

На правах рукописи

**Шафигуллина Гульнара Турдибаевна**

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ  
ПРОЦЕССОВ ТЕХНОГЕНЕЗА  
УЧАЛИНСКОЙ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
(ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

Специальность 25.00.36 — геоэкология

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва  
2008

Работа выполнена в Институте геологии Уфимского Научного Центра Российской Академии наук и Институте минералогии Уральского отделения Российской Академии наук

**Научные руководители** — доктор геолого-минералогических наук  
**Серавкин Игорь Борисович**  
(Институт геологии УНЦ РАН, г. Уфа)

кандидат геолого-минералогических наук  
**Удачин Валерий Николаевич**  
(Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс)

**Официальные оппоненты** — доктор геолого-минералогических наук  
**Кузькин Вячеслав Иванович**  
(ФГУП ВИМС, г. Москва)

доктор геолого-минералогических наук  
**Викентьев Илья Владимирович**  
(ИГЕМ РАН, г. Москва)

**Ведущая организация** — Башкирский Государственный Университет (г. Уфа)

Защита состоится «23» мая 2008 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д216.005.01 в Федеральном государственном унитарном предприятии Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М.Федоровского (ФГУП ВИМС) по адресу: 119017 Москва, Старомонетный пер., 31, зал заседания Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП ВИМСа.

Автореферат диссертации разослан «    » апреля 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат геолого-минералогических наук

Т.Н. Шурига

## **Введение**

*Актуальность работы.* Зауралье является основным регионом Башкирии с развитой горнодобывающей промышленностью. Здесь расположены медноколчеданные, золоторудные и другие месторождения, многие из которых разрабатываются. Самым крупным является Учалинское Cu-Zn-колчеданное месторождение, на основе которого был создан и действует Учалинский горно-обогачительный комбинат — крупнейшее российское предприятие по добыче и переработке сульфидных руд. Кроме Учалинского месторождения рудную базу комбината составляют месторождения Верхнеуральского рудного района, частично расположенные на территории Челябинской области. С геологической позиции регион хорошо изучен в процессе геологических съемок различного масштаба (1:200 000 — 1:50 000), поисковых, геологоразведочных и тематических работ. Несмотря на ряд проведенных исследований [Белан, 1997, 2003, 2007; Кутлиахметов, 2002], эколого-геохимическая изученность региона недостаточна. В первой из выполненных оценок эколого-геохимической обстановки данного района [Белан, 1997] приведена характеристика отдельных компонентов экосистемы (почвы, воды, снег, сельхозпродукция приусадебных участков) с оценкой степени загрязнения территории в сравнении с предельно допустимыми концентрациями. В работе А.Н. Кутлиахметова [2002] рассмотрена специальная проблема рутинного загрязнения территории. Среди нерешенных остаются вопросы, связанные с миграцией основных поллютантов, формами нахождения тяжелых металлов в поверхностных водах, почвах, донных отложениях транзитных и аккумулятивных ландшафтов. Отсутствует характеристика источников эмиссии для кислых рудничных вод и классификационная оценка техногенных водотоков.

Настоящая диссертационная работа, выполненная на материалах исследования природно-техногенных ландшафтов Учалинского горнодобывающего района, включая г. Учалы и прилегающие к нему территории (рис. 1), направлена на восполнение вышеперечисленных пробелов и на более углубленное изучение ранее выявленных закономерностей распределения потенциальных токсикантов в процессах загрязнения окружающей среды.

«Наследство», оставленное за более чем сорокалетнюю историю отработки Учалинского месторождения, в настоящее время представляет собой большие проблемы для окружающей среды. Исследования поверхностных и техногенных вод, донных отложений поверхностных водотоков, почвенного и снежного покровов и лишайников свидетельствуют о широком развитии загрязнения их тяжелыми металлами (Cu, Zn, Pb, Ni, Co, Mn) и сульфатами. Район вошел в число приоритетных для изучения воздействия горнорудной промышленности на окружающую среду в рамках 3<sup>х</sup>-летнего проекта MinUrals, финансировавшегося Евросоюзом по научно-технической программе COPERNICUS. Часть этих работ посвящена текущей оценке ситуации, а другая часть сфокусирована на приоритетах по предотвращению негативного воздействия вредных факторов. Исследования проведены также при поддержке проектов интеграционных исследований УрО РАН — СО РАН («Геохимия окружающей среды горнопромышленных ландшафтов Сибири и Урала») и Министерства образования и науки (проект РНП.2.1.1.1840).

**Цель работы** — геоэкологическое обоснование процессов изменения окружающей среды, сопровождающих формирование и функционирование Учалинской геотехнической системы (ГТС).

Для достижения цели решались следующие задачи:

1) изучение состава вод аквальных систем природного и техногенного происхождения, установление их физико-химических параметров (рН, Eh, ионный состав), определяющих условия миграции элементов;

2) выяснение сезонных изменений состава поверхностных вод;

3) изучение донных отложений поверхностных водотоков как одного из индикаторов в комплексной оценке техногенной нагрузки дренируемой площади;

4) оценка распределения валовых содержаний тяжелых металлов по почвенному профилю с учетом местного геохимического фона и их связи с основными физико-химическими параметрами почв;

5) установление форм нахождения тяжелых металлов в почвах, донных отложениях, влекомой взвеси и определение степени потенциальной эколого-токсикологической опасности химического загрязнения;

6) исследование состава внешних отвалов как поставщика тяжелых металлов в окружающую среду; экспериментально-аналитическая оценка поведения отдельных элементов в породах, слагающих отвалы, с определением класса опасности отходов.

### Фактический материал.

Основу диссертационной работы составляет фактический материал, собранный автором в течение пяти полевых сезонов в период с 1999 по 2005 гг. в районе Учалинской ГТС и обработанный автором с помощью сотрудников лаборатории минералогии техногенеза и геоэкологии Института минералогии УрО РАН. Отобрано и проанализировано (рис. 2): 30 проб монофракций сульфидов, 28 проб пород, 79 гидрохимических проб, 32 пробы донных осадков транзитных водотоков, 27 проб донных отложений озёр, 24 пробы влекомой взвеси, 87 проб почв, 12 проб снегового покрова, 68 проб лишайников.

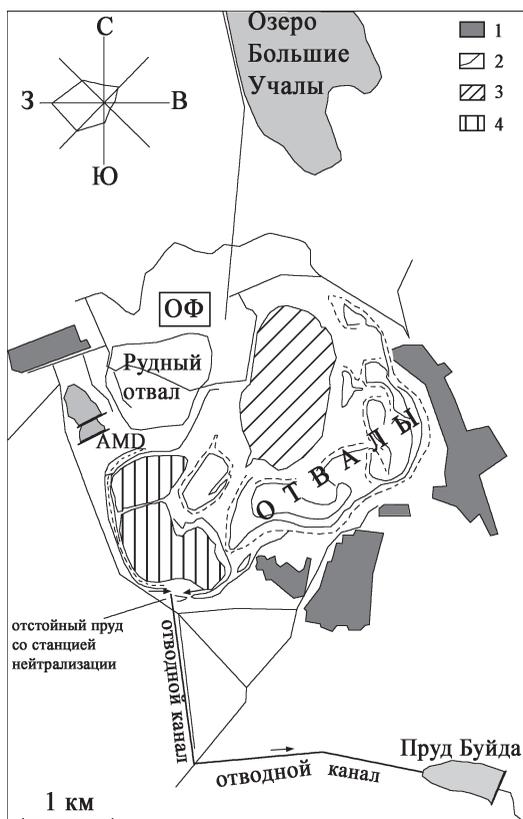


Рис. 1. Схема размещения основных объектов Учалинской ГТС и роза ветров метеостанции города Учалы  
ОФ — обогащительная фабрика, AMD — рудничный дренаж, 1 — город Учалы, 2 — автодороги, 3 — карьер, 4 — хвостохранилище

Аналитические исследования выполнены в Южно-Уральском центре коллективного пользования по анализу минерального сырья Института минералогии УрО РАН (аттестат аккредитации РОС гл.0001.514.536 Госстандарта РФ). Концентрация металлов во всех исследуемых материалах определялась методом атомно-абсорбционной спектрометрии на приборах «Perkin-Elmer 3110» с пламенным режимом атомизации и «Analyst 300 HGA 850» с электротермическим режимом атомизации (аналитики М.Н. Маляренко, Л.Б. Лапшина). Минералы шлихового опробования донных отложений были исследованы на сканирующем микроскопе РЭММА 202 МВ с энергодисперсионным анализатором (аналитик В.А. Котляров).

**Научная новизна.** На обширном аналитическом материале выяснен основной кислотопродуцирующий агент отвальной массы (1-е защищаемое положение), установлены закономерности миграции тяжелых металлов в растворенной и взвешенной формах в транзитных поверхностных водотоках природных участков и зон техногенеза Учалинской ГТС. Продемонстрирована возможность оценки степени геохимической активности отвальной массы с использованием экспериментально-аналитических процедур в масштабе исследования от крупнообъемных интегральных проб через масштаб литологических разностей до уровня минерального индивида.

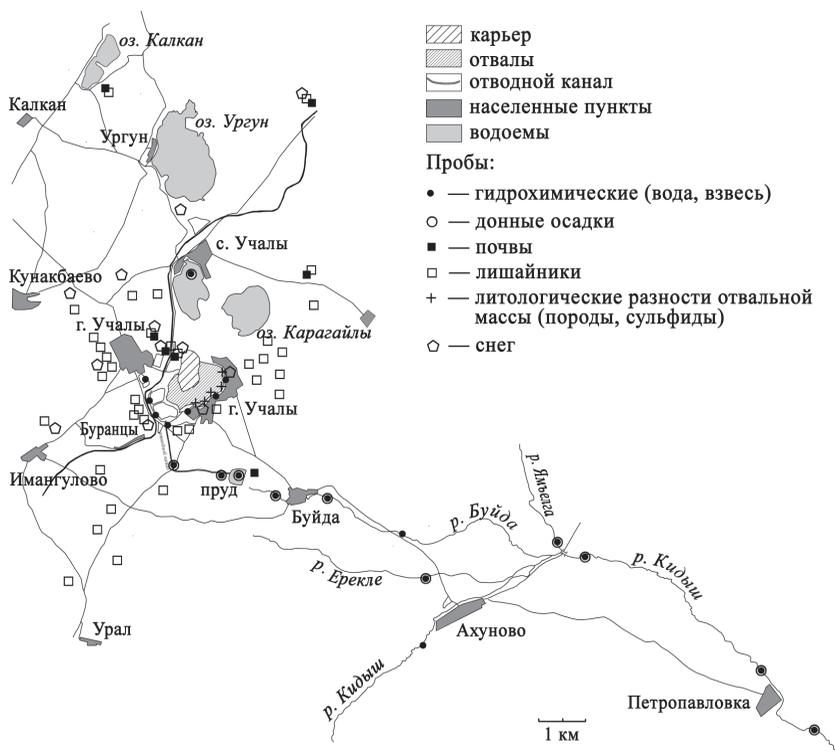


Рис. 2. Общая схема отбора проб

Для транзитных и транзитно-аккумулятивных участков поверхностных водотоков в условиях техногенеза установлены потенциальные формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях и выполнена оценка соответствия форм фиксации элементов с минеральным составом матрицы (2-е и 3-е защищаемые положения).

При исследовании процессов геохимической трансформации почв выявлен тип механизма ацидификации гумусово-аккумулятивного и верхней части иллювиального горизонтов, выраженный в последовательных этапах растворения накопленных сульфидов, формировании слабокислых почвенных растворов, увеличении доли  $H^+$  и  $Al^{3+}$  в составе обменных катионов и повышении миграционной способности халькофильных элементов в аэральном загрязненных почвах (4-е защищаемое положение).

**Практическая значимость работы** определяется использованным при исследованиях комплексом методических приемов, которые можно рекомендовать при выполнении мониторинга геотехнических систем. Это относится к аналитическим работам по оценке отвалной массы, определению форм нахождения потенциальных токсикантов по результатам селективных химических экстракций, использованию природных биопланшетов для оценки масштабов и уровней аэрального загрязнения.

**Апробация полученных результатов.** Результаты исследований по теме диссертации докладывались на заседаниях VIII международной научной студенческой конференции «Металлогения древних и современных океанов—2002» (Миасс, 2002), XIII молодежной конференции, посвященной памяти К.О. Кратца «Геология и геоэкология: исследования молодых» (Апатиты, 2002, 2005), Международной молодежной конференции «Экология 2003» (Архангельск, 2003), V Республиканской геологической конференции «Геология, полезные ископаемые и проблемы экологии Республики Башкортостан» (Уфа, 2003, 2006), II конкурсе научных работ молодых ученых и аспирантов УНЦ РАН и АН РБ (Уфа, 2004—2005), «Геоэкология горных геосистем» (Алматы, 2005).

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 254 страницах, содержит 27 таблиц, 67 иллюстраций и список использованной литературы из 154 наименований.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность научным руководителям д-ру г.-м.н. Игорю Борисовичу Серавкину и канд. г.-м.н. Валерии Николаевичу Удачину за поддержку и помощь в выполнении данных исследований, за ценные советы и обсуждения. Автор выражает искреннюю благодарность коллективу лаборатории минералогии техногенеза и геоэкологии Института минералогии УрО РАН за помощь в выполнении аналитических работ. Сотрудники этой лаборатории Г.Ф. Лоншакова, Л.Г. Удачина, К.А. Филиппова, Н.И. Вализер принимали также активное участие в полевых и лабораторных работах, автор благодарит каждого из них. Особую благодарность автор выражает дирекции Института геологии УфНЦ РАН и лично директору, чл.-корр. РАН, д-ру г.-м.н. В.Н. Пучкову за постоянную поддержку и помощь в проведении работ по данной тематике. Автор благодарит сотрудников Института минералогии УрО РАН П.В. Хворова, В.А. Котлярова за помощь в выполнении аналитических работ.

## **Содержание работы и защищаемые положения**

**В первой главе** кратко излагаются основные направления в исследовании геотехнических систем горнорудного профиля. **Во второй главе** дается характеристика объекта исследований — Учалинской ГТС. Она содержит общие сведения и данные о геологическом строении Учалинского рудного поля. Рассматривается история

формирования Учалинской ГТС, с выделением и характеристикой этапов ее развития. **В третьей главе** приводится описание методики полевых работ, методов аналитических исследований, их аппаратное обеспечение и метрологические характеристики. **В четвертой главе** содержится характеристика внешних отвалов Учалинского Cu–Zn-колчеданного месторождения, являющихся одним из источников эмиссии. Охарактеризованы минеральный и микроэлементный состав сульфидов и пород отвальной массы. **В пятой главе** дана гидрохимическая характеристика поверхностных техногенных и фоновых водотоков, геохимическая характеристика донных отложений, рассмотрены формы миграции тяжелых металлов в техногенных водотоках, изменение химического состава вод в зависимости от сезонных колебаний, влияние техногенных вод на природные речные системы, формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях. **В шестой главе** приводится геохимическая характеристика почвенного покрова и содержатся сведения об уровне загрязнения почв по генетическим горизонтам, формам нахождения тяжелых металлов и связи аномальных концентраций с основными физико-химическими параметрами почв. **Седьмая глава** посвящена лихеноидикации в оценке загрязнения территории при горнопромышленном техногенезе (на примере Учалинской ГТС).

К защите выдвинуты четыре положения, формулировка и обоснование которых приводятся ниже.

#### **Основные защищаемые положения.**

**1. Основным кислотопродуцирующим агентом в отвальной массе Учалинской ГТС, провоцирующим миграцию потенциально токсичных элементов, являются тонкодисперсные агрегаты сульфидов брекчиевидных метасоматитов лежащего бока Учалинского месторождения. Максимальным потенциалом нейтрализации характеризуются буферные метасоматиты с хлорит- и карбонатсодержащими минеральными ассоциациями.**

В пределах Учалинской ГТС основная часть отходов добычи руд представлена вмещающими породами алюмосиликатного состава, метасоматитами кварц-серицит-хлоритового состава с вкрапленностью сульфидов, сульфидными забалансовыми рудами. Для оценки поведения элементов в рудах и вмещающих породах в отвалах Учалинского месторождения была выполнена серия экспериментов, моделирующих поведение субстратов при кислотном воздействии. Первый тест — токсичности отвалов — моделирует оценку концентраций потенциально токсичных элементов при воздействии на анализируемый субстрат ацетатного буфера. Эта процедура известна как оценка содержаний «подвижных форм элементов». Второй — обобщенный тест выщелачивания — моделирует оценку концентраций потенциально токсичных элементов при воздействии «кислотных дождей». Количественным критерием оценки потенциальной токсичности руд и вмещающих пород в этих тестах является сравнительная характеристика значений, полученных при измерении концентраций элементов в экстрактах в сравнении со 100-кратно увеличенными нормами для питьевой воды.

Вмещающие породы алюмосиликатного состава демонстрируют инертность, что хорошо видно по скачкообразному повышению pH исходного раствора через час после начала контакта раствора с веществом отхода (табл. 1). Для измененного базальта (UC151/1) с миндалинами кальцита значение водородного показателя увеличилось почти в 2 раза, что связано с подщелачивающим эффектом CaCO<sub>3</sub>. Значения pH для основных пород (диабазов) UC151/4 и UC151/5 увеличиваются в 1.5 раза.

Таблица 1

Концентрации рассеянных элементов в литологических разностях отвальной массы и результаты тестов по экстракции

Элементы	ККТ (мг/л)	UC151/1 (ws)		UC151/3 (ws)		UC151/4 (ws)		UC151/5 (ws)					
		БК	Тест I	Тест II	БК	Тест I	Тест II	БК	Тест I	Тест II			
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fe	30	80298	0.20	<0.08	327292.5	<b>405</b>	<b>367</b>	79021	<0.08	<0.08	76560	0.07	<0.08
Mn	10	1037	<0.01	<0.01	35	1.07	0.96	865	0.67	0.57	970	0.05	0.18
Cu	100	66.5	<0.01	<0.01	290	0.25	0.07	180	<0.01	<0.01	123	<0.01	<0.01
Zn	100	118	<0.01	<0.01	44	0.45	0.36	86	<0.01	<0.01	86	<0.01	<0.01
Ni	10	48	<0.10	<0.10	31	<0.10	<0.10	29	<0.10	<0.10	31.5	<0.10	<0.10
Pb	3		0.08	0.96	19	0.65	0.5	6	0.3	0.31	8	0.3	-
Cd	1	1.09	0.0006	0.0006	0.97	0.005	0.004	1.0	0.0004	0.0002	0.85	0.002	-
Co	10	-	0.04	<0.12	-	0.12	0.18	-	0.02	0.01	-	0.17	0.03
pH исходного раствора			4.9	5.0		4.9	5.0		4.9	5.0		4.9	5.0
pH начальный			8.30	8.76		3.80	3.87		6.07	6.15		7.10	6.85
pH финальный			8.84	8.50		4.25	4.35		6.70	6.84		7.48	7.14

Продолжение таблицы 1

Элементы	ККТ (мг/л)	UC154/1 (ws)		UC156 (ws)		UC156/1 (ws)				
		БК	Тест I	Тест II	БК	Тест I	Тест II	БК	Тест I	Тест II
I	2	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Fe	30	13023	3.14	2.77	331530	<b>952</b>	<b>887</b>	415915	<b>34.48</b>	<b>34.47</b>
Mn	10	98	0.24	0.26	26	1.18	1.06	86	0.45	0.42
Cu	100	6.5	0.06	0.03	741	7.30	6.76	1812	20.62	18.25
Zn	100	97	0.14	0.15	175	<b>154</b>	<b>32</b>	1423	19	37
Ni	10	15.5	<0.10	<0.10	27	<0.10	<0.10	24.5	<0.10	<0.10
Pb	3	8	0.63	0.32		0.65	0.37	2.19	0.9	1.5
Cd	1	0.83	0.003	0.002	0.89	0.015	0.007	4.21	0.031	0.044
Co	10	-	0.03	<0.12	-	0.77	0.78	-	0.10	0.11
pH исходного раствора			4.9	5.0		4.9	5.0		4.9	5.0
pH начальный			4.10	4.11		2.75	2.80		3.66	3.80
pH финальный			4.25	4.23		2.85	2.80		3.70	3.73

Для них наиболее важную роль в нейтрализации играет хлорит в связи с буферирующим воздействием магния. Содержания всех восьми проанализированных элементов в экстрактах алюмосиликатных пород в несколько раз меньше значений количественного критерия токсичности (ККТ). Это позволяет оценить вмещающие породы с буферирующими минералами как относительно инертную среду в плане потенциального воздействия на водные объекты.

Применительно к забалансовым рудам, породам с вкрапленностью сульфидов и к самим сульфидам (в основном пирит) наблюдается иная картина. Абсолютные содержания элементов в экстрактах во много раз превышают значения ККТ и их содержания в тестах 1 и 2 для вмещающих пород основного состава. Наибольшей подвижностью характеризуются железо и цинк. Железо оказалось единственным элементом, для которого наблюдается значительное превышение значения ККТ в сульфидах и сульфидосодержащих породах. Для цинка в сульфидно-силикатной брекчии отмечается превышение ККТ в 1.5 раза.

Значительно большая активность Fe при выщелачивании отмечается в сульфидно-силикатной брекчии и сульфидах. В сульфидах из сульфидно-силикатной брекчии (UC151/3) происходит превышение содержания Fe в 12–14 раз, в целом в сульфидно-силикатной брекчии (UC156) — в 30–32 раза. Содержание Zn (тест 1) в брекчии в 1.5 раза больше количественного ККТ и в 8 раз выше, чем в рудах. Повышенное содержание цинка в этой пробе свидетельствует о срастании пирита со сфалеритом (установлено при минераграфических исследованиях), а высокая скорость окисления и высокие абсолютные концентрации Zn в растворе свидетельствуют о реализации механизма электрохимического взаимодействия 2-х сульфидных фаз. Сульфидно-силикатная брекчия характеризуется наиболее кислой реакцией среды в экстрактах (рН 2.80–2.85), более кислой, чем руды и пирит. В рудах и сульфидах значение рН на 0.8 единиц и в 1.5 раза больше, соответственно.

Исходным субстратом в процессе ацидификации являются сульфиды в условиях безбуферных ассоциаций (кварц, серицит), что хорошо видно из графика зависимости: сульфидная сера — рН (рис. 3а). И, напротив, главными буферирующими агентами при сернокислотном техногенезе являются Са и Mg в составе кальцита, хлорита и эпидота (рис. 3б), смещающие рН экспериментальных растворов в область значений выше 7.

## **2. В Учалинской ГТС выделены следующие «генетические» типы техногенных вод:**

**а) кислые подотвальные воды с рН 2.8–4.5 и высокой тяжелометалльной нагрузкой, б) щелочные воды с высоким рН, низким Eh и низкой тяжелометалльной нагрузкой, представленные сипингом из под дамбы хвостохранилища, в) околонеутральные воды технологического водоёма аккумулятивного типа с интегральной характеристикой вод первых двух типов.**

Опробование природных и техногенных вод выполнено на значительной территории, позволяющей оценить пространственную изменчивость концентраций тяжелых

---

**Примечание к таблице 1:** Основные литологические разности пород, слагающих отвал: 151/1 — базальт измененный афировый с редкими миндалинами кальцита; 151/3 — сульфиды из сульфидно-силикатной брекчии; 151/4 — диабаз измененный миндалекаменный; 151/5 — диабаз измененный с прожилком кварца, хлорита и эпидота; 154/1 — рассланцованные кварц-серицитовые метасоматиты; 156 — сульфидно-силикатная брекчия; 156/1 — забалансовые массивные сульфидные руды; ККТ — количественный критерий токсичности; ВК — валовые концентрации (ppm)

металлов (см. рис. 2). В качестве фоновых водотоков приняты малые реки Ерекле, Ямьелга и Кидыш, не подверженные техногенному воздействию. Анионно-катионный состав фоновых водотоков выглядит следующим образом (формулы Курлова):

— речные воды (р. Ерекле, 1999 г., 2002 г.)

$$M_{195} \frac{\text{HCO}_3^- 83 \text{ SO}_4^{2-} 14 \text{ Cl}^- 3}{\text{Ca} 52 \text{ Mg} 30 (\text{Na} + \text{K}) 18} \text{pH } 7.43;$$

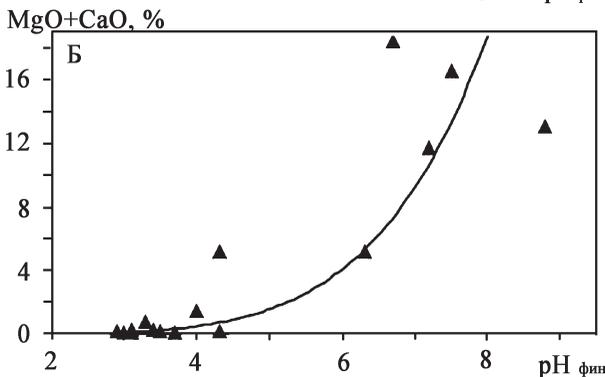
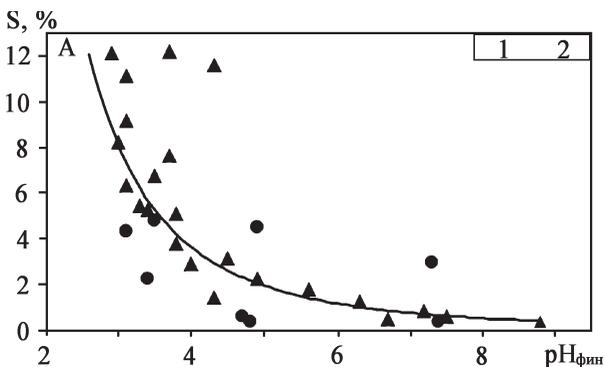
$$M_{167} \frac{\text{HCO}_3^- 63 \text{ SO}_4^{2-} 34 \text{ Cl}^- 4.25}{\text{Mg} 53 \text{ Ca} 39 (\text{Na} + \text{K}) 8} \text{pH } 7.00;$$

— речные воды (р. Ямьелга, 1999 г.)

$$M_{132} \frac{\text{HCO}_3^- 76 \text{ SO}_4^{2-} 19 \text{ Cl}^- 5}{\text{Ca} 40 (\text{Na} + \text{K}) 32 \text{ Mg} 28} \text{pH } 7.46.$$

Из приведенных данных следует, что речные природные воды относятся к гидрокарбонатно-кальциевому и гидрокарбонатно-магниевому типам, отличаясь в разных реках по катионному составу и минерализации.

Исследование индивидуальных фаз из донных осадков рек (шлиховой анализ), выполненное с использованием сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом, свидетельствуют о наличии исключительно «фоновых»



минералов-концентраторов микроэлементов. Каких-либо «аномальных» фаз, содержащих потенциально опасные для окружающей среды микроэлементы, не диагностировано.

Принципиально важным в характеристике миграционных циклов элементов является раздельное определение рас-

Рис. 3. Линии трендов зависимости содержаний сульфидной серы в отвалах (А) и суммы буферирующих петрогенных оксидов (Б) от рН экспериментальных растворов  
1 — пробы литологических разностей; 2 — пунктирно-бороздовые пробы отвальной массы

творенных и взвешенных форм. Микроэлементный состав взвеси природных водотоков рек Кидыш и Ерекле приведен в таблице 2. Анализ полученных данных показывает, что преобладающей формой миграции для Fe (66–94%) является взвешенная, для Cu (84–92%), Ni (58–84%) и Co (82–87%) — растворенная. Для Mn в р. Ерекле — взвешенная (84%), в р. Кидыш — растворенная (89%).

С целью изучения современного состояния поверхностных вод опробованы техногенные и природно-техногенные водотоки. Из техногенных водотоков опробованы: подотвальные воды, дренажные технологические воды из-под дамбы хвостохранилища, из пруда-отстойника Буйда, а также загрязненные воды на удалении 3–6 км от источников эмиссии. Для классификации вод использована диаграмма [Ficklin et al., 1992] (рис. 4), согласно которой воды Учалинской ГТС могут быть подразделены на **5 групп** (по степени уменьшения кислотности): **I** — сильнокислые воды (pH < 3.0)

Таблица 2

Процентное соотношение металлов, мигрирующих во взвешенной (II) и растворенной (I) формах в поверхностных водотоках Учалинской ГТС (%)

№ п/п	№ пробы*	pH	Eh, mV	Fe		Mn		Cu	
				I	II	I	II	I	II
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	UC42	7.65	170	0.07	99.93	65.0	35.0	22.0	78.0
2	UC43	4.65	290	29.0	71.0	98.73	1.27	90.4	9.6
3	UC44	7.30	152	1.73	98.27	99.17	0.83	70.51	29.49
4	UC45	6.89	163	10.42	89.58	99.44	0.56	93.15	6.85
5	<b>UC46</b>	7.94	174	6.15	93.85	16.24	83.76	84.0	16.0
6	<b>UC47</b>	7.55	209	34.0	66.0	88.5	11.5	92.4	7.6
7	UC48	6.91	165	63.0	37.0	99.87	0.13	94.82	5.18

Продолжение таблицы 2

№ п/п	№ пробы*	Ni		Co		pH начала выпадения гидроксидов металлов**
		I	II	I	II	
1	2	11	12	13	14	15
1	UC42	4.17	95.83	2.7	97.3	2.48–4.5 — Fe(OH) <sub>3</sub>
2	UC43	74.63	25.37	93.3	6.7	
3	UC44	43.48	56.52	24.39	75.61	
4	UC45	98.52	1.48	57.14	42.86	5.4 — Cu(OH) <sub>2</sub> ; 5.5 — Fe(OH) <sub>2</sub>
5	<b>UC46</b>	57.77	42.23	87.08	12.92	
6	<b>UC47</b>	84.38	15.62	82.0	18.0	6.7 — Ni(OH) <sub>2</sub>
7	UC48	93.77	6.23	99.62	0.38	8.5–8.8 — Mn(OH) <sub>2</sub>

**Примечание:** Формы металлов: I — растворенная; II — взвешенная. \* — расшифровка проб на рис. 6; \*\* — по [Перельман, 1975]

с высоким содержанием металлов; **II** — слабокислые воды (pH от 3.2 до 5.1) с повышенным содержанием металлов; **III** — субнейтральные и слабощелочные воды (pH от 5.8 до 8.0) с повышенным содержанием металлов; **IV** — нейтральные воды (pH от 6.6 до 7.4) с низким содержанием металлов, характеризующие фоновые водотоки; **V** — сильнощелочные воды (pH > 10.0) с повышенным содержанием металлов.

При этом воды первой и второй групп по пространственному положению являются собственно подотвальными; воды третьей группы объединяют часть подотвальных вод, часть вод технологического пруда-отстойника и часть смешанных вод дренажа от хвостохранилища; воды пятой группы являются исключительно результатом дренажа из-под дамбы хвостохранилища.

По условиям образования можно выделить три контрастных «генетических» типа техногенных вод, возникновение которых обусловлено спецификой технологических процессов при отработке Учалинского месторождения и обогащении руд.

*Первый тип* вод, соответствующий I группе, представлен подотвальными водами северо-восточных и восточных отвалов с низкими значениями pH от 2.5 до 3.0, высоким Eh от 490 до 635 mV. Зарегистрированы очень высокие содержания сульфат-иона (3864–25970 мг/л), суммы металлов, в частности Cu, Fe, Mn, Pb и Zn (350–486 мг/л). Соотношение анионов и катионов в этих водах выглядит следующим образом:

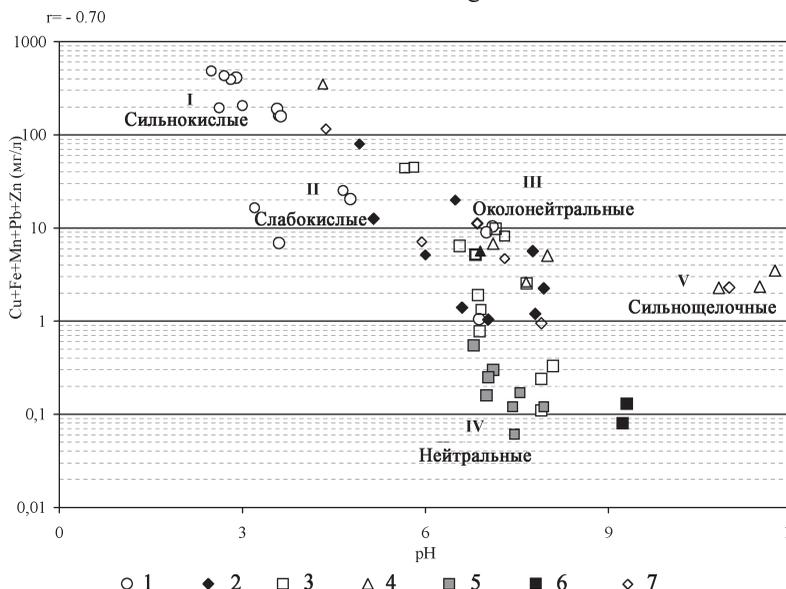
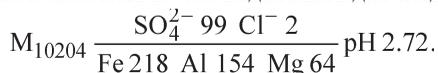


Рис. 4. Классификационная диаграмма химического состава поверхностных вод в зоне деятельности УГОКа. Использована основа из [Ficklin et al., 1992]

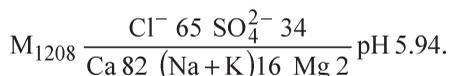
1 — подотвальные воды; 2 — технологический водоем-отстойник; 3 — загрязненные воды на удалении более 6 км; 4 — дренажные воды (из-под водохранилища; 5 — незагрязненные (природные фоновые) воды; 6 — оз. Бол. Учалы; 7 — транзитивно-аккумулятивная система — водоотводной канал

В сравнении с природными водами, в кислых подотвальных водах происходит глубокая трансформация состава. Такие воды являются сульфатными железо-алюминиево-магниевыми. Появление сульфат-иона в анионной части и железа и алюминия в катионной в качестве доминирующих свидетельствует о типичном сернокислотном техногенезе. Вовлечение в миграционные циклы типичного литофильного элемента — алюминия (до 320 мг/л), свидетельствует о глубокой трансформации геотехнической системы [Емлин, 1994]. Силикатные породы, прежде всего хлоритсодержащие, представляют собой часть кислотно-щелочного барьера, и на этом барьере реализуется при гидролизе часть современного минералообразования. Рентгенофазовым анализом установлено, что в составе взвеси вод первого типа, наряду с терригенными фазами (кварц, хлорит, пирит), появляются типичные аутигенные минералы (ярозит, гидрогематит). Гидрогематит, благодаря малому размеру индивидов (0.2–1 мкм), обладает высокой удельной поверхностью и сорбирует преимущественно халькофильные элементы, частично выводя их из миграционных циклов.

*Второй тип* вод, отвечающий III и V группам по диаграмме (см. рис. 4), представлен дренажными водами обводного канала хвостохранилища. Они формируются за счет оборотной воды обогатительной фабрики. При флотации руд пульпа поступает на хвостохранилище с двумя отсеками и, при отсутствии хорошо отлаженной системы дренажа, в виде жидкой фазы, в стоки. Воды западной части обводного канала сильно различаются по щелочности (pH от 7 до 12) и имеют повышенные содержания  $\text{SO}_4^{2-}$  (от 600 до 5000 мг/л) и металлов, количество которых варьируют в них от 2.3 до 5.1 мг/л. Нейтральные и слабощелочные воды (по диаграмме относятся к III группе) образуются при смешении щелочной оборотной воды с сульфидной пульпой хвостохранилища (1 отсек) с pH 5.99. Сильнощелочные воды, присутствующие в обводном канале хвостохранилища второго отсека с pH 11.3 не подвергались смешению с сульфидной пульпой.

Из анализа дифрактограмм проб взвеси вод этой группы установлено, что основная аутигенная фаза принадлежит гипсу. Формирование гипса в техногенных условиях [Бортникова, 2001] происходит на испарительном и сорбционном барьерах в условиях кислой среды и высокого содержания сульфат-иона. В данном случае образование гипса в обводном канале хвостохранилища происходит в слабо щелочной среде (pH 7.65, Eh 170 mV) сульфатного состава ( $\text{SO}_4^{2-}$  — 1815 мг/л) в присутствии кальция (730 мг/л).

*Третий тип* вод, соответствующий II и отчасти III группам, формируется в технологическом пруде-отстойнике Буйда, имеющим максимальную глубину 27 м. Воды характеризуются слабокислой и субнейтральной средой (pH 4.92–7.03), повышенным содержанием сульфат-иона (2062 мг/л). Поверхностная вода прудонакопителя в 2004 г. характеризовалась слабокислой реакцией среды (pH 5.94). В придонной воде происходит увеличение значения pH на 1 единицу. Соотношение анионов и катионов в этих водах выглядит следующим образом:



Из приведенных данных следует, что воды пруда являются хлоридно-сульфатными кальциевыми.

В подотвальных водах с рН 4.65 71% железо находится во взвешенной форме, в новообразованных фазах — ярозите и гидрогематите (рис. 5). При повышении уровня водородного показателя увеличивается доля взвешенной формы Fe (рис. 6). В пробах загрязненных с рН 6.89–7.30 доля взвешенной формы для Fe составила 90–98%.

Основными формами переноса металлов в составе техногенных вод для Fe является взвешенная, для Mn, Co, Ni и Cu — растворенная, составляющие 65–90% от общего объема миграционных форм.

**3. Донные отложения поверхностных водотоков и технологического пруда-накопителя являются основными аккумулялирующими объектами для тяжелых металлов. Максимумы валовых концентраций халькофильных элементов приурочены к тонкодисперсным фракциям (< 0.063 мм) донных отложений. Селективным фазовым анализом установлено, что в донных отложениях в обменной фракции сосредоточено 9% Cu и 18% Zn, являющихся потенциальным источником вторичного загрязнения водной среды.**

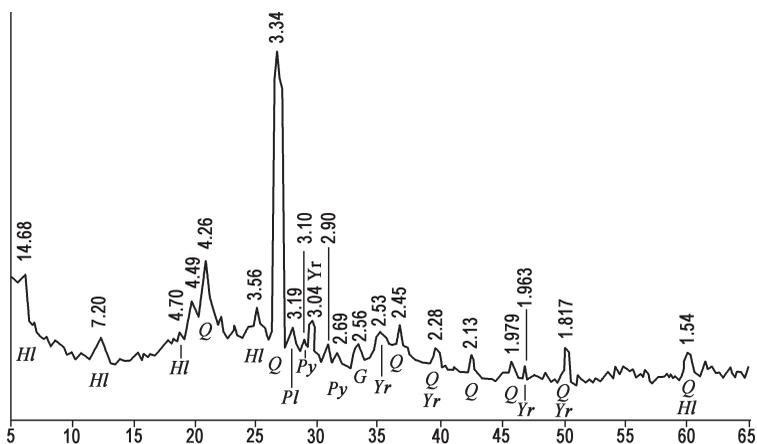


Рис. 5. Дифрактограмма взвеси подотвальных вод

Примечание: *HI* — хлорит, *Q* — кварц, *PI* — плагиоклаз, *Py* — пирит, *Yr* — ярозит, *G* — гидрогематит

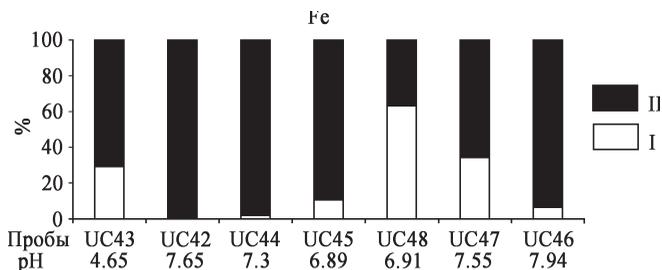


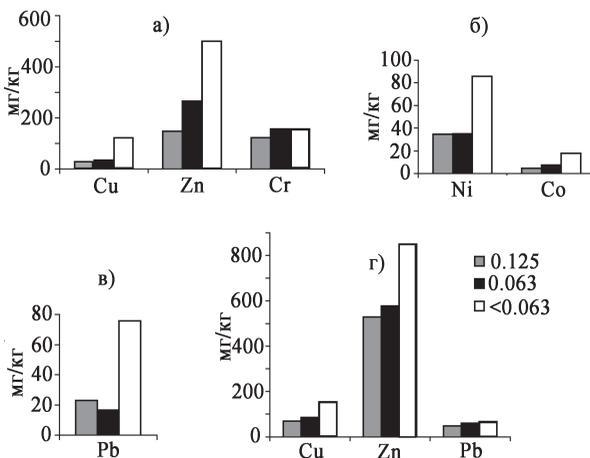
Рис. 6. Процентное соотношение Fe, мигрирующего во взвешенной и растворенной формах

Формы: I — растворенная, II — взвешенная. UC42 — обводной канал хвостохранилища; UC43 — подотвальная вода; UC44 — водоотводной канал в пруд; UC45, UC48 — загрязненные воды; UC46, UC47 — фоновые воды

Один из наиболее важных параметров, влияющих на адсорбционную способность тяжелых металлов — размеры частиц донных осадков. Для определения микроэлементного состава донных осадков транзитных аквальных систем во фракциях 0.125, 0.063 и < 0.063 мм были отобраны пробы из техногенных водотоков: в 600 м выше по течению от пруда-накопителя Буйда, из загрязненных рек Буйда (3 пробы) и Кидыш (3 пробы); из фонового водотока — р. Ерекле.

Для фракции < 0.063 мм более отчетливо, чем для двух других фракций, фиксируется типоморфный комплекс элементов колчеданных руд: Cu, Zn и Pb, а также Ni (рис. 7). Тонкодисперсная фракция техногенных осадков по сравнению с фоном характеризуется высокими содержаниями металлов, в частности, Pb, Cu и Zn. Наблюдается увеличение в 2, 4 и 7 раз, соответственно.

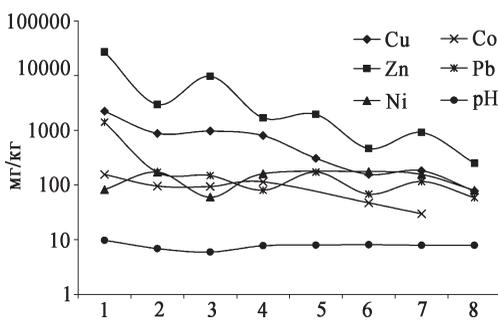
Рис. 7. Состав донных осадков р. Буйда во фракциях 0.125 мм, 0.063 мм и менее 0.063 мм выше (а–в — проба UC(sd)33) и ниже (г — UC(sd)34) по течению от поселка Буйда



Анализ распределения металлов в донных осадках показал, что максимальные значения концентраций Zn, Cu, Pb и Co приурочены к участкам техногенных гидроксидножелезистых илов в отводном канале выше по течению от пруда-отстойника (рис. 8), образование которых происходило десятилетиями за счет смешения кислых подотвальных вод со щелочными водами хвостохранилища в пределах всего обводного канала. Сугубо восстановительная обстановка с высоким pH (9.70) и низким окислительно-восстановительным потенциалом (–22 mV) в верхних частях разреза сменяется на близонейтральную в нижней части разреза (pH 7.81).

Основные аутигенные фазы в илах представлены ассоциацией кальцит – гипс – ферригидрит.

Рис. 8. График изменения содержания металлов в донных осадках и значения pH вод в зависимости от удаления от источника загрязнения 1, 2 — отводной канал в пруд; 3 — пруд; 4, 5 — р. Буйда; 6, 7, 8 — р. Кидыш



*Минеральный состав донных осадков.* Основными минералами до пруда Буйда являются: хромит, рутил, циркон, тремолит, марганцовистый титаномагнетит, серпентин, силлиманит. Из новообразованной фазы определен гипс. Минеральный состав осадка р. Буйда: кварц, плагиоклаз, турмалин, сфен, глауконит, эпидот, магнетит, хромит, барит, ильменит, рутил. По энергодисперсионным спектрам в 0.5 км ниже от технологического пруда фиксируются частички сульфидов железа размером 5–6 микрон, что позволяет считать (с учетом только параметров размерности) такие частички потенциально опасными. Кроме описанных выше минералов, в пробах диагностирован гипс, который является наряду с сульфидом железа, отражением техногенного привноса. По энергодисперсионным спектрам шлиховых проб донных осадков р. Ерекле определены следующие породообразующие минералы — роговая обманка, пироксен, слюды, эпидот и глауконит.

*Формы нахождения металлов в транзитных водотоках.* Были исследованы донные осадки отводного канала в пруд, р. Буйда и р. Кидыш. Определялись 5 форм нахождения Cu и Zn по методике селективных экстракций, широко применяющейся в практике геохимических работ [Tessier, 1979]. По формам нахождения металлов в донных осадках можно судить о возможности перевода этих металлов в водную среду. В связи с этим были исследованы 5 форм нахождения Cu и Zn. Из них определены четыре подвижные формы — легкообменная поверхностно-сорбированная (I); легкорастворимые карбонаты (II); металлы, находящиеся в ассоциации с аморфными гидроксидами Fe и Mn (III); органическая (IV). Именно эти 4 формы, при определенных условиях, могут переходить в раствор и являются доступными для гидробионтов. Остаточная (V) форма — силикатная, включающая металлы, входящие в кристаллическую силикатную решетку, не переходит в раствор. В гидроксидно-железистых илах отводного канала 62% Cu и 86% Zn связано с фракцией гидроксидов Fe и Mn, обладающих высокими сорбционными свойствами. Остальная часть Cu (11%) и Zn (13%) связана с карбонатами, присутствующими в этих илах. С органической матрицей связано 26% Cu.

В 600 м вверх по течению от пруда Буйда для Cu (41%) преобладающей формой нахождения является силикатная, для Zn — гидроксидная. Концентрация Cu, связанная с силикатной матрицей, объясняется преобладанием в донных осадках алюмосиликатов и кремнезема, диагностированных рентгенофазовым анализом и по энергодисперсионным спектрам при электронномикроскопических исследованиях.

В р. Буйда основная часть Cu связана с фракцией гидроксидов Fe и Mn (45%) и силикатной матрицей (44%); Zn — с гидроксидами Fe и Mn (58%). Обменные формы Zn составляет 6%, но при высоких валовых концентрациях Zn такая доля обменных форм, являющихся легкоподвижными и биологически доступными, представляет потенциальную опасность вторичного загрязнения водных систем при минимальном изменении физико-химических параметров водотока.

В р. Кидыш, после впадения в нее загрязненных вод, для Cu преобладает форма, связанная с органической матрицей (55%), для Zn — с гидроксидами Fe и Mn (29%). С карбонатами связано 19% Cu и 23% Zn, обменные формы Cu и Zn составляют 9 и 18%, соответственно, что выделяет этот район реки в разряд самых потенциально опасных участков. При изменении физико-химических условий вод, таких как, понижение значения pH, процессы десорбции и ионного обмена, растворение карбонатов, разложение органических веществ и железомарганцевых оксидов,

происходит перевод Cu и Zn в водную среду и их вторичное вовлечение из осадков в гидрхимическую миграцию.

**4. Накопление техногенных Cu, Zn, Pb в гумусово-аккумулятивных горизонтах аэриально загрязненных почв отвечает коэффициентам концентрации 28, 33 и 5, соответственно. Закисление почв до pH 4.2–3.8, обусловленное появлением в почвенном поглощающем комплексе подвижных  $H^+$  и  $Al^{3+}$ , приводит к увеличению обменных форм тяжелых металлов с высокой миграционной способностью.**

Наибольшей распространенностью в районе Учалинской ГТС пользуются серые лесные почвы, преимущественно под березовыми лесами с хорошо развитым травяным покровом. Эти почвы часто близко подстилаются коренными породами, поэтому профиль в этих случаях неполноразвитый. В профиле почвы под лесом с травяным покровом выделяется маломощный горизонт лесной подстилки, за ним следует гумусово-аккумулятивный горизонт, переходящий, через иллювиальный горизонт, либо к материнской почвообразующей породе (суглинки) или, через элювий, к коренным породам. По механическому составу серые лесные почвы относятся к тяжелым суглинкам. Поглощительная способность их высокая. Реакция почв чаще всего субнейтральная, реже слабокислая.

Влияние загрязнения почв хорошо прослеживается на примере трех почвенных разрезов в районе обогатительной фабрики, перерабатывающей колчеданные руды. Почвы техногенных разрезов характеризуются кислой реакцией. Количественные параметры в распределении тяжелых металлов по вертикальному профилю почв иллюстрируются на рис. 9, где хорошо видно накопление поллютантов в гумусово-аккумулятивных горизонтах. Для Cu и Zn характерны широкие колебания по всему профилю от 39 до 1537 мг/кг для Cu и от 86 до 2455 мг/кг для Zn, при этом высокие содержания приурочены к верхним субгоризонтам лесной подстилки ( $A_{01}$  и  $A_{02}$ ), являющимся горизонтами-коллекторами пылевых аэрогенных выпадений. Содержания Cu, Zn и Ni вниз по профилю резко уменьшаются в 15 раз, но в средней части иллювиального горизонта их содержание незначительно увеличивается. Это связано с присутствием в этой части гор. В глинистых кутан (пленочных образований), являющихся главным депо сорбированных Cu, Zn и Ni.

Концентрации Cu и Zn в верхней части горизонта A в 1.5 раза выше по сравнению с нижней его частью. Такое увеличение содержания металлов связано с их выносом атмосферными и почвенными водами из горизонта A, нижний контакт которого изрезанный с языковатыми затеками гумуса, в нижележащий горизонт. Миграция Cu и Zn из верхних горизонтов почв обусловлена высокой подвижностью элементов в условиях кислой реакции среды почвенного профиля, высокой порозностью гумусово-аккумулятивного горизонта. Техногенные почвы имеют pH водный в горизонте лесной подстилки в диапазоне 3.2–4.8, в горизонта A 3.4–5.3, в горизонт B 3.4–5.5 при хорошо выраженном окислительном состоянии всех горизонтов с Eh 370–450 mV.

Фоновые почвы отличаются от техногенных наличием дернового горизонта  $A_d$  с хорошо развитой корневой системой и несколько повышенным содержанием элементов (Cu, Zn и Ni) в этом горизонте, превышающих ОДК в 1.5 раза. В данном случае мы имеем пример природного геохимического барьера с биогенным типом накопления основной части халькофилов в гумусово-аккумулятивном горизонте. Фоновые почвы имеют pH водный в горизонте подстилки 6.5–7.1, в горизонте A 6.5–7.4,

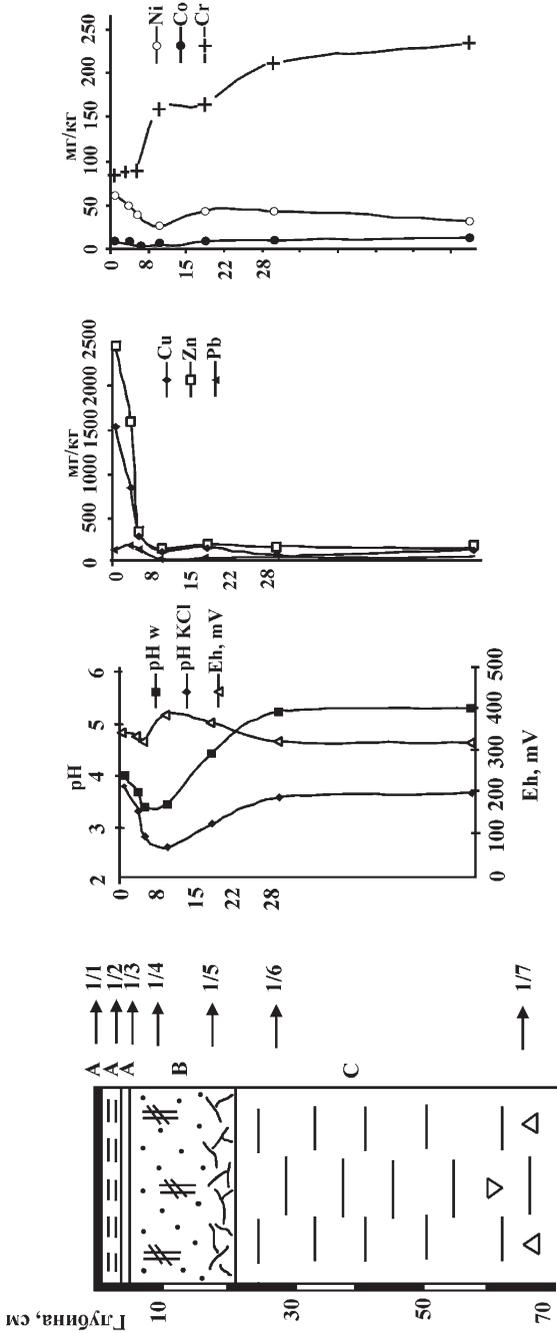


Рис. 9. Распределение Cu, Zn, Pb, Ni, Co и Cr по почвенному профилю разреза UC(s)1, заложеного в 500 м на СЗ от северной части карьера и в 800 м на СВ от ОФ комбината

в горизонте В 6.2–7.5 при Eh 170–190 мВ. Эти параметры характерны для режима функционирования серых лесных почв Южного Урала.

По данным селективного фазового химического анализа в техногенных почвах медь, в основном, связана с органическим веществом (42–43%), а остальная часть — с гидроксидами Fe и Mn (20–23%) и силикатной матрицей (20–24%). По сравнению с фоновыми почвами, где обменных форм меди не более 3%, в аэралью загрязненных почвах значительная часть меди (10–11%) находится в обменной форме. Большая часть цинка в фоновых почвах находится в силикатной форме (32–74%), в меньшей мере — в органической (8–31%) и связанной с гидроксидами Fe и Mn (11–34%). В техногенных почвах для цинка, в отличие от меди, характерно наличие очень большой доли обменных форм (до 25%). Четвертая часть валовых содержаний, приходящаяся для Zn на обменные формы, свидетельствует о максимальной степени эколого-токсикологической опасности этого элемента в техногенных почвах. Высокая степень мобильности Zn позволяет предположить его активную миграцию в составе растворов внутрипочвенного стока. Напротив, в фоновых почвах в обменной форме цинк практически не обнаружен. Таким образом, для Cu и Zn основным отличием происходящих процессов техногенного загрязнения является увеличение доли потенциально подвижных форм, «ответственных» за высокую степень эколого-токсикологической опасности. Весьма существенна и разница в коэффициентах мобильности меди для природных и техногенных почв, которая достигает 8 раз.

В техногенных почвах с кислой реакцией, наряду с типичными обменными катионами (кальций и магний), присутствуют обменный водород и обменный алюминий. Количество обменного  $Al^{3+}$  варьирует в пределах 0.045–0.86 мг-экв/100 г, с максимумом в верхах иллювиального горизонта при низких значениях солевого и водного рН (2.60–3.44). Количество обменного  $H^+$  достигает 49 мг-экв/100 г. Обменная кислотность является одним из видов потенциальной кислотности почв и наиболее вредной для растений формой почвенной кислотности [Мякина и др., 1979; Аринушкина, 1970]. Её обуславливает суммарное содержание обменных  $H^+$  и  $Al^{3+}$ , играющих важную роль в почвенном поглощающем комплексе. Обменные  $Al^{3+}$  и  $H^+$  прямо коррелируются с величиной рН водного и актуальной кислотности с коэффициентами 0.88 и 0.93, соответственно.

Математическая обработка результатов включала расчет суммарного показателя загрязнения и коэффициента концентрации. Сущность показателя Zc в том, что он служит для обобщенной оценки воздействия металлов-загрязнителей и характеризует степень химического загрязнения почв обследуемых территорий с выделением различных классов опасности.

Рассеивание твердой фазы пылевых выбросов в направлении господствующих ветров приводит к формированию аномальных (химически загрязненных) почв, основной ареал которых ориентирован в северном, СЗ и СВ направлении от комбината. Суммарный показатель загрязнения почв в зоне комбината находится в пределах от 30 до 65. Исключение составляет точка UC(sl)3, Zc которой 6. Причем вклад элементов в суммарное загрязнение примерно одинаков. Выделяется чуть более ярко выраженной техногенностью Zn с кк 4.1, Cu — 3, Pb — 2.

Максимальное значение Zc, равное 65, характерно для точки UC(sl)1. Наибольший вклад в суммарное загрязнение вносят два элемента — цинк и медь с коэффициентами концентрации 33 и 28, соответственно. Влияние техногенного фактора

фиксируется также по Pb, коэффициент концентрации которого составляет 5. По величине суммарного загрязнения почв ( $Z_c > 32$ ) зона ОФ по экологическому состоянию относится к 4 и 5 группам загрязненных почв.

В западном, восточном и ЮЗ направлении от источников загрязнения  $Z_c$  находится в пределах от 10 до 35. Из элементов наибольшие  $k_k$  характерны для Zn и Cu, наименьшие для Pb. Почвы западной части г. Учалы слабо и средне загрязнены ( $Z_c > 8$ ). К востоку от г. Учалы-2  $Z_c$  превышает 16, и почвы по загрязненности относятся к 3 группе. В почвах у отвалов загрязнение контролируется как природными, так и техногенными факторами. Почвы в ЮЗ направлении от хвостохранилища относятся к средне и сильно загрязненным почвам, и это согласуется с направлением ЮЗ ветров. В юго-восточной части хвостохранилища почвы, относящиеся к 2 и 3 группам загрязненных земель, содержат медь и цинк, в количествах, превышающих фоновые.

В северном направлении в 3–4 км от источника выбросов для двух ключевых точек *UC(sl)18* и *UC(sl)19*  $Z_c$  составляет 5 и 6, соответственно. Здесь, так же как и в предыдущих точках, наибольший вклад в загрязнение вносят Cu и Zn. Средний коэффициент концентрации по Zn 3.85, а по Cu 2.65. Почвы по категории загрязненности относятся к первой группе.

Следовательно, накопление Cu, Zn и Pb в гумусово-аккумулятивных горизонтах техногенных почв отвечает коэффициентам концентрации 28, 33 и 5, соответственно с  $Z_c$  почв  $> 64$  и относится к опасной пятой группе по степени загрязненности. В северном, северо-восточном и отчасти в западном направлении аномалии загрязнения фиксируются по «розе ветров» от ОФ комбината. В юго-западном направлении — от хвостохранилища.

Хорошим индикатором уровня загрязнения воздуха и почвенного покрова является содержание тяжелых металлов в снежном покрове и в лишайниках. Анализ содержаний тяжелых металлов в снеговом инфильтрате показывает, что для всех металлов их концентрации не превышают ПДК для питьевых вод. Снеговая взвесь состоит из двух различных по происхождению групп: 1) тонкодисперсных сульфидов, характерных для концентратов ОФ комбината; 2) вторичных фаз, состоящих из алюмосиликатного материала и кальцита. Присутствие кальцита в составе взвеси снеговой пыли связано с применением в технологической схеме флотации ОФ комбината реагента извести CaO (в пределах 500–600 г/м<sup>3</sup>). Алюмосиликатная фаза снеговой взвеси состоит не только из частиц, образующихся при эрозии почв, но и при выпадении техногенной пыли аэральными выбросами комбината.

Минеральный состав снеговой взвеси с большим количеством сульфидных фаз подтверждает аэральные выпадения сульфидной пыли из трубы ОФ комбината. Наибольшую опасность для окружающей среды представляют собой сульфидные фазы, которые, попадая в почву при снеготаянии, могут окисляться. Окисление ведёт к освобождению сульфатов, водорода и металлов, таких как Fe, Cu, Zn, Cd, Ni, Co и миграции их в почвенные растворы.

В качестве индикаторных видов мы выбрали лишайники, имеющие высокую степень встречаемости на данной территории: эпифитные — *Hypogymnia* и напочвенные — *Cladonia*. На территории г. Учалы и прилегающей территории выделена зона повышенной концентрации металлов в лишайниках. Максимальное загрязнение приурочено к промплощадке УГОК и распространяется от нее на СВ по направлению господствующих ветров.

## Заключение

В представленной работе на основании комплексных исследований природно-техногенных ландшафтов Учалинской ГТС выполнена оценка геоэкологических условий формирования техногенных аномалий в различных природных средах при освоении крупного месторождения.

Дана характеристика отвалов Учалинского месторождения как источника формирования гидрохимических аномалий. Формирование кислых вод происходит локально, на участках отвалов, где складировались породы с сульфидной минерализацией и не обладающие буферной способностью.

Экспериментальными работами обосновано, что исходным субстратом в процессах формирования кислых подотвальных вод являются сульфиды в условиях безбуферных ассоциаций (кварц, серицит). Главными буферирующими агентами при серноокислотном техногенезе являются Са и Mg в составе кальцита, хлорита и эпидота, смещающие рН экспериментальных растворов в область значений выше 7, и, в реальных условиях Учалинской ГТС, приводящие к формированию субнейтральных подотвальных вод.

Установлено, что формирующиеся в Учалинской ГТС гидрохимические ресурсы (подотвальные воды, сипинг из-под хвостохранилищ и воды технологического водоема) отличаются по химическому составу и значению водородного показателя. Максимальные коэффициенты концентрации микроэлементов были определены для кислых вод.

Установлено, что речные природные воды района относятся к гидрокарбонатно-кальциевому и гидрокарбонатно-магниевому типам, отличаясь по катионному составу и минерализации. Раздельное определение растворенных и взвешенных форм позволило определить, что преобладающей формой миграции для железа является взвешенная, для меди, никеля и кобальта — растворенная. В одной из фоновых рек для марганца установлена преобладающая форма миграции в составе взвеси, а в другой — в виде растворенных форм.

В результате типизации техногенных водотоков выделены три «генетических» типа вод. Первый тип (подотвальные) представлен ультракислыми сульфатными железо-алюминиево-магниевыми. Появление сульфат-иона в анионной части и железа и алюминия в катионной в качестве доминирующих свидетельствует о типичном серноокислотном техногенезе. Вовлечение в миграционные циклы типичного литофильного элемента — алюминия, свидетельствует о глубокой трансформации геотехнической системы. Второй тип представлен дренажными водами обводного канала хвостохранилища, которые формируются за счет оборотной воды обогатительной фабрики. Реакция вод этого типа ярко выраженная щелочная. Третий тип вод формируется в технологическом пруде-отстойнике Буйда, имеет слабо кислую реакцию и представлен хлоридно-сульфатными кальциевыми водами.

Выявлена приуроченность максимума концентраций тяжелых металлов к тонкодисперсной фракции донных отложений ( $< 0.063$  мм) и природных, и техногенных транзитных водотоков. Анализ распределения металлов в донных осадках показал, что максимальные значения концентраций Zn, Cu, Pb и Co приурочены к участкам техногенных гидроксидножелезистых илов в обводном канале выше по течению от пруда-отстойника, сформированных ассоциацией аутигенных фаз: кальцит — гипс — ферригидрит. Химико-аналитическими процедурами установлено, что основная

часть меди техногенных водотоков связана с фракцией гидроксидов железа и марганца и силикатной матрицей; цинка — с гидроксидами железа и марганца. Значительная доля обменных форм меди и цинка в составе донных отложений на участках, подверженных техногенезу, свидетельствует о потенциальной опасности вторичного загрязнения водных систем при минимальном изменении физико-химических параметров водотоков.

При изучении аэралью загрязненных почв установлено, что почвы техногенных разрезов характеризуются кислой реакцией почвенного профиля. Количественные параметры в распределении тяжелых металлов по вертикальному профилю почв свидетельствуют о накоплении аномальных концентраций Cu, Zn и Pb в гумусово-аккумулятивных горизонтах. Максимальной долей обменных форм характеризуется цинк. Высокая степень мобильности Zn позволяет предположить его активную миграцию в составе растворов внутрипочвенного стока.

В техногенных почвах с кислой реакцией, наряду с типичными обменными катионами (кальций и магний), присутствуют обменный водород и обменный алюминий, которые формируют высокую величину обменной и гидролитической кислотности и способствуют высокой мобильности халькофилов в условиях кислой среды.

Проведенные исследования демонстрируют назревшую необходимость выполнения первоочередных природоохранных мероприятий в Учалинской ГТС, связанных, на первом этапе, с организацией системы мониторинга, и, далее, с процессами реабилитации транзитных водотоков и почвенного покрова в зонах техногенного загрязнения.

### **Публикации автора по теме диссертации (девичья фамилия Шафигуллиной Г.Т — Джалалова Г.Т)**

**Джалалова Г.Т.** Сезонные колебания состава поверхностных вод в зоне деятельности Учалинского горно-обогатительного комбината (УГОКа) // Металлогения древних и современных океанов—2002. Формирование и освоение месторождений в офиолитовых зонах. Миасс: ИМин УрО РАН, 2002. С. 288—289.

**Джалалова Г.Т.** Сезонные вариации состава поверхностных и подотвальных вод в зоне деятельности Учалинского горно-обогатительного комбината (УГОКа) // Геология и геоэкология, исследование молодых, 2002: Матер. XIII молодежной конф., посвященной памяти К.О. Кратца. Т. 2. Апатиты, 2002. С. 143—146.

**Джалалова Г.Т.** Современное состояние поверхностных вод в зоне деятельности Учалинского горно-обогатительного комбината (УГОКа) // Экология 2003: Тез. междунар. конф. Архангельск, 2003. С. 18—20.

**Джалалова Г.Т.** Кислотно-основные свойства почв в районе деятельности Учалинского горно-обогатительного комбината (УГОКа) // Геология, полезные ископаемые и проблемы экологии Башкортостана. Т. 2. Уфа, 2003. С. 203—206.

Вильямсон Б., Удачин В.Н., Спиро Б., Дерягин В.В., **Джалалова Г.Т.** Процессы изменения состава поверхностных вод при техногенезе в Учалинском горнодобывающем районе // Геология, полезные ископаемые и проблемы экологии Башкортостана. Т. 2. Уфа, 2003. С. 187—194.

Удачин В.Н., Вильямсон Б.Д., Дерягин В.В., **Джалалова Г.Т.** Геотехнические системы Южноуральского субрегиона биосферы // Проблемы горных территорий. Алматы, 2005. С. 38—42.

**Джалалова Г.Т.** О кислотно-основных свойствах почв в зоне влияния комбината (Южный Урал) // Геология, геохронология и геоэкология: исследования молодых: Матер. XVI молодеж. конф., посвященной памяти чл.-корр. АН, проф. К.О. Кратца. Апатиты, 2005. С. 356–360.

**Джалалова Г.Т.** Распределение тяжелых металлов по профилю почв в зоне деятельности Учалинского ГОКа (Южный Урал) // Геология, геохронология и геоэкология: исследования молодых: Матер. XVI молодеж. конф., посвященной памяти чл.-корр. АН, проф. К.О. Кратца. Апатиты, 2005. С. 361–365.

**Джалалова Г.Т.** Экологическая обстановка г. Учалы по данным исследования почв // Материалы II конкурса научных работ молодых ученых и аспирантов УНЦ РАН и АН РБ. Уфа: Гилем, 2005. С. 60–62.

**Джалалова Г.Т.** Гидрохимический состав вод в зоне деятельности Учалинского горно-обогатительного комбината (УГОК) // Материалы II конкурса научных работ молодых ученых и аспирантов УНЦ РАН и АН РБ. Уфа: Гилем, 2005. С. 62–65.

**Джалалова Г.Т.** Формы нахождения тяжелых металлов в аэралью загрязненных почвах в районе Учалинского горно-обогатительного комбината (УГОК) // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана: Матер. межрег. конф. 27–30 марта 2006 г. Т. 2. Уфа, 2006. С. 190–192.

**Джалалова Г.Т.** Валовое содержание тяжелых металлов в почвах Учалинской геотехнической системы // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана: Матер. межрег. конф. 27–30 марта 2006 г. Т. 2. Уфа, 2006. С. 194–197.

**Шафигуллина Г.Т., Удачин В.Н.** О формах нахождения элементов в техногенных и фоновых почвах Учалинской геотехнической системы // Башкирский химический журнал. 2007. Т. 14, № 4. С. 70–75.

**Шафигуллина Г.Т., Серавкин И.Б., Удачин В.Н.** Геохимическая активность отвалной массы Учалинского месторождения // Разведка и охрана недр. 2008. № 2. С. 50–55.