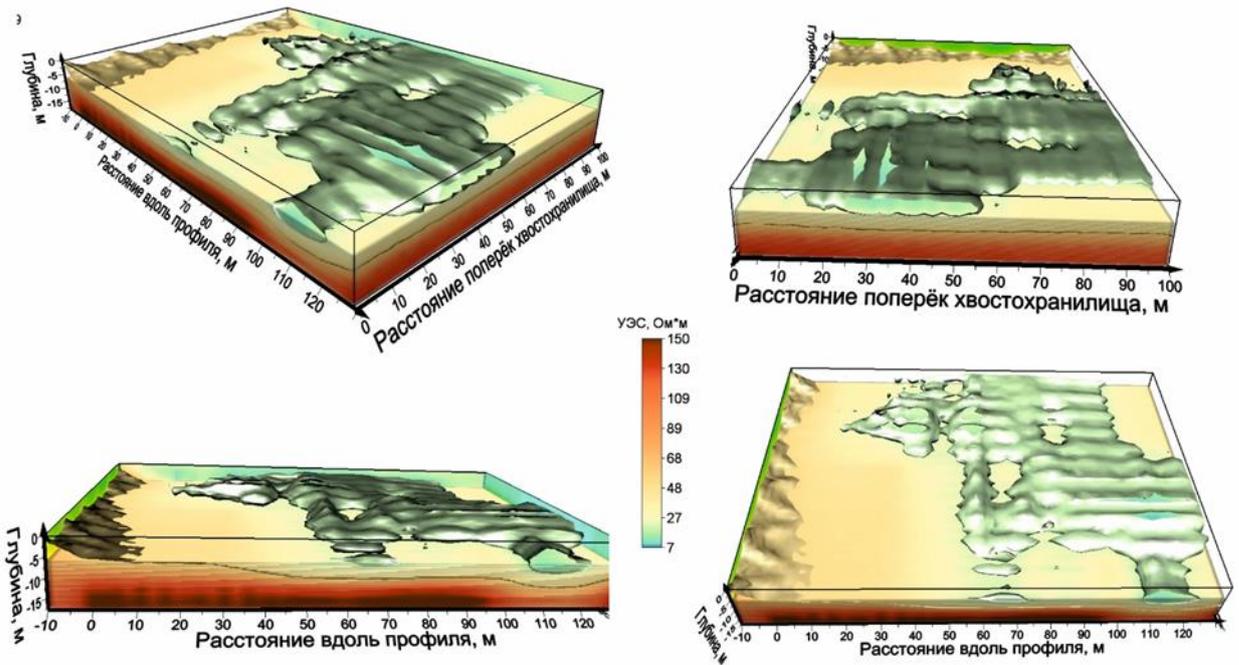


Рисунок 6.3 – 3D модель исследуемого участка на хвостохранилище Талмовские Пески с выделенными поверхностями изоум

Общий объем песков на исследованном участке составляет 101000 м^3 , сред с диапазоном УЭС 0.1-20 и 21-50 Ом·м – 48000 и 53000 м^3 соответственно. Принимая удельный вес 2500 кг/м^3 , рассчитанная масса вещества на исследуемой площадке с разными значениями УЭС составляет 120 и 133 тыс. т соответственно. Данные по содержаниям металлов в веществе с сопротивлениями 0.1-20 и 21-50 Ом·м, позволяют оценить ресурсы металлов в пределах исследованного участка (табл. 6.2) [Юркевич и др., 2023].

Таблица 6.2 – Объемы вещества с сопротивлениями 0-20 и 21-50 Ом·м, концентрации и ресурсы металлов в них (т), общие ресурсы в пределах исследованного участка

УЭС, Ом·м	Объем, тыс. м ³	Масса, тыс. т	Ba	Pb	Cu	Zn	Au	Ag
			% / т		г/т / т			
0.1–20	48	120	39	0.5	410	9700	2.2	36
			47000	600	49	1200	0.26	4.3
21–50	53	130	35	0.4	760	13000	1.5	35
			47000	530	100	1700	0.19	4.7
Ресурс металла в пределах исследованного участка, т			93000	1100	150	2900	0.46	9.0

Таблица 6.3 – Масса водорастворимых форм элементов в исследованном участке хвостохранилища Талмовские Пески

	Ba	Pb	Cu	Zn	Au	Ag
Водорастворимые формы, %	0.0014	0.018	0.51	1.1	0.0054	0.0003
Водорастворимые формы, тонн	13	130	48	1300	0.0008	0.13

6.3. Урские отвалы

6.3.1. Оценка ресурсов

Подробные исследования 2015-2020 гг. позволили оконтурить Урские барит-пиритовый и кварц-баритовый отвалы и дренажную долину, выделить зоны просачивания кислых дренажных растворов, установить мощность техногенных отложений. Анализ геоэлектрических разрезов кварц-баритового и барит-пиритового отвалов (рис. 5.10 и 5.14 соответственно, глава 5, п. 5.3.3), а также разрезов по микропрофилям в сопоставлении с результатами прямых замеров сопротивлений вещества методом резистивиметрии позволил установить, что первый сложен преимущественно материалом с УЭС 11-50 Ом·м, второй – 0.1-10 Ом·м. Анализ объемной геоэлектрической модели (рис. 6.4) и дополнительные расчёты при помощи программы Volume Surfer позволили оценить объёмы

вещества с УЭС 11-50 Ом·м и 0.1-10 Ом·м: 1 649 851 и 5184 м³ соответственно, что мы приравниваем к объемам кварц-баритового (КБ) и пирит-баритового (ПБ) отвалов (табл. 6.4). При плотности вещества 2500 кг/м³ масса КБ составляет 4.1 млн. тонн, масса БП – 13 тыс. тонн. Сопоставление значений электрических сопротивлений, полученных методом микроэлектротомографии, и результатов анализа химического состава проб вещества отходов (глава 4, п. 4.3) из шурфов позволили разделить массив данных на две выборки (0.1-10 Ом·м и 11-50 Ом·м), для каждой из которых были рассчитаны усреднённые содержания элементов, что в совокупности с данными об общей массе вещества было использовано для расчётов ресурсов металлов (табл. 6.4) и их водорастворимых форм.

Так, было получено, что ресурс бария в барит-пиритовом отвале – 1.8 тыс. тонн, в кварц-баритовом – 507 тыс. тонн (табл. 6.4), что в пересчёте на барит составляет 3.1 и 863 тыс. тонн соответственно. Ресурсы меди, цинка, свинца, кобальта, молибдена, кадмия в барит-пиритовом отвале находятся в диапазоне 0.0048-21 тонн и в кварц-баритовом – 1.6-10456 тонн. Запасы благородных металлов в барит-пиритовом отвале составляют 1.3 кг золота и 530 кг серебра, в кварц-баритовом – 410 кг золота и 25 тонн серебра (табл. 6.4). Отметим, что масса водорастворимых форм мышьяка, элемента 1-го класса опасности, в обоих отвалах суммарно составляет около 850 кг, что может быть использовано при расчётах прогнозной опасности объекта при его взаимодействии с атмосферными и подземными водами. Например, зная скорость выщелачивания As, можно рассчитать, в течение какого периода дренажные стоки с отвала будут содержать мышьяк, что существенным способом повлияет на оценку ущерба от загрязнения водных и земельных ресурсов.

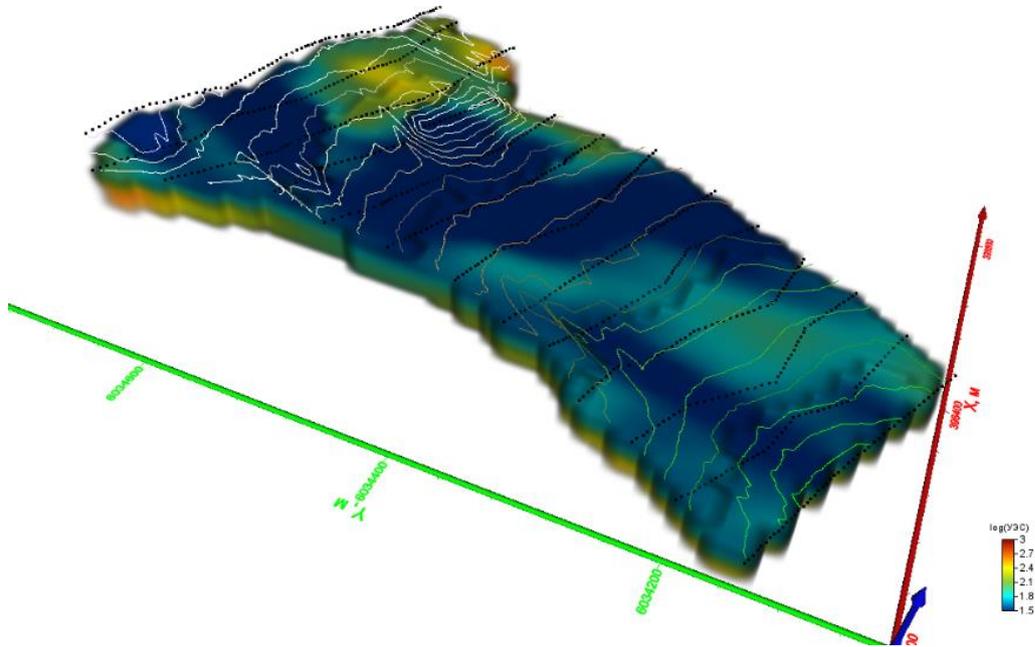


Рисунок 6.4 – Объемная геоэлектрическая модель Урской техногенной системы

Таблица 6.4 – Объемы вещества Урских отвалов с сопротивлениями 0-10 и 11-50 Ом·м, концентрации, ресурсы металлов и доля водорастворимых форм

УЭС, Ом·м	Объём, м ³	Масса, млн.т	Отвал	Параметр	Элемент									
					Ba	Pb	Cu	Zn	As	Co	Mo	Au	Ag	Cd
0.1-10	5200	0.013	Барит- пиритовый	Концентрация, г/т	140000	1700	510	94	660	4.5	15	0.10	23	0.37
				Ресурсы, тонн	1800	21	1.6	1.7	3.1	0.058	0.10	0.0013	0.53	0.0048
				Водорастворимые формы, %	0.001	0.011	0.49	1.0	0.18	0.22	0.063	0.0050	0.0074	0.35
				Водорастворимые формы, тонн	0.018	0.0024	0.0078	0.018	0.0057	0.0001	6·10 ⁻⁵	6.5·10 ⁻⁸	3.9·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵
11-50	1700000	4.1	Кварц- баритовый	Концентрация, г/т	140000	2800	47	36	440	0.57	8.8	0.10	29	0.38
				Ресурсы, тонн	500000	10000	260	470	1200	2.4	13	0.41	25	1.6
				Водорастворимые формы, %	0.001	0.0001	1.9	5.0	0.068	5.1	0.019	0.005	0.0014	0.58
				Водорастворимые формы, тонн	5.1	0.016	5.1	24	0.84	0.12	0.0024	2.1·10 ⁻⁵	0.00035	0.0091

6.3.2. Оценка ущербов

В главе 5 (п. 5.3) приведено подробное описание результатов трансформации техногенного вещества под воздействием гипергенных факторов, показано разделение природно-техногенной системы на зоны окисления, выщелачивания и смешения. Полученные результаты в свою очередь были использованы для определения площади эпицентра загрязнения, центральной части и области депонирования при расчётах ущерба земельным ресурсам (рис. 6.5).

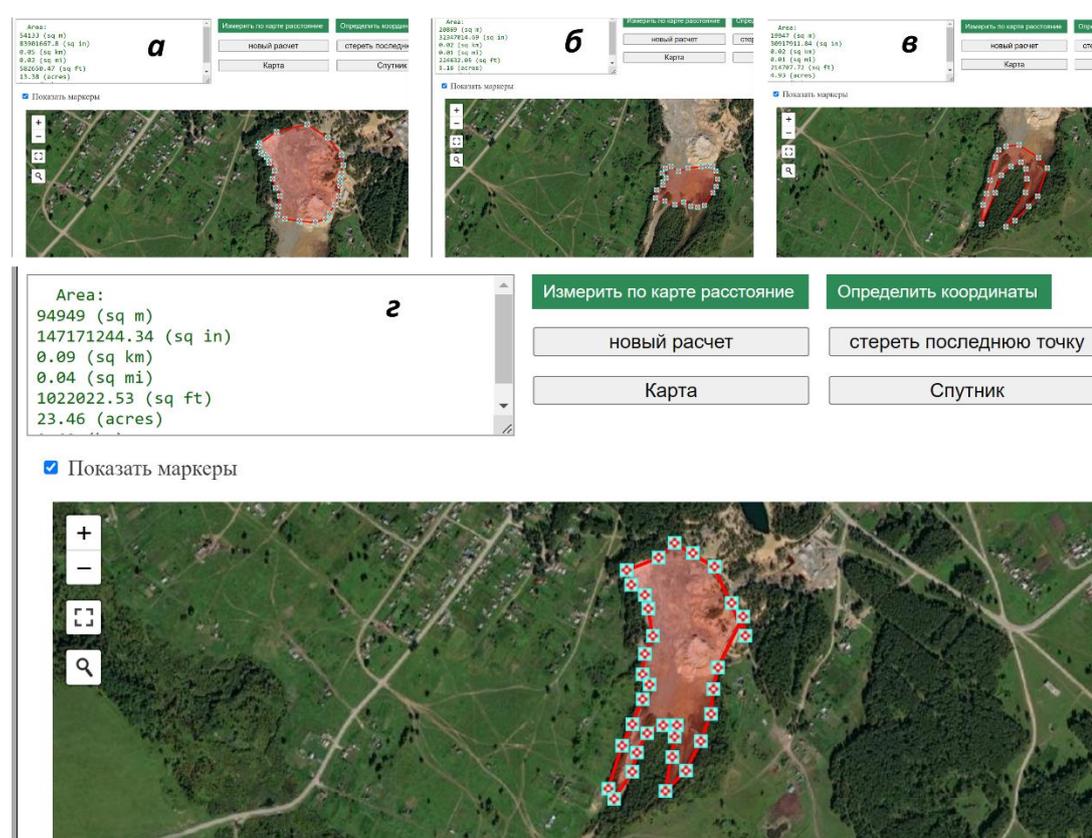


Рисунок 6.5 – Эпицентр (а), центральная часть площади загрязнения (б), область депонирования (в) и общая площадь загрязнения. Расчёты площадей выполнены при помощи сервиса <https://3planeta.com/googlemaps/google-maps-calculator-ploschadei.html>

В главе 2 (п. 2.3.5.2) приведено подробное описание методики расчёта ущерба от загрязнения водных и земельных ресурсов. В качестве входящих

параметров были использованы концентрации элементов в дренажном ручье (глава 5, табл. 5.4, 5.5) и в твёрдом веществе (табл. 6.5).

Результаты экономической оценки экологического ущерба от загрязнения подземных и поверхностных вод вследствие попадания в них дренажных вод показали ежегодный ущерб в размере 243 266 408 руб. Накопленный ущерб территории по причине загрязнения земельных ресурсов составляет 129 206 599 руб.

Таблица 6.5 – Концентрации химических элементов в эпицентре, центре площади загрязнения и области депонирования

Проба	УРПИР-20	УТ1-2/20	УТ2-5/20
Зона	Эпицентр	Центр площади загрязнения	Область депонирования
Расстояние от эпицентра, м	0	120	600
Площадь, м ²	54133	20869	19947
	мг/л		
Be	0.17	0.085	0.76
Ti	1300	700	3700
Cr	5.1	36	75
Mn	36	5.0	270
Co	8.7	1.2	14
Ni	29	1.5	31
Cu	620	660	36
Zn	320	10	130
Ga	1.5	5.8	13
Ge	1.9	0.46	1.2
As	380	280	24
Se	100	270	11
Mo	8.0	3.3	0.69
Ag	49	2.5	0.31
Cd	1.2	0.39	0.28
In	0.10	0.24	0.037
Sn	4.6	0.40	1.8
Sb	400	18	1.1
Te	20	6.3	0.70
Cs	0.22	0.79	4.0
Ba	230000	5500	1300
Ta	1.2	0.11	0.57
W	5.1	0.37	1.3
Au	2.3	27	0.012
Hg	150	47	0.010
Tl	2.0	0.41	0.38
Pb	3100	610	17
Bi	27	0.53	0.30
Th	0.64	25	7.6
U	1.4	16	4.5

6.3.3. Техничко-экономическое обоснование извлечения барита из Урских отвалов

6.3.3.1. Обоснование капитальных вложений

Производственная схема обустройства отвала предусматривает строительство и инженерную подготовку нескольких блоков установок:

1. вибрационного разделения с конвейером;
2. электромагнитного разделения с конвейером;
3. пневматического сепарирования с конвейером;
4. шаровой мельницы с конвейером;
5. линия упаковки.

Предусмотрено также строительство внутрипромысловых объектов энергоснабжения, объектов сбора и подготовки баритового концентрата, ангаров, складов, подстанций, офиса и гаража для техники.

Капитальные затраты рассчитаны исходя из средних показателей, приходящихся на единичную производительность каждой установки (тыс. тонн в год) и укрупнённых показателей стоимости строительства (табл. 6.6). Стоимость оборудования оценена по объектам-аналогам, представленным на торговых площадках и сайтах производителей оборудования.

Капитальные вложения в транспортную инфраструктуру предусматривают строительство дорог на территории промысла.

Таблица 6.6 – Нормативы капитальных вложений в обустройство отвала (без НДС)

№п/п	Показатели	Стоимость
1	Промышленное обустройство, тыс. руб.	
1.1	Установка вибрационного разделения	2000
1.2	Установка электромагнитного разделения	3000
1.3	Установка пневматического сепарирования	2150
1.4	Установка шаровая мельница	3000
1.5	Установка линия упаковки	1900
1.6	Погрузчик	9000
1.7	Дорога, забор, инвентарь	15000
2	Площадочные объекты инфраструктуры, тыс. руб.	
2.1	Офис, дом для охраны	15000
2.2	Подстанция	25000
2.3	Склад	10000
2.4	Ангар	10000
2.5	Гараж	10000

6.3.3.2. Обоснование эксплуатационных затрат

Эксплуатационные затраты на производства баритового концентрата рассчитаны в соответствии с удельными затратами и прогнозируемыми технологическими показателями разработки. База данных удельных затрат сформирована на основе фактических значений эксплуатационных затрат на аналогичных проектах (табл. 6.7).

Таблица 6.7 – Нормативы эксплуатационных затрат

Показатель	Ед. измерения	Значение
<i>Содержание и эксплуатация оборудования</i>	тыс. руб./год	14 400
электроэнергия	тыс. руб./год	12 000
вода	тыс. руб./год	2 400
связь	тыс. руб./год	1 500
прочие расходы	тыс. руб./год	1 000
<i>Фонд оплаты труда</i>	тыс. руб./год	55 200
<i>Фасовка и упаковка готовой продукции</i>	тыс. руб./год	1 000
<i>Транспортировка до железнодорожной станции</i>	тыс. руб./т на 100 км	0.25
<i>Транспортировка по железной дороге (вариант 1)</i>	тыс. руб./т на 100 км	0.05
<i>Транспортировка по железной дороге (вариант 2)</i>	тыс. руб./т на 100 км	0.07
<i>Транспортировка по железной дороге (вариант 3)</i>	тыс. руб./т на 100 км	0.08
<i>Транспортировка по железной дороге (вариант 4)</i>	тыс. руб./т на 100 км	0.14

Фонд оплаты труда включает заработную плату основного и вспомогательного персонала, обязательные страховые отчисления, отпуска, премии и прочие выплаты, связанные с оплатой труда.

Расходы на транспортировку. Полученный баритовый концентрат фасуется и загружается в фуры, грузоподъемностью 20 тонн. Далее транспортировка осуществляется фурами по автомобильной дороге «Урск-Горский-Новопестерев-Гурьевск-Шанда-Бековское-Белово» до железнодорожной станции в г. Белово (расстояние до станции 86 км), где баритовый концентрат перегружается в крытые вагоны, грузоподъемностью до 66 тонн. Расстояние транспортировки по железной дороге до ближайшей железнодорожной станции к конечному потребителю варьируется согласно рассмотренным вариантам. Расходы на транспортировку рассчитывались согласно публичным тарифам авто грузоперевозок пробега по России и Прейскуранту № 10-01 «Тарифы на перевозку грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами», утверждённом Постановлением ФЭК РФ от 17 июня 2003 г. № 47-т/5 (изм. от 13 декабря 2021 г.), и Единой тарифно-статистической номенклатуре грузов (ЕТСНГ) для кода 242039 «концентрат баритовый».

Амортизационные отчисления рассчитываются в соответствии со ст. 256-259 «Налогового кодекса Российской Федерации (часть вторая)» от 05.08.2000 № 117-ФЗ в действующей редакции. Классификация основных средств по амортизационным группам и выбор срока полезного использования оборудования осуществляется в соответствии с Постановлением Правительства РФ «О классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы» от 01.01.2002 № 1 в действующей редакции.

Кроме традиционных статей затрат в составе эксплуатационных расходов учтены также платежи и налоги, включаемые в себестоимость.

Эксплуатационные затраты производства баритового концентрата по варианту 1 составили 1727.5 млн руб., по варианту 2 – 1459.9 млн руб., по варианту 3 – 1398.8 млн руб., по варианту 4 – 1280.4 млн руб.

6.3.3.3. Обоснование налоговых отчислений и сборов

При производстве баритового концентрата будут уплачены все налоги, предусмотренные действующим налоговым законодательством РФ, с учётом поправок, вступивших в силу на момент проведения оценки экономической эффективности. Перечень налогов и платежей представлен в таблице 6.8.

Финансово-экономические расчеты эффективности проводились без налога на добавленную стоимость (НДС), который является косвенным налогом и напрямую не влияет на деятельность компании в период инвестирования. Все статьи выручки, капитальных и эксплуатационных затрат в оценке не включают НДС. НДС к вычету уже учтен при формировании нормативов для капитальных и операционных затрат.

Налог на добычу полезных ископаемых. Отличительной особенностью проектов добычи полезных ископаемых является уплата налога на добычу полезных ископаемых (НДПИ). Ставки НДПИ рассчитаны на основании НК РФ часть вторая, Глава 26, ст. 342, а также регулярно обновляемых данных для расчетов, предоставленных Федеральной антимонопольной службой, Минэкономразвития России и ФНС России.

Расчёт суммарных налоговых сборов НДПИ на барит происходит по налоговой ставке. Налоговая ставка составляет 5.5 % от выручки добытого сырья.

Таблица 6.8 – Налоговая среда РФ для предприятий

Вид налога/взноса	Ставка налога и база начисления
<i>Страховые взносы</i>	
– пенсионный фонд	22 % (10 %) от начисленной суммы фонда оплаты труда (ст. 421, 425 НК РФ)
– фонд социального страхования	2.9 % (0 %) от начисленной суммы фонда оплаты труда (ст. 421, 425 НК РФ)
– фонд медицинского страхования	5.1 % от начисленной суммы фонда оплаты труда (ст. 421, 425 НК РФ)
– дополнительные взносы, связанные с условиями труда	0.2 % от начисленной суммы фонда оплаты труда (ст. 421, 425 НК РФ)
<i>Налоги, относимые на выручку от реализации и финансовый результат</i>	
Налог на добавленную стоимость	20 % от добавленной стоимости, определяемой как разница между стоимостью реализованной продукции и стоимостью материальных затрат, отнесенных на издержки. При использовании в расчете затрат без НДС, базой начисления налога является выручка от реализации продукции. 0 % для экспортных товаров (ст. 164 НК РФ)
Налог на имущество организаций	2.2 % от среднегодовой стоимости основных фондов. (ст. 380 НК РФ)
Налог на прибыль организаций	20 % от полученных доходов, уменьшенных на величину произведенных расходов, учитываемых в целях налогообложения, в денежном выражении. (ст. 284 НК РФ)
Прочие налоги, сборы и регулярные платежи	Учтены по нормативу

6.3.3.4. Экономическая эффективность

Цена реализации баритового концентрата была заложена на уровне 12 000 руб. за тонну с учётом средних цен на товарную продукцию, соответствующую ГОСТ 4682-84 (молотый, класс Б, марка КБ-3, насыпной вес 2.32 т/куб. м, содержание сульфата бария 90%). В среднем по России цена баритового концентрата варьируется в диапазоне от 12 000 до 15 000 руб. за тонну.

Ставка дисконтирования денежных потоков принята на уровне 10 %, что соответствует нормативам по реализации аналогичных проектов и обуславливает высокую надёжность расчётов, т.к. учитывает риски колебаний инфляции и ключевой ставки Банка России в случае её использования государством, как

инструмента монетарной и кредитной политики, а также возможные изменения валютных курсов.

Расчёт показателей эффективности инвестиций в освоение отвала проведён в соответствии с «Методическими рекомендациями по оценке экономической эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция)», утверждённых Постановлением Министерства экономики РФ, Министерства финансов РФ и Государственного комитета по строительной, архитектурной и жилищной политике N ВК 477 от 21.06.1999 г.

Коммерческая эффективность освоения отвала производится с использованием системы показателей, отражающих деятельность предприятия в условиях рыночной экономики, с учётом платежей и налогов, предусмотренных действующим законодательством.

Основными регламентирующими документами при оценке коммерческой эффективности являются «Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов» (издательство «Экономика», 2000 г.).

Коммерческая эффективность проекта оценивается по следующим показателям:

– *чистый дисконтированный доход (ЧДД, NPV)* – сумма прибыли от реализации баритового концентрата и амортизационных отчислений, уменьшенная на размер капиталовложений, направляемый на его производство, приведённая к году начала инвестиционных вложений и дисконтированная по ставке 10 %;

– *внутренняя норма доходности (ВНД, IRR)* представляет собой значение ставки *дисконтирования*, при которой величина суммарного чистого дисконтированного дохода за расчётный период равна нулю. Внутренняя норма рентабельности не может быть вычислена, если все значения годовых потоков наличности отрицательны либо положительны. Внутренняя норма рентабельности обладает свойством множественности, если поток наличности меняет знак с отрицательного на положительный более одного раза, в этом случае интерпретация нормы возврата затруднительна;

– *индекс доходности (PI)* – отношение суммы дисконтированных денежных притоков к сумме дисконтированных денежных оттоков;

– *доход государства (бюджетная эффективность)* – налоги и платежи, отчисляемые в бюджеты и государственные внебюджетные фонды всех уровней бюджетной системы страны.

Согласно выполненным расчётам, производство баритового концентрата при принятой технологической схеме, обоснованных вариантах транспортировки и реализации конечным потребителям в принятых ценовых и налоговых условиях является экономически эффективным. Результаты расчётов по всем пяти вариантам ЧДД и ВНД приведены в табл. 6.9.

Таблица 6.9 – Техничко-экономические показатели производства баритового концентрата за 2023-2030 гг.

Показатель	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Извлечение барита до 2030 г., тыс. т	180.0	180.0	180.0	180.0
Выручка, млн руб.	2 160.0	2 160.0	2 160.0	2 160.0
Капитальные вложения, млн руб.	175.7	175.7	175.7	175.7
Промысловое обустройство	36.1	36.1	36.1	36.1
Площадочные объекты инфраструктуры	70.0	70.0	70.0	70.0
Эксплуатационные затраты, млн руб.	1 597.9	1 459.9	1 398.8	1 280.4
в том числе транспортные расходы	456.3	318.2	257.2	138.8
Налоги без налога на прибыль и НДС, млн руб.	21.9	21.9	21.9	21.9
Прибыль до налога на прибыль, млн руб.	540.1	678.2	739.2	857.7
Налог на прибыль, млн руб.	108.0	135.6	147.8	171.5
Чистая прибыль, млн руб.	432.1	542.6	591.4	686.1
Cash flow, млн руб.	432.1	542.6	591.4	686.1
ЧДД, млн руб.	212.0	282.7	313.9	374.6
ВНД, %	35.6%	43.3%	46.6%	52.9%
Индекс рентабельности, ед.	2.2	2.6	2.8	3.1
Срок окупаемости без учёта дисконтирования, лет	3.0	3.0	3.0	2.0
Срок окупаемости с учётом дисконтирования 10%, лет	4.0	3.0	3.0	3.0

6.3.3.5. Анализ чувствительности экономической эффективности от возмущающих факторов

Для учета факторов риска и неопределенности при производстве баритового концентрата был проведен анализ чувствительности, который отслеживает степень влияния на самые значимые критерии эффективности – ЧДД и ВНД изменения ключевых параметров исходных данных:

- инвестиций (капитальные вложения);
- эксплуатационных затрат;
- цены реализации баритового концентрата;
- ставки дисконтирования.

Границы вариации исходных данных, влияние которых на критерии эффективности требуется определить, составляют диапазон от 50% до 150%, шаг изменения – 10%.

Результаты анализа чувствительности показателей эффективности к изменению основных возмущающих факторов представлены в таблице 6.10, рисунках 6.6 и 6.7.

Наибольшая чувствительность показателя ЧДД наблюдается по отношению к цене реализации барита. При этом при снижении цены более чем на 50%, ЧДД остаётся положительным. ЧДД остаётся положительным при росте капитальных вложений и эксплуатационных затрат на 50%, а также росте ставки дисконтирования до 15%.

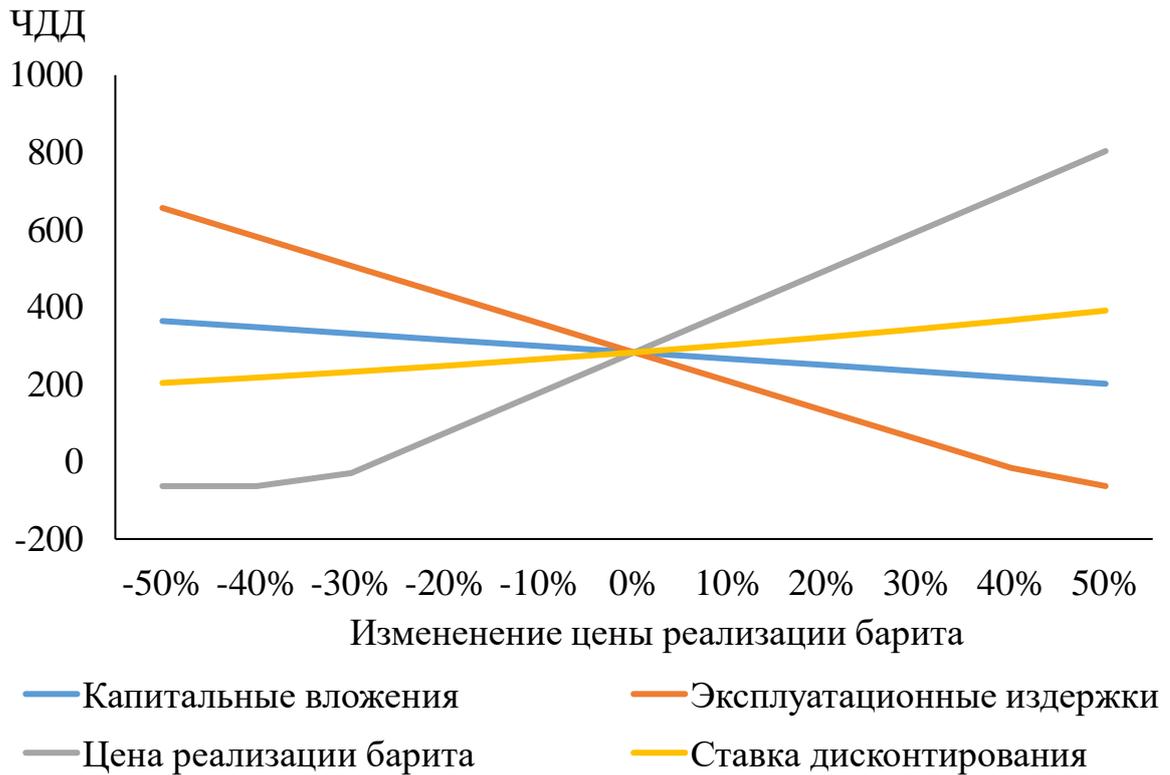


Рисунок 6.6 – Изменение ЧДД под влиянием возмущающих факторов (вариант 2), млн руб.

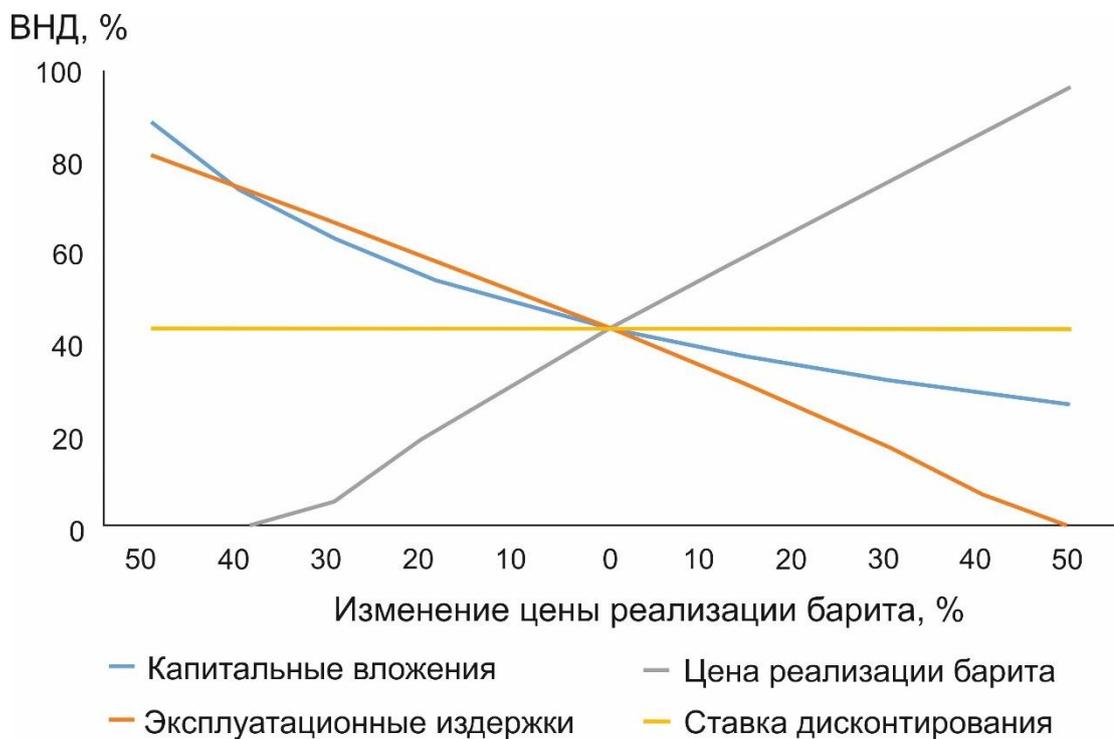


Рисунок 6.7 – Изменение ВНД под влиянием возмущающих факторов (вариант 2), %

Таблица 6.10 – Изменение основных показателей эффективности под влиянием возмущающих факторов (вариант 2)

Изменение цены реализации барита, %	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
Капитальные вложения											
Капитальные вложения, млн руб.	87.8	105.4	123.0	140.5	158.1	175.7	193	210	228	245	263
ЧДД, млн руб.	363.8	347.6	331.4	315.1	298.9	282.7	266	250	234	217	201
ВНД, %	89	74	63	55	48	43	39	35	32	29	27
Срок окупаемости с начала проекта, лет	2	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4
Срок окупаемости с учетом дисконтирования, лет	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	5
Индекс рентабельности	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
Эксплуатационные издержки											
Эксплуатационные издержки, млн руб.	729	875	1021	1167	1313	1459	1605	1751	1897	2043	2189
ЧДД, млн руб.	656	581	506	432	357	282	208	133	58	-16	-63
ВНД, %	81	74	66	59	51	43	35	27	18	8	0
Срок окупаемости с начала проекта, лет	2	2	2	2	2	3	3	4	5	7	10
Срок окупаемости с учетом дисконтирования, лет	2	2	2	2	3	3	4	5	7	10	10
Индекс рентабельности	4.7	4.3	3.9	3.5	3.0	2.6	2.2	1.8	1.3	0.9	0.6
Цена реализации баритового концентрата											
Цена реализации нефти, руб./тыс.куб.м	6	7	8	10	11	12	13	14	16	17	18
ЧДД, млн руб.	-63	-63	-29	74	178	282	386	491	595	699	80
ВНД, %	0	0	6	20	32	43	54	65	75	86	96
Срок окупаемости с начала проекта, лет	10	10	7	5	3	3	2	2	2	2	2
Срок окупаемости с учетом дисконтирования, лет	10	10	10	6	4	3	3	2	2	2	2
Индекс рентабельности	0.6	0.6	0.8	1.4	2.0	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.6
Ставка дисконтирования											
Ставка дисконтирования, %	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5
ЧДД, млн руб.	203	217	232	248	264	282	301	321	343	366	390
ВНД, %	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
Срок окупаемости с начала проекта, лет	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Срок окупаемости с учетом дисконтирования, лет	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Индекс рентабельности	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	3.0	3.1	3.2

6.4. Комсомольское хвостохранилище

6.4.1. Оценка ресурсов

В главе 4 приведен элементный состав вещества Комсомольского хвостохранилища, закономерности его изменения с глубиной и связь с электрофизическими параметрами среды. Здесь мы приводим концентрации, результаты расчётов объемов хвостохранилища и ресурсов металлов и мышьяка (Cu, Zn, As, Sb, Ag, In).

Концентрации вышеперечисленных элементов в веществе Комсомольского хвостохранилища сопоставимы с содержаниями этих элементов в перерабатываемых рудах или по усредненным литературным данным (табл. 6.11). Концентрация золота составляет 0.38 г/т, что ниже среднего в перерабатываемых на Комсомольском заводе рудах (1.57 г/т в 1980 г.), но максимальные концентрации в хвостах (0.9 г/т) сопоставимы с рудными.

Таблица 6.11. Некоторые элементы в составе хвостов Комсомольского хранилища и сравнение с содержаниями в руде, г/т [Юркевич и др., 2017]

n=30	Cu	Zn	As	Sb	Cd	Au	Ag	In	Sn
Вещество Комсомольского хвостохранилища, г/т									
средн	1400	630	3000	2500	6.6	0.38	3.2	16	14
мин	1100	207	910	270	0.11	0.21	1.1	7.1	0.49
макс	1800	1200	7200	5000	14	0.92	9.2	33	64
руда	100-1000*	140**	100-1000**	1000-10000***	100-5000***	1.57**	2.5**	2-23***	100-1000**

Примечание: * – по данным (Бортникова и др., 2006); ** – из отчета «Показатели работы Комсомольского завода в 1969–1981 годах» по состоянию на 1980 год; *** – по данным (Иванов и др., 1996).

По данным электротомографии были построены геоэлектрические разрезы Комсомольского хранилища. Хвосты на разрезах выделяются как зоны пониженного сопротивления (25-30 Ом·м), мощность отложений варьирует от 4.5 до 7.5 м. Основание хвостохранилища представлено диоритами, имеющими

высокое (1000-3000 и более Ом·м) УЭС (рис. 6.8). По характеру распределения УЭС на глубине 20 м прослеживается путь фильтрации дренажа от места складирования в область разгрузки под дамбой и далее, по разлому, в область разгрузки в р. Воскресенка.

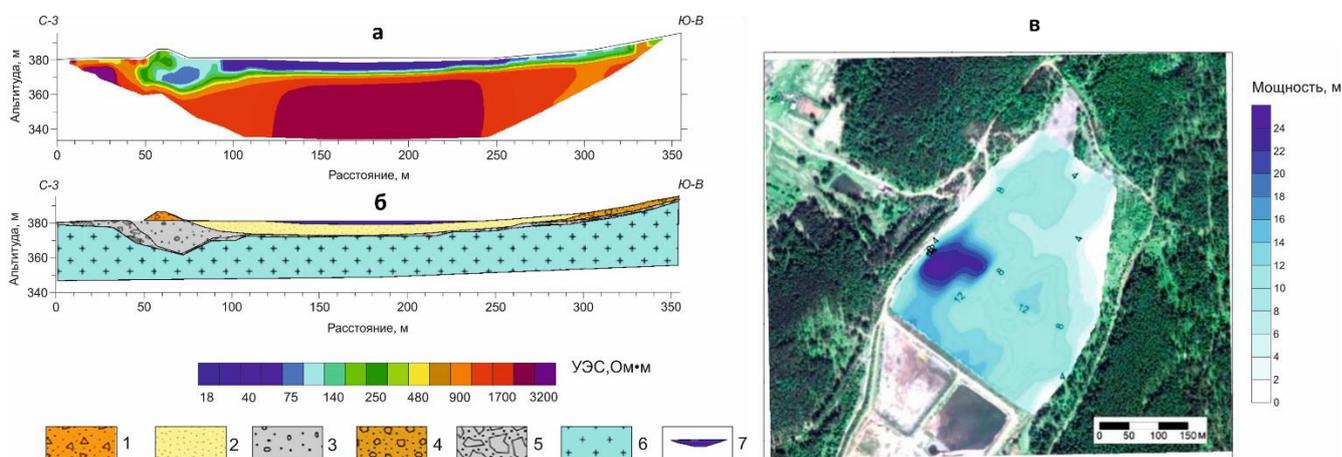


Рисунок 6.8 – Геоэлектрический разрез (а); его интерпретация (б): 1 – насыпные грунты дамбы; 2 – хвосты обогащения; 3 – рыхлые отложения; 4 – рыхлые склоновые отложения; 5 – кора выветривания диоритов; 6 – коренные диориты; 7 – гидроотвал; карта мощности хвостов по геофизическим данным (в). Рисунок выполнен Оленченко В.В. (Юркевич и др., 2017)

В результате интерпретации данных была установлена мощность хвостов на всех профилях ЭТ и построена карта мощности техногенных отложений. Мощность хвостов неравномерна по площади, изменяется от первых метров по периферии хвостохранилища до 26 м на участке локального понижения кровли коренных пород. Медианное значение мощности хвостов составляет 7.6 м.

С помощью инструмента Volume программы Surfer (Golden Software) был рассчитан объем хвостов 958 тыс. м³, что сопоставимо с данными (Бортникова и др., 2006) (810 тыс. м³). По нашим оценкам, масса накопленных хвостов составляет около 3 млн. тонн. На основании информации о концентрациях металлов, мышьяка и сурьмы (табл. 6.12), были рассчитаны ресурсы ценных и потенциально токсичных элементов в хвостах (средние значения, тонн): 9100 As, 7600 Sb, 4300 Cu, 1900 Zn,

48 In, 42 Sn, 20 Cd, 10 Ag, 1.2 Au. При рыночной цене золота 2300 рублей за 1 гр. (курс Центробанка на 18.02.2017) стоимость складированного в хвостах металла составит около 2.7 млрд. рублей. Аналогичным образом оценивается стоимость других металлов в составе отходов. Присутствие же 9100 тонн мышьяка, элемента 1-го класса опасности, обуславливают экологические риски от размещения хвостохранилища на территории поселка в непосредственной близости от жилой зоны.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что полезные компоненты (Zn, Cu, Ag, Au, In, Sn) находятся в высоких концентрациях, сопоставимых с рудными. Их добыча могла бы существенно минимизировать стоимость работы по устранению экологического ущерба территории в зоне влияния отстойника. Целесообразна разработка рекомендаций по извлечению металлов и рекультивации нарушенных территорий.

6.4.2. Экономический расчёт экологического ущерба и рентабельности переработки отходов с извлечением полезных компонентов

6.4.2.1. Ущерб окружающей среде от загрязнения водных ресурсов вокруг территории складированных отходов Комсомольского золотоизвлекательного завода

Исходными данными служила информация о содержании металлов (Cu, Zn, Cd, Pb, Fe, Ba, Sn, In, Mo, Bi и др.) и токсичных элементов (As, Hg, Tl, Be) в водах хвостохранилища. Поскольку уровень воды и концентрации веществ в озере остаются постоянными на протяжении последних 10 лет, когда проводились измерения, а фильтрационные потери озера для анализируемой территории принимаются равными 40 % от объема озера, можно сказать, что условную норму попадания веществ в озеро за счёт выщелачивания можно принять за скорость этих фильтрационных потерь. Объем озера – 30 000 м³. Расход веществ 12 000 м³ в год. На основании данных о норме поступления загрязняющих веществ и соблюдении

гигиенических норм САНПИН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», определены относительные показатели опасности A_i веществ и рассчитаны приведенная масса M . Численное значение удельного ущерба водным ресурсам Кемеровской области, относящемуся к водному бассейну реки Обь, притока Иртыша, определялось исходя из значения этого показателя, указанного в «Методике определения предотвращенных экологических нарушений». Удельный ущерб оценивался в 10 611 рублей за условную тонну. Для оценки удельного ущерба за 2019 год авторы использовали методику доведения затрат до современного значения. Удельный ущерб водным ресурсам составил 126 721 руб. на условную тонну с учетом динамики инфляции за период 1999-2019 гг. При расчете экономического ущерба значение коэффициента экологической значимости для водных объектов Кемеровской области принималось равным 1.16. Результаты расчетов оценки экологического ущерба от загрязнения водных ресурсов дали общую оценку в 302 млн. рублей.

6.4.2. Ущерб окружающей среде от загрязнения земельных ресурсов вокруг территории складированных отходов

Исходными данными служила концентрация тяжелых металлов в почве на глубине 20 см на территории, подверженной техногенному воздействию со стороны Комсомольского хвостохранилища. Стоимость земельного участка определялась в соответствии с постановлением администрации Кемеровской области «Об утверждении средних уровней кадастровой стоимости земельных участков в землях населенных пунктов Кемеровской области в муниципальных районах (городских округах)» с учетом показателей инфляции. Стоимость земельного участка, предназначенного для размещения производственных и административных зданий на территории пос. Комсомольск, расположенного в Тисульском районе (на территории которого расположен завод), составляет 228.78 рубля за м². По данным геохимических и геофизических исследований площадь,

подверженная загрязнению от хвостохранилища, составляет 146 000 м². Уровень загрязнения *i*-м веществом определялся исходя из степени превышения концентрации *i*-го вещества в почве над уровнем ПДК. Позже для каждого вещества был определен коэффициент загрязнения. По данным полевых геохимических и геофизических исследований, глубина загрязнения – 20 см в, что соответствует коэффициенту глубины загрязнения равному 1. Значение коэффициента экологической значимости региона составляет 1.2. Результаты расчетов показали, что экологический ущерб от загрязнения земельных ресурсов на территории, подверженной воздействию со стороны складированных отходов Комсомольского завода, составляет 162 млн. рублей.

Общая оценка экологического ущерба со стороны складированных отходов Комсомольского золотоизвлекательного завода составляет 464 млн. рублей. На основании подхода, описанного в предыдущих разделах, нами было оценено общее содержащее хвостов – 958 тыс. м³ и определены содержания металлов. Отметим, что ресурсы только пяти ценных компонентов в Комсомольских отходах составляют (тонн): 4300 Cu, 1900 Zn, 1240 Pb, 87 Ni, 9.9 Ag, что при современных ценах на них составляет около 54 млн. долларов или 4 млрд. рублей, и эти суммы в 10 раз превышают накопленный экологический ущерб. Подчеркнём, что мы привели расчёт только по пяти компонентам, не рассматривая ресурсы по золоту, кадмию, молибдену, индию и ряду других металлов, поэтому оценка ресурсов явно недооценена.

Проведены эксперименты по осаждению металлов (Zn, Cu, Cd, Pb) и мышьяка из дренажных растворов при помощи химических методов на основе результатов лабораторных и полевых экспериментов с применением природных материалов (торф, отходы птицефабрики, гидроксид кальция, сульфид натрия). По предварительным данным стоимость рекультивации 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.

6.4.3. Техничко-экономический план работ по рекультивации техногенных объектов

Техничко-экономический план работ по рекультивации техногенных объектов, предлагаемый в рамках этого исследования, состоит из следующих этапов:

- 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;
- выколаживание 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 м² – 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. Расчеты были произведены на основе анализа литературы [Салова, Громова, 2015; Абдрахманова и др., 2018; Фридланд и др., 2009] и законодательных стандартов по рекультивации.

Стоимостная оценка природовосстановительных мероприятий с учетом дисконтирования составила 716.7 млн руб. При этом доходы от реализации оборудования и добытого золота составили 3.9 млрд руб. Авторами определена суммарная оценка экологического ущерба от деятельности Комсомольской золотоизвлекательной фабрики – 458.1 млн. руб. (2020 г.). При расчёте величины накопленного экологического ущерба, нанесенного водным ресурсам, была учтена степень загрязнения воды в р. Воскресенка. Накопленный экологический ущерб от загрязнения этого водного объекта составляет 293.8 млн руб. Оценка экологического ущерба, нанесенного почвам, учитывающая степень накопленного загрязнения всех металлов в почве, согласно расчетам, составила 164.3 млн руб.

6.5. Шахтаминское хвостохранилище

На рисунке 6.9 показан геоэлектрический разрез по профилю А, пересекающему затопленный ранее участок хвостохранилища. На отметке 350 м располагался дренажный колодец, в окрестностях которого отмечаются самые низкие высотные отметки поверхности рельефа. На геоэлектрическом разрезе в верхней части выделяется слой пород низкого (25-90 Ом·м) удельного электрического сопротивления (УЭС). Мощность этого слоя изменяется от 0-5 м в краевых частях профиля до 10-12 м в центральной части разреза. Породы в этом диапазоне УЭС интерпретируются как техногенные отложения. В основании пород низкого УЭС залегают породы высокого (250-10000 Ом·м) электросопротивления. Такой широкий диапазон изменения УЭС пород основания объясняется разной степенью трещиноватости гранитов. В бортах межгорной впадины граниты характеризуются УЭС от 1000-2000 Ом·м до 10000 и более Ом·м, в то время как в осевой части впадины УЭС гранитов составляет 250-500 Ом·м. Как правило, межгорные впадины маркируют тектонические нарушения, по которым они,

собственно, и развиваются [Костенко, 1997]. Таким образом область пониженных УЭС в породах основания интерпретируется как зона разлома в гранитах. Горизонтальная мощность зоны разлома составляет порядка 110 м.

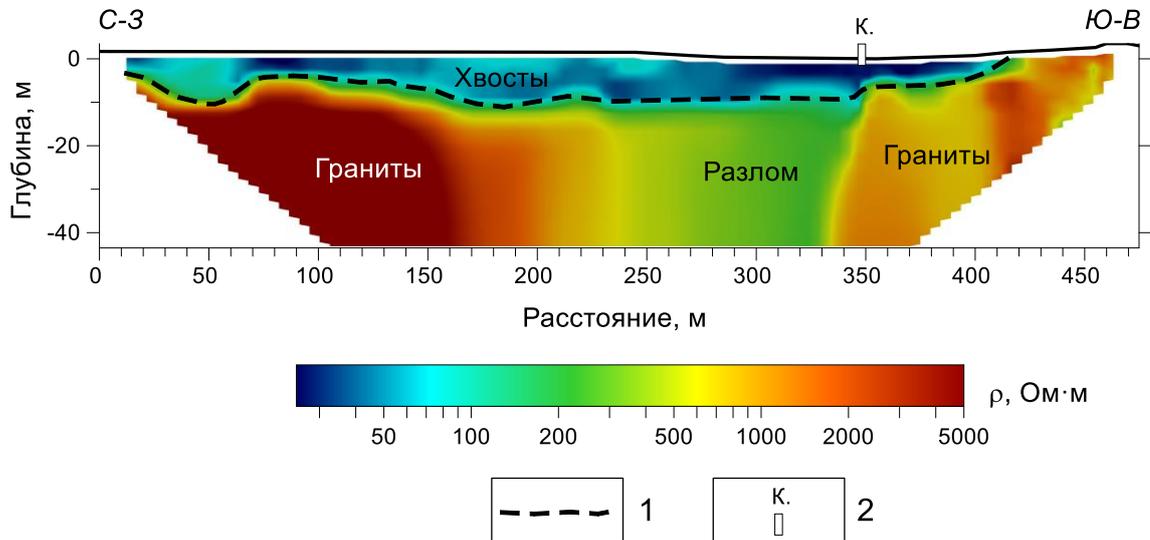


Рисунок 6.9 – Геоэлектрический разрез по профилю А: 1 – подошва техногенных отложений (хвостов); 2 – дренажный колодец

На профиле Б мощность слоя низкого УЭС составляет 15-22 м (рис. 6.10), что согласуется с данными бурения, по которым вскрытая мощность хвостов флотации в скважине 2-2 равна 22 м. Их УЭС изменяется от 19 до 300 Ом·м, но в некоторых случаях повышается до 600-870 Ом·м. Широкий диапазон изменения УЭС техногенных отложений объясняется их разным дисперсным составом, влажностью и частично сезонномёрзлым состоянием. Самые низкие (первые десятки Ом·м) значения УЭС характерны для влажных тонкодисперсных отложений. Электросопротивление песчаной фракции хвостов составляет порядка 100 Ом·м, а при понижении влажности вырастает до 300-500 Ом·м. Самые высокие (до 870 Ом·м) значения УЭС отмечены у техногенных отложений, находящихся в сезонномёрзлом состоянии. УЭС пород основания изменяется в пределах 750-4000 Ом·м. Минимальные УЭС гранитного основания (750-1000 Ом·м) отмечаются в осевой части межгорной впадины (центральная часть профиля), где предполагается зона тектонического нарушения.

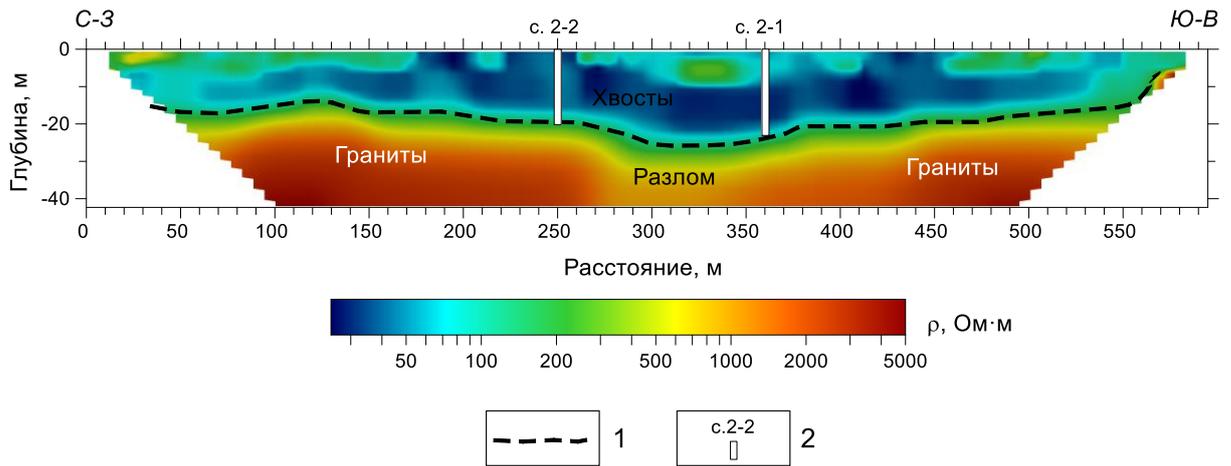


Рисунок 6.10 – Геоэлектрический разрез по профилю Б: 1 – подошва техногенных отложений (хвостов); 2 – скважина и её номер

Таблица 6.12 – Валовые концентрации, масса водорастворимых форм, ресурсы химических элементов в Шахтаминских отвалах

	Ba	Pb	Cu	Zn	As	Mo	Ni	Au	Ag	Cd
Концентрация, г/т	1300	4000	1400	1200	160	1100	41	0.19	24	11
Ресурсы, тонн	4900	15000	5300	4600	610	4200	160	0.72	91	42
Водорастворимые формы, %	0.001	0.03	0.2	0.5	0.02	0.03	0.29	0.01	0.02	0.58
Водорастворимые формы, тонн	0.049	4.6	11	23	0.12	1.3	0.45	0.00007	0.018	0.24

6.6. Дарасунское хвостохранилище

Данные электротомографии указывают на чередование слоев по электропроводности: проводящий горизонт до глубины около 0.5 м, далее до глубины 3-5 м следует высокоомный горизонт (150-300 Ом·м), глубже – проводящая среда (1-30 Ом·м) до глубины около 15 м (рис. 6.11), ниже – высокоомная среда (до 300 Ом·м).

Верхний умеренно проводящий горизонт на поверхности хвостохранилища до глубины 1.4 м интерпретируется как обводнённый сезонно-талый слой техногенных песков, ниже до глубины около 4 м – горизонт сезонного промерзания. С глубины 4 до 15 м расположены талые, умеренно обводнённые

хвосты. Предполагаем, что это зона окисления и растепеления. С глубины 15 м – коренные породы.

Объемная геоэлектрическая модель, построенная по серии профилей на выделенном участке шириной 20 м, длиной 110 м и глубиной 20 м, позволила определить зональность складированного вещества (рис. 6.12), рассчитать объемы хвостов на изученной площади и в хвостохранилище в целом (табл. 6.13).

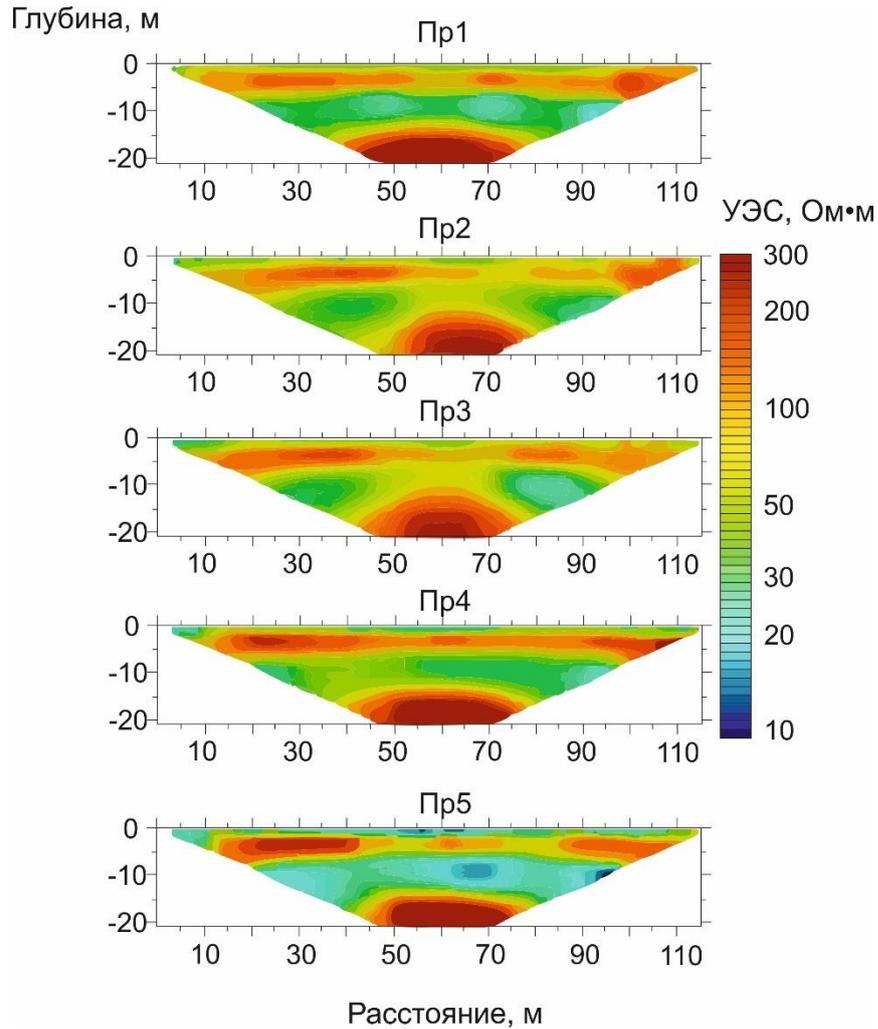


Рисунок 6.11 – Геоэлектрические разрезы по профилям электротомографии 1-5

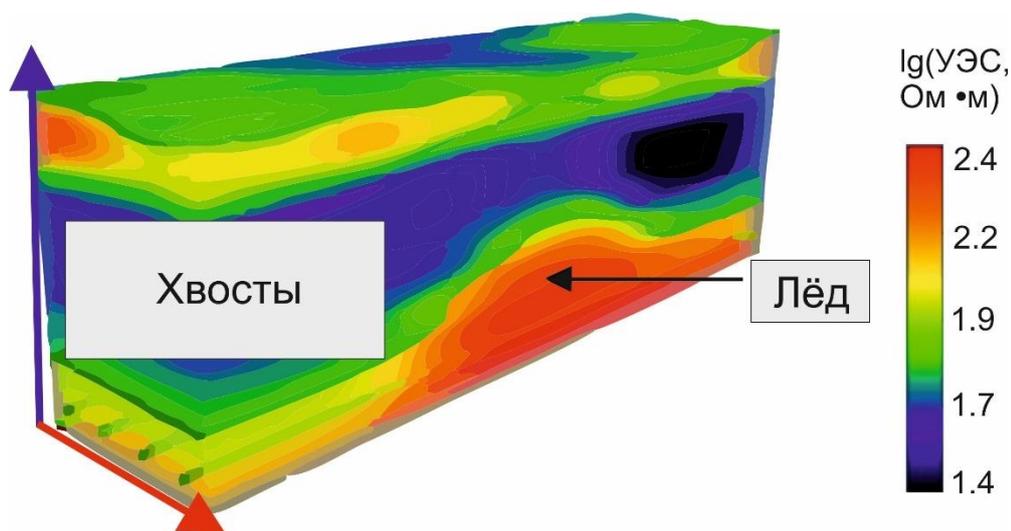


Рисунок 6.12 – Объемная геоэлектрическая модель, построенная по серии профилей длиной 110 м с авторским вариантом интерпретации аномалий УЭС

Таблица 6.13 – Валовые концентрации, масса водорастворимых форм, ресурсы химических элементов в Дарасунском хвостохранилище

	Ba	Pb	Cu	Zn	As	Mo	Au	Ag	Cd
Концентрация, г/т	640	580	970	540	4800	8.2	1.1	7.7	2.2
Ресурсы, тонн	3000	2700	4600	2500	23000	39	5.2	36	10
Водорастворимые формы, %	0.002	0.02	0.5	0.7	0.03	0.04	0.008	0.03	0.72
Водорастворимые формы, тонн	0.06	0.55	23	18	6.8	0.02	0.0004	0.01	0.07

6.7. Сравнительный анализ техногенных экосистем и реестр с оценкой ресурсов токсичных и полезных компонентов

Исследования показали, что все рассмотренные техногенные экосистемы можно разделить на три группы по степени трансформации.

1) Начальная стадия

Ярко выражена эрозия почв вблизи отвала, растительность уничтожена кислыми стоками за длительный период складирования отходов, практически нет почвенного слоя, отсутствует естественное озеленение поверхности хранилища. В качестве примера в 2020 г. был изучен Урской отвал, а в 2021 году – хранилище Талмовские пески (ТП). Значения pH паст и водных вытяжек этих объектов – в

кислой области (рН 2-2.5), минерализация порового раствора – до 2-5 г/л. Концентрация сульфидной серы может достигать 20 мас. %.

2) *Первая стадия*

На поверхности объектов формируется почвенный слой. Примером служит хвостохранилище Дюков лог (ДЛ, отходы Салаирской свинцово-цинковой обогатительной фабрики, Кемеровская область). К этой же группе принадлежат отходы хвосты флотации и цианирования золотоносных полиметаллических руд (Дарасун, Вершино-Дарасунский, Забайкальский край) и переработки руд Шахтаминского Мо-месторождения (Шахтама, Вершино-Шахтаминский). Значения рН паст и водных вытяжек этих хвостов – в слабокислой области, минерализация порового раствора – около 0.5-1.5 г/л, концентрация серы в твёрдом веществе – 10 мас. %. Для всех объектов характерно наличие остатков реагентов флотации и цианирования.

3) *Вторая стадия преобразования*

На поверхности отвала хорошо развита растительность, но почвенный слой расположен в основном по бортам и дамбам хранилищ. Примером служит Комсомольский гидроотвал, который приобрёл очертания природного озера, его воды обладают нейтральными значениями рН и населены рыбой, а берега густо заросли облепихой и макрофитами. Для этих объектов характерны минерализации порового раствора 200-1000 мг/л, содержание серы в твёрдом веществе – 5-10 мас. %, значение рН растворов – около 6 ед., однако существуют участки, на которых расположены хвосты и прудки, содержащие кислотные агрессивные растворы.

Исследования подтвердили, что, во-первых, за внешним благополучием природно-техногенной системы стоят экологические риски. Несмотря на нейтральные стоки, 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. м³, в них содержится от 1.6 до 4.7 млн. тонн отходов, а их химический состав различается (табл. 6.14). В первую очередь за счёт специфики обрабатываемых руд. 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. 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, большие запасы золота и серебра. Дарасунское хранилище отличается высокими концентрациями мышьяка и ртути. Хранилища могут рассматриваться, как техногенные месторождения цветных и благородных металлов. Хранилище третьей группы, Комсомольское, относительно небольшое по объему, однако, отличается ресурсом золота и серебра, а также мышьяка и ртути.

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

Таблица 6.14 – Объемы, массы и ресурсы химических элементов в семи хранилищах в Кемеровской области, Забайкальском крае. ДЛ – хвостохранилище Дюков Лог, ТП – хвостохранилище Талмовские Пески, Урск – Урские отвалы, Комс – Комсомольское хвостохранилище, ШХТ – Шахтаминское хвостохранилище, ДРС – Дарасунское хвостохранилище

Объект	ДЛ	ТП	Урск	Комс	ШХТ	ДРС
Объем, тыс. м ³	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

Примечание: н.д. – нет данных

Итак, 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 исследованных техногенных экосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана комплексная методология изучения заброшенных отходов горнорудного производства, включающая:

1) геофизические изыскания для определения зональности техногенных отложений, 2) геохимическое опробование, лабораторные эксперименты и термодинамическое моделирование для выявления форм нахождения элементов в поровых растворах и водных вытяжках, 3) расчёты объемов хранилищ, ресурсов ценных и токсичных компонентов в них, 4) экономические оценки экологического ущерба, рентабельности переработки и рекультивации.

Установлена роль климатического фактора в эволюции техногенных систем.

Показано, что районах с резко континентальным климатом протекают процессы гиперкриогенной трансформации сульфидсодержащего вещества в составе изученных техногенных экосистем, за счёт чего интенсифицируется окисление сульфидных минералов и формирование кислого дренажа. Показано, что отходы флотации и цианирования являются источниками серо-, углерод- и азотсодержащих газов в летнее и зимнее время. Установлены механизмы их формирования, взаимосвязь с факторами окружающей природной среды и электрофизическими параметрами. Показана суточная и сезонная вариабельность состава техногенных экосистем.

Рассчитаны ресурсы металлов в изученных хранилищах отходов горнорудного производства, определены объекты, представляющие особый экономический интерес.

По самым скромным подсчетам три небольших заброшенных хранилища отходов горнорудного производства на территории Кемеровской области содержат до 26 % As, 7,6 % In и 0.52 % Ag от их годовой добычи. Разумеется, автор приводит эти цифры только для того, чтобы продемонстрировать ресурсы отвалов в горнодобывающих регионах Российской Федерации. Остро стоит сегодня вопрос о

разработке методов извлечения ценных компонентов, безопасном захоронении токсичных остатков и рекультивации нарушенных земель. Поскольку возможности отрасли растут с развитием технологий, автор полагает, что «техногенные залежи» тех элементов, чьи природные источники на грани исчерпания, станут востребованными в ближайшее время.

Рассчитаны экологические ущербы от загрязнения природных ресурсов, показана рентабельность переработки для ряда объектов Сибири.

Рассчитаны экологические ущербы от загрязнения водных и земельных ресурсов в районе отходов золотоизвлекательного завода, переработки барит-полиметаллических руд, оценены расходы на рекультивационные мероприятия и доходы от реализации ресурсов золота и барита с учетом затрат на производство. Показана рентабельность извлечения ценных компонентов, экономическая эффективность производства баритового концентрата из отходов барит-полиметаллических руд и его транспортировки на предприятия по производству буровых растворов.

Дальнейшая работа в этом направлении связана с инвентаризацией и паспортизацией техногенных систем Сибири и Южного Урала с применением геофизических и геохимических методов, 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук

(по рекомендации ВАК)

- 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. Kartoziiia, 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. Вольнкин, 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. – Т. 586. – С. 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. – Т. 28. – № 12. – С. 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. – Т. 25. - № 1. – С. 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. – Т. 10. – № 10. – С. 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. – Т. 647. – С. 411-419.
- 17 Bortnikova, S. Gas transfer of metals during the destruction of efflorescent 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. – Т. 9. – № 6. – С. 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. – Т. 230. – № 12. – С. 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. – Т. 647. – С. 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. Ищук, 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. Nemo, 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 (29th of June – 5th 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 (29th of June – 5th 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 Resp.). – 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. – С. 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. – С. 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» (28th of August – 1st of September, Varna, Bulgaria). – 2011. – С. 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 (31st of March – 2nd of April, Alexandria, Egypt). – 2011. – С. 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алабин Л.В. Металлогения золота Кузнецкого Алатау / Л.В. Алабин, Ю.А. Калинин – Новосибирск: Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1999. – 234 с.
2. Белобородова Н.В. Метаболиты анаэробных бактерий (летучие жирные кислоты) и реактивность макроорганизма / Н.В. Белобородова, С.М. Белобородов // Антибиотики и химиотерапия. – 2000. – № 2. – С. 28-36.
3. Березкин В.Ю. Йод и селен в почвах Брянской области (на примере бассейна реки Титовки) / В.Ю. Березкин, Е.М. Коробова, В.Н. Данилова // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2023. – №. 1. – С. 3-15.
4. Биогеохимический мониторинг в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом микробиологических факторов трансформации минеральных компонентов / Л.П. Рихванов, Н.В. Юркевич [и др.] // Изд-во СО РАН – Новосибирск – 2017. – 437 с.
5. Болгов Г.П. Сульфиды Салаира. Урская группа полиметаллических месторождений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1937. – Т. 58. – №. 3. – С. 45-96.
6. Бортникова С.Б. Геолого-геохимические особенности золотого оруденения в полиметаллических полях северо-восточного Салаира: дис. канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 1989. – 206 с.
7. Бортникова С.Б. Геохимия техногенных систем / С.Б. Бортникова, О.Л. Гаськова, Е.П. Бессонова. – Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2006. – 169 с.
8. Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) / В.В. Оленченко [и др.] // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – №. 4. – С. 782-795.
9. Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область) / С.Б. Бортникова, Н.В. Юркевич

[и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – №. 2. – С. 26-35.

10. Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область) / С.Б. Бортникова [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – №. 2. – С. 26-35.

11. Глинских В. Н. Моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа с использованием петрофизических моделей электропроводности / В.Н. Глинских, Г.В. Нестерова, М.И. Эпов // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – №. 5-6. – С. 1001-1010.

12. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест: Гигиенические нормативы : введ. впервые : дата введения 2003-03-05. – Москва : Изд-во стандартов, 2003. – 86 с.

13. ГОСТ 4682-84. Концентрат Баритовый. Технические условия : введ. впервые : дата введения 1984-05-17. – Москва : Изд-во стандартов, 1990. – 34 с.

14. Дистанов Э.Г. Колчеданно-полиметаллические месторождения Сибири / Э.Г. Дистанов. – Новосибирск: Наука, 1977. – 351 с.

15. Ерохин А.А. Применение электротомографии при решении рудных, инженерных и археологических задач: автореф. дис..... канд. геол.-минерал. наук. – Москва, 2012. – 22 с.

16. Зеркалов В.И. Минералогия и геология колчеданных медно-свинцово-цинковых месторождений северо-восточного Салаира: автореф. дис..... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1962. – 20 с.

17. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник в 6 кн. / В.В. Иванов, под ред. Э.К. Буренкова. – Кн. 3: Редкие р – элементы. – Москва : Недра, 1996. – 352 с.

18. Колубаева Ю.В. Геохимия вод северной части Колывань-Томской складчатой зоны / Ю.В. Колубаева, С.Л. Шварцев, Ю.Г. Копылова // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2010. – №. 2. – С. 50-58.
19. Костенко Н.П. Геоморфология. Учебник для ВУЗов / Н.П. Костенко. – Москва : МГУ, 1999. – 379 с.
20. Лабазин Г.С. Структурно-морфологические особенности полиметаллических месторождений Салаирских рудников и геологические условия их нахождения // Цветные металлы. – 1940. – № 3. – С. 14-20.
21. Лазарева Е.В. Поведение мышьяка и сурьмы в процессе гипергенного преобразования отходов цианирования золото-арсенопирит-кварцевых руд: дисс. канд. геол.-мин. наук / Лазарева Елена Вадимовна. – Новосибирск, 2003. – 149 с.
22. Лазарева Е.В. Правовое регулирование медицинской деятельности в Российской Федерации (отдельные аспекты теории и практики): дис. ... канд. юр. наук / Лазарева Елена Вадимовна. – Саратов, 2006. – 235 с.
23. Лапухов А.С. Зональность колчеданно-полиметаллических месторождений / А.С. Лапухов. – Новосибирск : Наука, 1975. – 264 с.
24. Манштейн А.К. Малоглубинная геофизика / А.К. Манштейн. – Новосибирск : Новосибирский государственный университет. – 2002. – 136 с.
25. Манштейн Ю.А. Подход к оценке экологического ущерба по данным электроразведки / Ю.А. Манштейн, Е.В. Балков // 10th EAGE Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering Geophysics 2014. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2014. – С. sp-398-00011.
26. Мельник И.А. Физико-геохимическая модель низкоомного коллектора и ее практическое применение / И.А. Мельник, Л.Я. Ерофеев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – №. 3. – С. 46-50.
27. Месторождения Забайкалья / Под. ред. Акад. Н.П. Лаверова. – Москва : Геоинформмарк, 1995. – Т. 1. – кн. 2. – 244 с.

28. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов // 2-я ред. Официальное издание. – Москва : Экономика, 2000. – 237 с.
29. Мур Дж.В. Тяжелые металлы в природных водах / Дж.В. Мур, С. Рамамурти. – Москва : Мир, 1987. – 288 с.
30. Новообразованные минералы меди, цинка, селена, ртути, мышьяка, золота и серебра в потоке рассеяния сульфидсодержащего хвостохранилища / И.Н. Мягкая, Б.Ю. Сарыгоол, М.А. Густайтис, Е.В. Лазарева // Вопросы естествознания. – 2015. – № 3. – 118-122.
31. Обзор методов удаления сульфатов из техногенных вод горных предприятий / Р.Н. Абдрахманова [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2018. – Т. 16. – №. 4. – С. 21-29.
32. Осаждение металлов, мышьяка и сурьмы из дренажного потока на карбонатном барьере по данным анализа РФА-СИ / Н.В. Юркевич [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2008. – №. 11. – С. 52-56.
33. Особенности состава селен-, азот-и серосодержащих соединений в паровой фазе из отвала золоторудного месторождения / Юркевич Н.В. [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 2. – №. 3. – С. 209-217.
34. Оценка кислотообразующего/кислотонейтрализующего потенциалов отвальных пород и подвижности потенциально токсичных элементов Раздолинского рудного узла (Красноярский край) / С.Б. Бортникова, ..., Н.В. Юркевич [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – №. 12. – С. 55-72.
35. Оценка современного состояния хвостохранилища золоторудного производства: ценные и токсичные компоненты / Н.В. Юркевич [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 4. – С. 113-117.
36. Плюснин А.М. Природные гидрогеологические системы, формирование химического состава и реакция на техногенное воздействие (на

примере Забайкалья) : Монография / А.М. Плюснин, В.И. Гунин. – Улан-Удэ : Бурятский научный центр Сибирского отделения РАН, 2001. – 137 с.

37. Плюснин А.М. Численное моделирование формирования зоны окисления сульфидных месторождений. / А.М. Плюснин, В.И. Гунин // Вестник Бурятского государственного университета. Биология. География. – 1997. – №. 1. – С. 119-132.

38. Получение мышьяка из промышленных отходов цветных металлов электрохимическим методом / В.В. Турыгин [и др.] // Неорганические материалы. – 2008. – Т. 44. – №. 9. – С. 1065-1073.

39. Пospelов Г.Л. Строение и развитие рудообразующих флюидных динамических систем с полиморфной зональностью (на примере Салаирского рудного поля) / Г.Л. Пospelов, А.С. Лапухов // Физические и физико-химические процессы в динамических рудообразующих системах. – Новосибирск: Наука, 1971. – С. 8-55.

40. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 г. № 552 (ред. от 10.03.2020) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». // Официальный интернет-портал правовой информации. 2020. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006160052/> (Дата обращения 20.10.2020).

41. Регионы и города России: интегральная оценка экологического состояния / Н.С. Касимов [и др.]. – Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Географический факультет, Русское географическое общество. – Москва : ИП Филимонов М.В., 2014. – 560 с.

42. Результаты изучения совместной миграции микроэлементов и органического вещества в речном стоке бореальной зоны / Ю.В. Алехин, С.М.

Ильина, С.А. Лапицкий, М.В. Ситникова // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2010. – №. 6. – С. 49-55.

43. Рентгенофлуоресцентный элементный анализ с использованием синхротронного излучения / В.Б. Барышев, Ю.П. Колмогоров, Г.Н. Кулипанов, А.Н. Скринский // Журнал аналитической химии. – 1986. – Т. 41. – №. 3. – С. 389-401.

44. Ресурсы барита, цветных и благородных металлов в хвостохранилище Талмовские Пески: минералого-геохимические и геофизические данные / Н.В. Юркевич [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – №. 3(55). – С. 105-114.

45. Салова Т.Ю. Техногенные системы и экологический риск / Т.Ю. Салова, Н.Ю. Громова // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – №. 2-2. – С. 295-296.

46. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утвержден 28.01.2021 : введен 01.03.2021. – Москва, 2021. – 975 с.

47. Смирнов С.С. Зона окисления сульфидных месторождений. – Изд-во Академии наук СССР, 1955. – 333 с.

48. Создание в России современной технологии переработки отечественных золото-сурьмяных руд / Ф.А. Мызенков [и др.] // Цветные металлы. – 1997. – №1. – С.26-30.

49. Техногенные озера: формирование, развитие и влияние на окружающую среду / С. Б. Бортникова, О. Л. Гаськова, А. А. Айриянц, Г. Н. Аношин. – Изд-во СО РАН, Филиал "Гео", 2003. – 120 с.

50. Фридланд С. В. Применение известкового метода для очистки сточных вод от соединений фосфора / С. В. Фридланд, Л. Ф. Галанцева, А. А. Нуруллин // Природообустройство. – 2009. – №. 5. – С. 16-27.

51. Эколого-геохимическое состояние речных вод Средней Сибири / Шварцев С.Л. [и др.] // Водные ресурсы. – 1996. – Т. 23. – №. 6. – С. 723-731.

52. Энциклопедия Забайкалья. Читинская область. В 4-х томах. – Новосибирск : Наука, 2006. – Т. 4. – 526 с.
53. A geophysical and geotechnical study to determine the hydrological regime of the Central Manitoba gold mine tailings deposit / B.L. Sherriff [et al.] // Canadian geotechnical journal. – 2009. – Т. 46. – № 1. – С. 69-80.
54. Acero P. Rate law for galena dissolution in acidic environment / P. Acero, J. Cama, C. Ayora // Chemical Geology. – 2007. – Т. 245. – № 3-4. – С. 219-229.
55. Acid Mine Drainage Contamination of the Ur Impoundment: Environmental Geochemistry / I. Myagkaya [et al.] // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 98. – С. 09021.
56. Acid Mine Drainage Migration of Belovo Zinc Plant (South Siberia, Russia): A Multidisciplinary Study / S. Bortnikova [et al.] // Water Security in the Mediterranean Region: An International Evaluation of Management, Control, and Governance Approaches, Springer Netherlands. – 2011. – С. 191-208.
57. Allison J.D. MINTEQA2/PRODEFA2, a geochemical assessment model for environmental systems: version 3.0 user's manual / Allison J.D., Brown D.S., Novo-Gradac K.J. // Ecological research series. – Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 1991. – 106 с.
58. Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron / C.O. Moses, D.K. Nordstrom, J.S. Herman, A.A. Mills // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1987. – Т. 51. – № 6. – С. 1561-1571.
59. ARD test handbook: project P387A, prediction and kinetic control of acid mine drainage / R. Smart [et al.] // AMIRA, International Ltd, Ian Wark Research Institute, Melbourne, Australia. – 2002. – 42 с.
60. Arsenic speciation in a contaminated gold processing tailings dam / O.V. Shuvaeva, S.B. Bortnikova, T.M. Korda, E.V. Lazareva // Geostandards Newsletter. – 2000. – Т. 24. – № 2. – С. 247-252.

61. Arsenic stability in arsenopyrite-rich cemented paste backfills: a leaching test-based assessment / S. Coussy [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2011. – T. 185. – № 2-3. – C. 1467-1476.
62. Assessment of emissions of trace elements and sulfur gases from sulfide tailings / S.B. Bortnikova, N.V. Yurkevich [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2018. – T. 186. – C. 256-269.
63. Assessment of environmental risk of reclaimed mining ponds using geophysics and geochemical techniques / Acosta J.A. [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2014. – T. 147. – C. 80-90.
64. Assessment of the acid mine drainage potential of waste rocks at the Ak-Sug porphyry Cu-Mo deposit / N. Abrosimova [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2015. – T. 157. – C. 1-14.
65. Awoh A.S. Field study of the chemical and physical stability of highly sulphide-rich tailings stored under a shallow water cover/ A.S. Awoh, M. Mbonimpa, B. Bussière // *Mine Water and the Environment*. – 2013. – T. 32. – № 1. – C. 42.
66. Ball J.W. User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and text cases for calculating speciation of major, trace, and redox elements in natural waters / J.W. Ball, D.K. Nordstrom // *US Geological Survey*. – 1991. – 189 c.
67. Biogeochemical indication of environmental contamination: A case study of a large copper smelter / N.A. Gashkina, Y.G. Tatsii, V.N. Udachin, P.G. Aminov // *Geochemistry International*. – 2015. – T. 53. – C. 253-264.
68. Bipp H., Kieczka H. Formamides // *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. – 2011.
69. Blair R.D. Groundwater monitoring and contaminant occurrence at an abandoned tailings area, Elliot Lake, Ontario / R.D. Blair, J.A. Cherry, T.P. Lim, A.J. Vivyurka // *International Conference On Uranium Mine Waste Disposal, Vancouver BC, USA*. – 1980. – C. 411-444.
70. Blowes D. Predicting the duration and extent of acid drainage release from sulfide bearing mine wastes // *2013 GSA Annual Meeting in Denver*. – 2013.

71. Blowes D.W. The environmental effects of mine wastes // Proceedings of exploration 97. 4th Decennial International conference on mineral exploration. – 1997. – T. 97. – C. 887-892.
72. Bochkarev G.R. Natural sorbent and catalyst to remove arsenic from natural and waste waters / G.R. Bochkarev, G.I. Pushkareva, K.A. Kovalenko // Journal of mining science. – 2010. – T. 46. – C. 197-202.
73. Bortnikova S., Bessonova E., Gaskova O. Geochemistry of arsenic and metals in stored tailings of a Co–Ni arsenide-ore, Khovu-Aksy area, Russia // Applied Geochemistry. – 2012. – T. 27. – № 11. – C. 2238-2250.
74. Bowell R. Pit lake systematics: A special issue // Mine Water and the Environment. – 2003. – T. 22. – № 4. – C. 167-169.
75. Bowman J.H., Barket D.J., Shepson P.B. Atmospheric chemistry of nonanal // Environmental science & technology. – 2003. – T. 37. – № 10. – C. 2218-2225.
76. Breuer P.L., Hewitt D.M., Meakin R.L. Does pre-oxidation or lead (II) addition reduce the impact of iron sulfides in cyanidation? // Hydrometallurgy 2008: Proceedings of the 6th International Symposium, 17-20 August 2008, Phoenix, Arizona, USA. – 2008. – C. 750-757.
77. Briggs D. Population differentiation in *Marchantia polymorpha* L. in various lead pollution levels // Nature. – 1972. – T. 238. – № 5360. – C. 166-167.
78. Brimblecombe P. The global sulfur cycle // Treatise on Geochemistry: Second Edition, Elsevier Inc. – 2013. – C. 559-591.
79. Brookins D.G. Eh-pH Diagrams for Geochemistry // Springer Science & Business Media, Berlin/Heidelberg, Germany. – 2012. – 108 c.
80. Buffering of acidic mine lakes: the relevance of surface exchange and solid-bound sulphate / W. Uhlmann, H. Büttcher, O. Totsche, C.E.W. Steinberg // Mine water and the Environment. – 2004. – T. 23. – C. 20-27.
81. Chandra A.P., Gerson A.R. The mechanisms of pyrite oxidation and leaching: A fundamental perspective // Surface Science Reports. – 2010. – T. 65. – № 9. – C. 293-315.

82. Characterization and assessment of potential environmental risk of tailings stored in seven impoundments in the Aries river basin, Western Romania / Levei E. [et al.] // *Chemistry Central Journal*. – 2013. – T. 7. – № 1. – C. 1-14.
83. Chemical and microbiological assessment of pendimethalin-contaminated soil after treatment with Fenton's reagent / C.M. Miller, R.L. Valentine, M.E. Roehl, P.J. Alvarez // *Water Research*. – 1996. – T. 30. – № 11. – C. 2579-2586.
84. Chudnenko K.V. Staging of interaction in the " carbon-water-gas" system / K.V. Chudnenko, S.K. Pavlov // *Water-Rock Interaction*. – 1995. – C. 847-850.
85. Current state of the gold mining waste from the ores of the Ursk Deposit (Western Siberia, Russia) / N. Yurkevich [et al.] // *Applied Sciences*. – 2022. – T. 12. – № 20. – C. 10610.
86. Cyanides, arsenic, and noble metals in abandoned gold ore cyanidation tailings and surface waters in a permafrost region (Transbaikal Territory, Russia) / N. Yurkevich [et al.] // *Mine Water Environ.* – 2021. – T. 40. – № 4. – C. 943-955.
87. Descostes M. Pyrite dissolution in acidic media / M. Descostes, P. Vitorge, C. Beaucaire // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2004. – T. 68. – № 22. – C. 4559-4569.
88. Development of a textural index for the prediction of acid rock drainage / A. K. Parbhakar-Fox, M. Edraki, S. Walters, D. Bradshaw // *Minerals Engineering*. – 2011. – T. 24. – № 12. – C. 1277-1287.
89. Dimethyl sulfide dynamics in first-year sea ice melt ponds in the Canadian Arctic Archipelago / M. Gourdal [et al.] // *Biogeosciences*. – 2018. – T. 15. – № 10. – C. 3169-3188.
90. Ecological and geochemical state of river waters in Central Siberia / S. L. Shvartsev [et al.] // *Water Resour.* – 1996. – T. 23. – № 6. – C. 723-731.
91. Effect of neutralized solid waste generated in lime neutralization on the ferrous ion bio-oxidation process during acid mine drainage treatment / F. Liu [et al.] // *Journal of hazardous materials*. – 2015. – T. 299. – C. 404-411.

92. Elberling B. Temperature and oxygen control on pyrite oxidation in frozen mine tailings // *Cold Regions Science and Technology*. – 2005. – T. 41. – № 2. – C. 121-133.
93. Element cycling during the transition from alkaline to acidic environment in an active porphyry copper tailings impoundment, Chuquicamata, Chile / J. Smuda [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2014. – T. 140. – C. 23-40.
94. Environmental aspects of VOCs evolved in the early stages of human decomposition / M. Statheropoulos [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2007. – T. 385. – № 1-3. – C. 221-227.
95. Florence T.M. The speciation of trace elements in waters // *Talanta*. – 1982. – T. 29. – № 5. – C. 345-364.
96. Fu F. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review / F. Fu, Q. Wang // *Journal of environmental management*. – 2011. – T. 92. – № 3. – C. 407-418.
97. Gas transfer of metals during the destruction of efflorescent sulfates from the Belovo Plant Sulfide Slag, Russia / S. Bortnikova, N. Abrosimova, N. Yurkevich [et al.] // *Minerals*. – 2019. – T. 9. – № 6. – C. 344.
98. Gas-aerosol phase elements transfer from dump of Komsomolsk gold extract plant, Kemerovo Region / S. Bortnikova [et al.] // *Chem. Sustain. Dev.* – 2016. – T. 24. – C. 11-22.
99. Geochemical signatures and mechanisms of trace elements dispersion in the area of the Vale das Gatas mine (Northern Portugal) / P. F. Ávila, J. S. Oliveira, E. F. da Silva, E. C. Fonseca // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2005. – T. 85. – № 1. – C. 17-29.
100. Geophysical delineation of acidity and salinity in the Central Manitoba gold mine tailings pile, Manitoba, Canada / C. Tycholiz [et al.] // *Journal of Applied Geophysics*. – 2016. – T. 131. – C. 29-40.
101. Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area / N.V. Yurkevich [et al.] // *Toxicological & Environmental Chemistry*. – 2017. – T. 99. – № 9-10. – C. 1328-1345.

102. Gieré R. The role of secondary minerals in controlling the migration of arsenic and metals from high-sulfide wastes (Berikul gold mine, Siberia) / R. Gieré, N.V. Sidenko, E.V. Lazareva // *Applied Geochemistry*. – 2003. – T. 18. – № 9. – C. 1347-1359.
103. Gupta N. Enzymatic mechanism and biochemistry for cyanide degradation: a review / N. Gupta, C. Balomajumder, V. K. Agarwal // *Journal of hazardous materials*. – 2010. – T. 176. – № 1-3. – C. 1-13.
104. Gustafsson J.P. Visual MINTEQ 3.0 user guide // KTH, Department of Land and Water Resources, Stockholm, Sweden. – 2011. – T. 550.
105. Hale M. Gas geochemistry and deeply buried mineral deposits: the contribution of the Applied Geochemistry Research Group, Imperial College of Science and Technology, London. // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2010. – T. 10 (3). – 261-267.
106. Hällström L.P. B. Mobility of Be, Bi, F, Ga, Ge and W in Surface Water and the Water Quality Impact on Epilithic Diatoms Downstream of the Historical Yxsjöberg Mine Site, Sweden // *Mine Water and the Environment*. – 2022. – T. 41. – № 3. – C. 731-747.
107. Hawkins A.B., St John T.W. Implications of pyrite oxidation for engineering works // Berlin : Springer International Publishing. – 2014. – 311 c.
108. Heavy metal pollution and acid drainage from the abandoned Balya Pb-Zn sulfide Mine, NW Anatolia, Turkey / A. Aykol [et al.] // *Environmental Geology*. – 2003. – T. 45. – C. 198-208.
109. Heinen W. Organic sulfur compounds resulting from the interaction of iron sulfide, hydrogen sulfide and carbon dioxide in an anaerobic aqueous environment / W. Heinen, A.M. Lauwers // *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*. – 1996. – T. 26. – C. 131-150.
110. Hinkle M.E. Sulphur gases / M.E. Hinkle, J.S. Lovell // *Handbook of Exploration Geochemistry*, Elsevier Science BV. – 2000. – T. 7. – C. 249-289.

111. Ho Y.S. Second-order kinetic model for the sorption of cadmium onto tree fern: a comparison of linear and non-linear methods // *Water research*. – 2006. – T. 40. – № 1. – C. 119-125.
112. Holmes P.R. The kinetics of the oxidation of pyrite by ferric ions and dissolved oxygen: an electrochemical study / P.R. Holmes, F.K. Crundwell // *Geochimica et cosmochimica acta*. – 2000. – T. 64. – № 2. – C. 263-274.
113. Horton R.J. Electrical property measurements of mine waste from the Sunday #2 and Venir mines. Leadville, Colorado // *US Geological Survey*. – 2003. – 29 c.
114. Hoth N. Predictive modelling of dump water impact on the surroundings of the lignite dump site Jänschwalde (Eastern Germany) / N. Hoth, S. Wagner, F. Häfner // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2001. – T. 73. – № 2. – C. 113-121.
115. Hydrochemical Anomalies in the Vicinity of the Abandoned Molybdenum Ores Processing Tailings in a Permafrost Region (Shahtama, Transbaikal Region) / N. Yurkevich [et al.] // *Water*. – 2023. – T. 15. – № 8. – C. 1476.
116. Hydrochemical characteristic of the arctic thermocarst lakes (Gydan peninsula, Russian) / N. Yurkevich [et al.] // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*. – 2020. – T. 20. – № 5.1. – C. 423-430.
117. Identification of acid rock drainage sources through mesotextural classification at abandoned mines of Croydon, Australia: Implications for the rehabilitation of waste rock repositories / A.K. Parbhakar-Fox [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2014. – T. 137. – C. 11-28.
118. Improvements for mass-exchange networks design / P. Castro, H. Matos, M. C. Fernandes, C.P. Nunes // *Chemical Engineering Science*. – 1999. – T. 54. – № 11. – C. 1649-1665.
119. In-situ remediation approaches for the management of contaminated sites: a comprehensive overview / S. Kuppusamy [et al.] // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2016. – T. 236. – C. 1-115.

120. Integrated geophysical and geochemical study on AMD generation at the Haveri Au–Cu mine tailings, SW Finland / E. Placencia-Gómez, A. Parviainen, T. Hokkanen, K. Loukola-Ruskeeniemi // *Environmental Earth Sciences*. – 2010. – T. 61. – C. 1435-1447.
121. John M.K. Lead distribution in plants grown on a contaminated soil / M.K. John, C.J. VanLaerhoven // *Environmental letters*. – 1972. – T. 3. – № 2. – C. 111-116.
122. Johnson D.B. Acid mine drainage remediation options: a review / D.B. Johnson, K.B. Hallberg // *Science of the total environment*. – 2005. – T. 338. – № 1-2. – C. 3-14.
123. Johnson W. J. Surface geophysical methods for the detection of underground mine workings / W.J. Johnson, R.E. Snow, J.C. Clark // *Symposium on Geotechnical Methods for Mine Mapping Verifications, Charleston, West Virginia, October*. – 2002. – T. 29.
124. Kelly B.C. *Chemistry and Biology of Solid Waste* / B.C. Kelly, O.H. Tuovinen // Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1988. – 33 c.
125. Koch T. A novel bacterial sulfur oxidation pathway provides a new link between the cycles of organic and inorganic sulfur compounds / T. Koch, C. Dahl // *The ISME journal*. – 2018. – T. 12. – № 10. – C. 2479-2491.
126. Kumpiene J. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—a review / J. Kumpiene, A. Lagerkvist, C. Maurice // *Waste management*. – 2008. – T. 28. – № 1. – C. 215-225.
127. Kurniawan T.A. Degradation of recalcitrant compounds from stabilized landfill leachate using a combination of ozone-GAC adsorption treatment / T.A. Kurniawan, W.H. Lo, G.Y.S. Chan // *Journal of hazardous materials*. – 2006. – T. 137. – № 1. – C. 443-455.
128. Lacustrine sediments and lichen transplants: two contrasting and complimentary environmental archives of natural and anthropogenic lead in the South Urals, Russia / B. Spiro [et al.] // *Aquatic sciences*. – 2013. – T. 75. – C. 185-198.

129. Leaching of heavy metals from Dexing copper mine tailings pond / Y. Guo [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2013. – T. 23. – № 10. – C. 3068-3075.
130. Leybourne M. Geochemistry of surface waters associated with an undisturbed Zn–Pb massive sulfide deposit: Water–rock reactions, solute sources and the role of trace carbonate / M. Leybourne, W. Goodfellow // Chemical Geology – 2010. – T. 279. – № 1-2. – C. 40-54.
131. Linnik P.M. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds / P.M. Linnik, I.B. Zubenko // Lakes & Reservoirs: Research & Management. – 2000. – T. 5. – № 1. – C. 11-21.
132. Linnik P.N. Forms of Metals Migration in Fresh Surface Waters / P.N. Linnik, B.I. Nabivanets ; Gidrometeoizdat, L., Ed.; Mir: Moscow, Russia, 1986. – 271 c.
133. Liu H. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China) / H. Liu, A. Probst, B. Liao // Science of the total environment. – 2005. – T. 339. – № 1-3. – C. 153-166.
134. Liu W.X. Environmental quality assessment on a river system polluted by mining activities / W.X. Liu, R.M. Coveney, J.L. Chen // Applied Geochemistry. – 2003. – T. 18. – № 5. – C. 749-764.
135. Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies // A practical guide to. – 1999. – T. 2. – C. 70.
136. Lottermoser B.G. Mine Wastes. Characterization, Treatment, Environmental Impacts / B.G. Lottermoser ; 2nd edition. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag., 2010. – 335 c.
137. Low cost microbial fuel cells for energy recovery from wastewater / Pant D. [et al.] // Journal of Biotechnology. – 2010. – T. 150. – C. 25.
138. Makas A.L. Field gas chromatography–mass spectrometry for fast analysis / A.L. Makas, M.L. Troshkov // Journal of Chromatography B. – 2004. – T. 800. – № 1-2. – C. 55-61.

139. Mansfield J.W. Antimicrobial compounds and resistance: the role of phytoalexins and phytoanticipins / J.W. Mansfield // *Mechanisms of resistance to plant diseases*. – Dordrecht : Springer Netherlands. – 2000. – C. 325-370.
140. Marsden J. The Chemistry of Gold Extraction / J. Marsden, I. House // 2nd edn, Soc for Mining, Metallurgy, and Exploration, Englewood, USA, 2006. – C. 251–260.
141. McCleskey R.B. A new method of calculating electrical conductivity with applications to natural waters / R.B. McCleskey, D.K. Nordstrom, J.N. Ryan, J.W. Ball // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2012. – T. 77. – C. 369-382.
142. Measurement of labile metals in acid rock drainage springs, New Zealand: Field application of anodic stripping voltammetry / J. Brown, S. Sander, D. Craw, K. Hunter // *Applied geochemistry*. – 2005. – T. 20. – № 8. – C. 1533-1545.
143. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste / S. Bortnikova, N. Yurkevich [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2019. – T. 647. – C. 411-419.
144. Metal distribution and environmental problems related to sulfide oxidation in the Libiola copper mine area (Ligurian Apennines, Italy) / E. Dinelly, F. Lucchini, M. Fabbri, G. Cortecci // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2001. – T.74. – C. 141-152.
145. Minsley B.J. Geophysical characterization of subsurface properties relevant to the hydrology of the Standard Mine in Elk Basin, Colorado / B.J. Minsley, L.B. Ball, B.L. Burton // U. S. Geological Survey, 2010. – 46 c.
146. Mobility and fate of Thallium and other potentially harmful elements in drainage waters from a decommissioned Zn-Pb mine (North-Eastern Italian Alps) / E. Pavoni [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2018. – T. 188. – C. 1-10.
147. Mohan S.V. Simulated acid azo dye (Acid black 210) wastewater treatment by periodic discontinuous batch mode operation under anoxic–aerobic–anoxic microenvironment conditions / S.V. Mohan, N.C. Rao, P.N. Sarma // *Ecological Engineering*. – 2007. – T. 31. – № 4. – C. 242-250.

148. Negative pH and extremely acidic mine waters from Iron Mountain, California / D.K. Nordstrom, C.N. Alpers, C.J. Ptacek, D.W. Blowes // *Environmental Science & Technology*. – 2000. – T. 34. – № 2. – C. 254-258.
149. Nelson P.H. Estimation of sulfide content from induced polarization data / P. H. Nelson, G. D. Van Voorhis // *Geophysics*. – 1983. – T. 48. – № 1. – C. 62-75.
150. Nordstrom D.K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals // *Acid sulfate weathering*. – 1982. – T. 10. – C. 37-56.
151. Nordstrom D.K. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites // *Applied Geochemistry*. – 2015. – T. 57. – C. 17-34.
152. Nordstrom D.K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // *Applied geochemistry*. – 2011. – T. 26. – № 11. – C. 1777-1791.
153. Nordstrom D. K. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update/ D.K. Nordstrom, D.W. Blowes, C.J. Ptacek // *Applied Geochemistry*. – 2015. – T. 57. – C. 3-16.
154. Numerical simulations of pyrite oxidation and acid mine drainage in unsaturated waste rock piles / J.W. Molson, O. Fala, M. Aubertin, B. Bussière // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2005. – T. 78. – № 4. – C. 343-371.
155. Occurrence and mobility of As in the Ylöjärvi Cu–W–As mine tailings / A. Parviainen [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2012. – T. 114. – C. 36-45.
156. Oldenburg D.W. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys / D.W. Oldenburg, Y. Li // *Geophysics*. – 1999. – T. 64. – № 2. – C. 403-416.
157. Parbhakar-Fox A. A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices / A. Parbhakar-Fox, B.G. Lottermoser // *Minerals Engineering*. – 2015. – T. 82. – C. 107-124.
158. Parbhakar-Fox A. Geoenvironmental characterisation of heap leach materials at abandoned mines: Croydon au-mines, QLD, Australia // *Minerals*. – 2016. – T. 6. – № 2. – C. 52.

159. Parkhurst D.L. Description of input and examples for PHREEQC version 3—a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations / D.L. Parkhurst, C.A.J. Appelo // US geological survey techniques and methods. – 2013. – T. 6. – № A43. – C. 497.
160. Pellerin L. Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations // Surveys in Geophysics. – 2002. – T. 23. – C. 101-132.
161. Pereira P.T. Isolation, selection and characterization of a cyanide-degrading fungus from an industrial effluent / P.T. Pereira, J.D. Arrabaça, M.T. Amaral-Collaço // International biodeterioration & biodegradation. – 1996. – T. 37. – № 1-2. – C. 45-52.
162. Photochemical production of carbonyl sulfide, carbon disulfide and dimethyl sulfide in a lake water / Q. Du [et al.] // Journal of Environmental Sciences. – 2017. – T. 51. – C. 146-156.
163. Plante B. Static tests response on 5 Canadian hard rock mine tailings with low net acid-generating potentials / B. Plante, B. Bussière, M. Benzaazoua // Journal of Geochemical Exploration. – 2012. – T. 114. – C. 57-69.
164. Preliminary model of porphyry copper deposits / B.R. Berger, R.A. Ayuso, J.C. Wynn, R.R. Seal II // US Geological Survey. – 2008. – 55 c.
165. Ramstedt M. Aqueous geochemistry in the Udden pit lake, northern Sweden / M. Ramstedt, E. Carlsson, L. Lövgren // Applied Geochemistry. – 2003. – T. 18. – № 1. – C. 97-108.
166. Redução de Efluentes Através de Integração de Processos / P. Castro, H.A. Matos, C. Fernandes, C.P. Nunes // XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química. – 2000.
167. Residence time distributions and flow behaviour within primary crude oil–water separators treating well-head fluids / M.J.H. Simmons, E. Komonibo, B.J. Azzopardi, D.R. Dick // Chemical Engineering Research and Design. – 2004. – T. 82. – № 10. – C. 1383-1390.
168. Results of mine tailings – water interaction: a column leaching study on the

example of waste materials of Komsomolsky gold processing plant / N. Abrosimova, ..., N. Yurkevich [et al.] // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015, June 16 – 25, Albena Resort, Bulgaria, 2015. – C. 765-770.

169. Rickard D. Chemistry of iron sulfides / D. Rickard, G.W. Luther // *Chemical reviews*. – 2007. – T. 107. – № 2. – C. 514-562.

170. Rimstidt J.D. Pyrite oxidation: a state-of-the-art assessment of the reaction mechanism / J.D. Rimstidt, D.J. Vaughan // *Geochimica et Cosmochimica acta*. – 2003. – T. 67. – № 5. – C. 873-880.

171. Salomons W. Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1995. – T. 52. – C. 5-23.

172. Shanjun L.I. Dynamic invasion profiles and time-lapse electrical logs / L.I. Shanjun, L.C. Shen // Galveston, USA: SPWLA 44th Annual Logging Symposium. – 2003. – № SPWLA-2003-E.

173. Shevenell L. Controls on pit lake water quality at sixteen open-pit mines in Nevada / L. Shevenell, K.A. Connors, C.D. Henry // *Applied Geochemistry*. – 1999. – T. 14. – № 5. – C. 669-687.

174. Shuvaeva O.V. Arsenic speciation in water by high-performance liquid chromatography with electrothermal atomic absorption detection / O.V. Shuvaeva, O.S. Koshcheeva, N.F. Beisel // *Journal of Analytical Chemistry*. – 2002. – T. 57. – C. 1037-1041.

175. Smedley P.L. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters / P.L. Smedley, D.G. Kinniburgh // *Applied geochemistry*. – 2002. – T. 17. – № 5. – C. 517-568.

176. Smith R.M. Critically selected stability constants of metal complexes / R.M. Smith, A.E. Martell, R.J. Motekaitis // *NIST standard reference database*. – 2004. – T. 46. – C. 8.

177. Smith R.S. Using reversed polarity airborne transient electromagnetic data to map tailings around mine sites / R.S. Smith, L.Z. Cheng, M. Chouteau // *The Leading Edge*. – 2008. – T. 27. – № 11. – C. 1470-1478.

178. Speciation and colloid transport of arsenic from mine tailings / A.J. Slowey, S.B. Johnson, M. Newville, G.E. Brown Jr // *Applied Geochemistry*. – 2007. – T. 22. – № 9. – C. 1884-1898.
179. Speciation, size fractionation and transport of trace elements in the continuum soil water–mire–humic lake–river–large oligotrophic lake of a Subarctic watershed / Ilina S.M. [et al.] // *Aquatic geochemistry*. – 2016. – T. 22. – C. 65-95.
180. Studies on the optimum conditions using acid-washed zero-valent iron/aluminum mixtures in permeable reactive barriers for the removal of different heavy metal ions from wastewater / W. Han [et al.] // *Journal of hazardous materials*. – 2016. – T. 302. – C. 437-446.
181. Study of arsenopyrite weathering products in mine wastes from abandoned tungsten and tin exploitations / A. Murciego [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2011. – T. 186. – № 1. – C. 590-601.
182. Study of water-rock interaction in sulfide mining tailings using geochemical and geoelectrical methods / N. Yurkevich [et al.] // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2017. – T. 17. – C. 112-115.
183. Sulfur and nitrogen gases in the vapor streams from ore cyanidation wastes at a sharply continental climate, Western Siberia, Russia / N. Yurkevich [et al.] // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2019. – T. 230. – C. 1-17.
184. Sulfur emissions to the atmosphere from natural sources / T.S. Bates, B.K. Lamb, A. Guenther, J. Dignon, R.E. Stoiber // *Journal of Atmospheric Chemistry*. – 1992. – T. 14. – C. 315-337.
185. Takeno N. Atlas of Eh-pH diagrams // Geological survey of Japan open file report. – 2005. – T. 419. – № 102. – C. 285.
186. Taylor C.H. Sulfur gases produced by the decomposition of sulfide minerals: Application to geochemical exploration / C. H. Taylor, S. E. Kesler, P. L. Cloke // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1982. – T. 17. – № 3. – C. 165-185.
187. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution // Blackwell Publishing, Incorporated, Oxford, 1985. – 328 c.

188. Teršič T. Impact of mining activities on soils and sediments at the historical mining area in Podljubelj, NW Slovenia / T. Teršič, M. Gosar, R. Šajn // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2009. – T. 100. – № 1. – C. 1-10.

189. Testing of natural sorbents for the assessment of heavy metal ions' adsorption / Yurak V. [et al.] // *Applied Sciences*. – 2021. – T. 11. – № 8. – C. 3723.

190. The Combination of Geoelectrical Measurements and Hydro-Geochemical Studies for the Evaluation of Groundwater Pollution in Mining Tailings Areas / S. Bortnikova, N. Yurkevich [et al.] // *Threats to the Quality of Groundwater Resources*. – 2013. – C. 239-256.

191. The combination of geoelectrical measurements and hydro-geochemical studies for the evaluation of groundwater pollution in mining tailings areas / S. Bortnikova, N. Yurkevich [et al.] // *Threats to the Quality of Groundwater Resources: Prevention and Control*. – 2016. – C. 239-256.

192. The Terramare and the surrounding hydraulic structures: a geophysical survey of the Santa Rosa site at Poviglio (Bronze Age, northern Italy) / M. Mele [et al.] // *Journal of archaeological science*. – 2013. – T. 40. – № 12. – C. 4648-4662.

193. The effectiveness of metal and metalloid sorption from mining influenced waters by natural and modified peat / H. Gogoi [et al.] // *Mine water and the Environment*. – 2018. – T. 37. – № 4. – C. 734-743.

194. Three-dimensional (3D) palladium-zinc oxide nanowire nanofiber as photocatalyst for water treatment / J. Choi [et al.] // *Water research*. – 2016. – T. 101. – C. 362-369.

195. Treatment of Cyanide Heap Leaches and Tailings // U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. – 1994. – 53 c.

196. Tuller H.L. Point defects in oxides: tailoring materials through defect engineering / H.L. Tuller, S.R. Bishop // *Annual Review of Materials Research*. – 2011. – T. 41. – C. 369-398.

197. Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data / V.V.

Olenchenko [et al.] // Russian Geology and Geophysics. – 2016. – T. 57. – № 4. – C. 617-628.

198. Vodyanitskii Y.N. Hydrogenic heavy metals contamination of fluvisols in the middle Cis-Urals Region, Russia / Y. N. Vodyanitskii, A. T. Savichev // Water, Air, & Soil Pollution. – 2014. – T. 225. – C. 1-12.

199. Water toxicity and metal contamination assessment of a polluted river: the Upper Vistula River (Poland) / C. Guéguen, R. Gilbin, M. Pardos, J. Dominik // Applied Geochemistry. – 2004. – T. 19. – № 1. – C. 153-162.

200. World Health Organization. Guidelines for Drinking Water Quality // Geneva, Switzerland, 2008. – 103 c.

201. Wurl J. Arsenic content in groundwater from the southern part of the San Antonio-El Triunfo mining district, Baja California Sur, Mexico / J. Wurl, L. Mendez-Rodriguez, B. Acosta-Vargas // Journal of Hydrology. – 2014. – T. 518. – C. 447-459.

202. Yao C.Y. Reservoir permeability estimation from time-lapse log data / C.Y. Yao, S.A. Holditch // SPE Formation Evaluation. – 1996. – T. 11. – № 02. – C. 69-74.

203. 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. – T. 97. – № 1. – C. 76-89.

204. Zhang J.H. A method to evaluate reservoirs and estimate saturation by dynamic responses of dual-induction logging tools / J.H. Zhang, Q. Hu, J. Oyang, C.Z. Lin // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 1998. – T. 19. – № 3-4. – C. 233-240.