

На правах рукописи



САРЫГ-ООЛ Багай-оол Юрьевич

Концентрирование и формы нахождения золота и сопутствующих элементов при взаимодействии сульфидсодержащих отходов обогащения с природным органическим веществом

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН).

Научный руководитель: **Лазарева Елена Владимировна**
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник Института
геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии
наук.

Официальные оппоненты: **Белогуб Елена Витальевна**
доктор геолого-минералогических наук, доцент,
главный научный сотрудник, заместитель
директора по научной работе Южно-Уральского
федерального научного центра минералогии и
геоэкологии Уральского отделения Российской
академии наук (г. Миасс).

Зверева Валентина Павловна
доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник лаборатории
геохимии гипергенных процессов
Дальневосточного геологического института
Дальневосточного отделения Российской
академии наук (г. Владивосток)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт геохимии им.
А. П. Виноградова Сибирского отделения
Российской академии наук (г. Иркутск).

Защита диссертации состоится 21 декабря 2023 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.050.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской Академии наук в большом конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3.
Факс: (383) 333-27-92, e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте:
<https://www.igm.nsc.ru/index.php/obrazov/dissovety/d-003-067-02/zashchity>

Автореферат разослан 17 ноября 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук

О. Л. Гаськова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Углеродсодержащие породы (черные сланцы, угли, торф) часто характеризуются высокими содержаниями U, Au, Ge, Ga, Sc, PЗЭ и других ценных элементов, достигающих в некоторых отложениях промышленных концентраций [Юдович, Кетрис, 1988, 2006; Арбузов и др., 2009; и т.д.]. Изучение взаимодействия в системе «минеральное и органическое вещество» в гипергенных условиях и выявление закономерностей накопления в последнем благородных металлов, редких и рассеянных элементов является обширной и актуальной областью исследований. Известно, что природное органическое вещество (ОВ) эффективно концентрирует микроэлементы (в том числе благородные металлы) [Юдович, Кетрис, 1994] и обладает способностью удерживать их в растворе, препятствуя сорбции элементов на минеральной составляющей отложений [Conroy et al., 2017; Otero-Fariña et al., 2017; Zheng et al., 2019; Glodowska et al., 2020], что заметно увеличивает их мобильность [Baker, 1978; Vlaspoulos et al., 1990; Wood, 1996]. Это приводит к формированию значительного количества подвижных форм элементов, в том числе благородных металлов [Reith et al., 2005; Reith and McPhail, 2007; Korshunova and Charykova, 2019]. Высокие содержания и формы нахождения мобильных форм благородных металлов являются аспектами системы, требующими детального изучения. Выявление закономерностей накопления элементов природным ОВ (торф, детрит, почва, биота) в современных условиях открывает возможности для реконструкций условий их концентрирования и выноса в процессах седиментогенеза и диагенеза углеродсодержащих отложений [Арбузов и др., 2004; Середин и др., 2007; Сорокин и др., 2009], что и определяет актуальность и практическую значимость подобных исследований.

Хорошим модельным объектом для исследования взаимодействия микроэлементов с ОВ являются природно-техногенные системы складированных сульфидсодержащих отходов обогащения – хвостохранилища, характеризующиеся высокой скоростью процессов и доступностью. Геохимические, минералогические, микробиологические аспекты трансформации вещества в хвостохранилищах рассмотрены в публикациях [Blowes et al., 1991; Shu et al., 2001; Лазарева, 2003; Бортникова и др., 2006; Lottermoser, 2010; Lindsay et al., 2015; Myagkaya et al., 2016a, 2016b; Rea et al., 2016; Reith et al., 2016, 2018; Dong et al., 2021 и др.]. Проведенные разными авторами исследования затрагивают преимущественно поведение макро- и потенциально токсичных элементов, а трансформация различных форм Au при взаимодействии отходов обогащения и техногенных растворов с природным ОВ исследована незначительно ввиду ряда аналитических сложностей при их определении и невысоких содержаний элемента.

Цель исследования

Установление закономерностей концентрирования и выявление форм нахождения Au и сопутствующих элементов, возникших в результате взаимодействия сульфидсодержащих отходов обогащения с природным

органическим веществом (торф, детрит) на материале Урского и Комсомольского хвостохранилищ.

Задачи:

1. Подбор и апробация методики ступенчатого выщелачивания для определения форм нахождения Au и сопутствующих элементов в образцах, содержащих сульфиды и органическое вещество, с применением веществ и смесей с известными формами нахождения элемента.

2. Выявление закономерностей концентрирования и форм нахождения Cu, Zn, As, Se, Sb, Pb органическим веществом при его взаимодействии с сульфидсодержащими отходами обогащения в зависимости от физико-химических параметров техногенных растворов.

3. Выявление закономерностей концентрирования и форм нахождения Au и Ag. Определение условий накопления и иммобилизации элементов в органическом веществе при экзогенном изменении отходов обогащения руд на основании данных нахождения и о закономерности распределения их форм.

Научная новизна

На основании литературных данных, с учетом специфики исследования, предложена модифицированная 7-ступенчатая методика выщелачивания для изучения форм нахождения Au и сопутствующих элементов в образцах природного и техногенного происхождения. Основная модификация – применение смеси 20% азотной кислоты и 20% перекиси водорода в качестве реагента для извлечения фракции, содержащей первичные сульфиды.

Впервые для Ново-Урского месторождения и Урского хвостохранилища охарактеризованы формы нахождения потенциально токсичных элементов (Cu, Zn, As, Se, Pb) и благородных металлов (Au и Ag) в первичных рудах и рудах зоны окисления, в отходах их обогащения, в обогащенном органическим веществом (торф, детрит) материале из потока рассеяния хвостохранилища. Для выяснения причин повышенной мобильности благородных металлов был изучен химический состав водных вытяжек из материала хвостохранилища.

Оценены содержания Au и Ag в отходах обогащения Комсомольского хвостохранилища, в подстилающем и новообразованном почвенных горизонтах, контактирующих с отходами. В материале Комсомольского хвостохранилища охарактеризованы формы нахождения потенциально токсичных элементов (Cu, Zn, As, Sb, Pb) и благородных металлов (Au и Ag) с применением методики ступенчатого выщелачивания. Для выяснения причин повышенной мобильности благородных металлов изучен химический состав поровых растворов из материала хвостохранилища.

Выявлены особенности распределения Au по фракциям 7-ступенчатой методики выщелачивания с помощью применения модельных веществ с известными формами нахождения элемента, приближенных по составу к природным образцам из ореола рассеяния Урского и Комсомольского хвостохранилищ.

Теоретическая и практическая значимость

Установленные закономерности концентрирования золота и сопутствующих элементов органическим веществом из раствора могут объяснить

процессы, приводящие к металлоносности углеродсодержащих горных пород: черные сланцы, угли и др., – а сама природно-техногенная система, сформированная на хвостохранилище, может рассматриваться как модель раннего накопления различных элементов в процессе накопления отложений.

С прикладной точки зрения закономерности концентрирования элементов органическим веществом и трансформация их форм нахождения при взаимодействии с отходами обогащения может стать отправной точкой для создания систем ремедиации и рекультивации хвостохранилищ, в которых органическое вещество предлагают использовать в качестве рекультивационного субстрата. В перспективе результаты исследований могут составить основу для создания технологий доизвлечения ценных компонентов из отходов обогащения.

Фактический материал, методология исследования и степень достоверности результатов

В основу работы положен материал, собранный автором и его коллегами в полевые сезоны 2014 и 2016 гг., а также экспериментальные и аналитические работы, проведенные в лаборатории геохимии благородных и редких элементов (№218) ИГМ СО РАН и в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. В основе разработанной методологии работы лежит комплексное минералого-геохимическое исследование фактического материала, отобранного в ходе экспедиционных работ. Диссертантом проведены экспериментальные работы (с применением модельных веществ и смесей), призванных помочь в интерпретации полученных данных.

Достоверность результатов обеспечена: представительностью отобранных проб, методикой их отбора и подготовки, использованием современных инструментальных методов анализа, проведением комплексного минералого-геохимического исследования, точность которых обеспечивалась внутренним и внешним контролем анализов.

Апробация результатов

Исследование проводилось с 2014 года в лаборатории геохимии благородных металлов, редких элементов и экогеохимии ИГМ СО РАН (с 2018 года после реструктуризации в лаборатории геохимии благородных и редких элементов). Полученные результаты по теме диссертации докладывались на российских и международных научных конференциях. Часть работ автором были выполнены при финансовой поддержке грантов РФФИ 15-05-05362, 15-05-06950, 16-60108, РФФИ 15-17-10011, интеграционных проектов СО РАН №51, №94.

Публикации

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 23 работах, включая 1 монографию, 11 статей, 11 материалов и тезисов конференций.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в экспедиционных работах совместно с коллегами на территории Урского и Комсомольского хвостохранилищ, в отборе материалов (горных пород и руд, отходов обогащения, торфов, почв, поверхностных вод) и их первичной обработке. Автор самостоятельно провел: пробоподготовку всего отобранного фактического материала для лабораторных исследований; комплекс минералого-

геохимических исследований; обработку аналитических данных. Автору была оказана помощь научным руководителем к.г.-м.н. Е.В. Лазаревой, а также коллегами и соавторами к.г.-м.н. И.Н. Мяжкой, к.г.-м.н. М.А. Густайтис, И.С. Кириченко, д.г.-м.н. С.М. Жмодиком, д.х.н. О.В. Шуваевой, Н.В. Ищук. Совместно с соавторами проведена интерпретация полученных данных, написаны статьи, тезисы и материалы конференций.

Структура и объем диссертации

Исследование изложено на 185 страницах, содержит 18 таблиц, 25 рисунков, 2 приложения. Диссертация состоит из «Введения», 7 глав и «Выводов». Список литературы состоит из 377 наименований.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.г.-м.н. Е.В. Лазаревой за внимание и помощь на всех этапах выполнения диссертационной работы; своим основным соавторам и коллегам к.г.-м.н. И.Н. Мяжкой и к.г.-м.н. М.А. Густайтис за помощь на всех этапах исследования; д.г.-м.н. С.М. Жмодику, д.х.н. О.В. Шуваевой, к.г.-м.н. Б.Л. Щербову, д.г.-м.н. Э.В. Сокол, д.г.-м.н. В.Н. Реутскому за ценные консультации и замечания; к.х.н. Ж.О. Бадмаевой, Л.Н. Букреевой, В.Н. Ильиной, к.г.-м.н. Н.С. Карманову, к.т.н. Н.Г. Кармановой, Ю.П. Колмогорову, И.С. Кириченко, к.х.н. И.В. Николаевой, О.Л. Огородниковой, д.х.н. О.П. Таран, к.г.-м.н. А.Т. Титову, В.С. Пархоменко, к.х.н. Е.В. Поляковой, М.В. Хлестову за помощь в получении высококачественных аналитических данных; Ю.И. Маликову за помощь в пробоподготовке; д.б.н. Т.В. Тепляковой за предоставленные образцы гуминовых кислот; Н.В. Ищук, В.А. Ходько за помощь в проведении полевых исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 посвящена литературному обзору по тематике исследования – общей геохимии Au, его формам нахождения в различных горных породах. Более детально рассмотрено поведение элемента в углеродсодержащих горных породах (черные сланцы, угли, торф) и его взаимодействие с ОВ. Приведен обзор химических методов исследования форм нахождения Au в природных объектах. Дано краткое описание хвостохранилищ и сульфидсодержащих отходов обогащения, внимание акцентировано на процессах гипергенного изменения вещества.

Главе 2 приведено описание объектов исследования. Урское хвостохранилище (пос. Урск, Кемеровская область, 54°27'11.03"СШ, 85°24'09.76"ВД, рис. 1), вмещает отходы цианирования первичных Cu-Zn колчеданных руд и руд зоны окисления Ново-Урского месторождения. Высокусльфидные отходы сложены в виде куч в овраге с естественным ручьем. Воды ручья, дренируя вещество отходов обогащения, преобразуются в кислые с рН~2, минерализацией 5 г/л и содержат в растворе Fe, Al, SO₄ (рис. 2). Площадка под хвостохранилищем заболочена. Отходы обогащения на протяжении 80 лет сформировали поток рассеяния, в котором кислые дренажные воды контактируют с природным торфяником (рис. 1).

Комсомольское хвостохранилище заливного типа (пгт. Комсомольск, Кемеровская область, 55°38'07.3" СШ, 88°11'53.6" ВД, рис. 3) заполнено отходами

цианирования Au-арсенопирит кварцевых руд Комсомольского месторождения и штейна осадительной плавки сурьмяного концентрата Кадамжайского комбината (Кыргызстан). Щелочные растворы гидроотвала с $\text{pH}=8.6$ Mg-Ca-SO₄ состава имеют минерализацию 0.44 г/л (рис. 2). Среднее содержание сульфидов в отходах обогащения невысокое, они распределены неравномерно, благодаря формированию гравитационных линз в углублениях яри, формирующихся на поверхности отходов.

Глава 3 посвящена методам исследования. Фактический материал в обоих хвостохранилищах отбирался в виде колонок и разрезов (рис. 4, 5). Одна часть отобранного твердого материала разделялась на объемные пробы для определения валовых содержаний элементов, извлечения поровых вод/водных вытяжек и изучения форм нахождения элементов, другая отбиралась с сохранением структуры для выявления распределения элементов. Определение макро- и микроэлементного состава проводилось методами РФА, РФА-СИ, ААС, ИНАА, CHNS-анализа. Детальное сканирование распределения элементов проводилось методом РФА-СИ по методике, описанной в работах [Phedorin, Goldberg, 2005; Goldberg et al., 2010; Bobrov et al., 2012]. Состав и микроморфология минералов изучались методом СЭМ. В пробах воды, в водных вытяжках и фракциях выщелачивания содержания макро- и микроэлементов определялись методами ИСП-АЭС и ИСП-МС; концентрация Au, Ag – методом ААС; F, Cl⁻, Br, NO₃⁻, SO₄²⁻ – методом ионной хроматографии, pH и Eh – потенциометрическим методом, содержания общего и растворенного C_{орг} – методом ГХ. Подробно описана применявшаяся методика ступенчатого выщелачивания (табл. 1). Условия для извлечения фракций Ф1-5 и Ф7 подобраны на основании литературных данных [Hall et al., 1996; Fanfani et al., 1997; Dold, Fontbote, 2002; Ладонин, 2002; Dold, 2003; Sidenko et al., 2005; Bogush, Lazareva, 2011; Torres, Auleda, 2013], Ф6 – самостоятельно в ходе исследования.

Таблица 1. Схема методики ступенчатого выщелачивания.

Фракции	Условия выщелачивания	Выщелачиваемые соединения
Ф1. Водорастворимая	20 мл H₂O_{дист.}, 24 ч при нормальных условиях	Водорастворимые сульфаты и ОВ
Ф2. Ионообменная	20 мл 1 М CH ₃ COONH ₄ , pH=7, 1 ч при нормальных условиях	Адсорбированные, обменные и межслоевые ионы
Ф3. Кислоторастворимая	20 мл 1 М CH ₃ COONH ₄ , pH=5, 5 ч при нормальных условиях	Карбонаты
Ф4. Легкоокисляемая	20 мл 30 % H₂O₂, pH=4.2, 1.5-2 ч на песчаной бане	ОВ, сульфиды Cu, вторичные сульфиды
Ф5. Восстанавливаемая	20 мл 2М NH₂OH·HCl в 25 % CH₃COOH,	Оксиды Mn, аморфные и

Фракции	Условия выщелачивания	Выщелачиваемые соединения
	pH=2-3, 3 ч при 90°C	Кристаллические соединения Fe(III) и Al(III)
Ф6. Трудноокисляемая	10 мл смеси 20 % HNO ₃ и 20 % H ₂ O ₂ 1 ч на песчаной бане	Первичные сульфиды, сульфосоли
Ф7. Остаточная	Разложение кислотами HF, HNO₃, HClO₄, HCl	Кварц, силикаты, глинистые минералы и др.

Примечание: жирным шрифтом выделена укороченная схема выщелачивания, применявшаяся для изучения твердой составляющей из Урского хвостохранилища.

Проведены эксперименты по выявлению особенностей распределения Au по фракциям ступенчатого выщелачивания с применением модельных веществ с известными формами нахождения элемента, приближенных по составу к образцам из ореола рассеяния сульфидных хвостохранилищ. Для учёта влияния состава образца, модельные вещества смешивались с веществами-наполнителями с низкими содержаниями Au (г/т): кварц (0.0024), известняк (0.043), оксиды/гидроксиды Fe(III) (0.038), гуминовые кислоты (0.0012). Смеси готовились весовым способом: точные навески модельных веществ и веществ-наполнителей гомогенизировались (табл. 2).

Таблица 2. Реестр используемых модельных веществ и смесей.

Модельные вещества с известной формой нахождения Au	
Вещества	Получение
Крупное Au ⁰	0.100 г Au-кварцевой породы + 19.900 г кварца
Наноразмерное Au ⁰	0.100 г Au-углеродного катализатора [Simakova et al., 2010] + 9.900 г кварца
Au-содержащий пирит	Получен путем гидротермального синтеза при 450–475 °С, 1 кбар в системе Fe-S из троилита с добавлением серы и золотой проволоки [Тагиров и др., 2015]
Au-содержащие гуминовые кислоты	100 г гуминового препарата [Патент РФ 2044757] растворяли в 500 мл дистиллированной воды. К раствору добавляли 20 мл раствора Au(III) с концентрацией 10 ppm в 1M HCl. Раствор, имеющий сильнощелочную реакцию, подкисляли до pH=1 концентрированной HCl. Выпавшие в осадок гуминовые кислоты отделялись, промывались дистиллированной водой до нейтральной pH (~7), сушились при комнатной температуре
Au-содержащие оксиды/гидроксиды Fe(III)	к 100 мл насыщенного раствора FeCl ₃ добавляли 5 мл раствора Au(III) с концентрацией 10 ppm в 1M HCl. Осаждение оксидов/гидроксидов Fe(III) проводили

	добавлением раствора КОН до нейтральной pH (~7). Осадок отделялся, сушился при комнатной температуре
Смеси модельных веществ с веществами-наполнителями	
	Соотношение веществ, в мас. % от общ.
Смесь 1	Au-нано 10%, кварц 40%, известняк 10%, оксиды/гидроксиды Fe(III) 20%, гуминовые кислоты 20% (коэффициент разбавления модельного вещества R=10)
Смесь 2	Au-FeS ₂ 10%, кварц 40%, известняк 10%, оксиды/гидроксиды Fe(III) 20%, гуминовые кислоты 20% (коэффициент разбавления модельного вещества R=10)
Смесь 3	Au-ГК 20%, кварц 50%, известняк 10%, оксиды/гидроксиды Fe(III) 20% (коэффициент разбавления модельного вещества R=5)
Смесь 4	Au-Г/О 20%, кварц 50%, известняк 10%, гуминовые кислоты 20% (коэффициент разбавления модельного вещества R=5)

В **Главах 4-6** представлены результаты исследования: геохимические и минералогические особенности отобранного материала, формы нахождения макро- и потенциально токсичных элементов, а также благородных металлов (Au и Ag), результаты модельных экспериментов с применением веществ с известными формами нахождения Au. **Глава 7** посвящена обсуждению полученных результатов.

Защищаемое положение 1: Поступающие из сульфидсодержащих отходов обогащения и техногенных растворов Cu, Zn, As, Se, Sb, Pb аккумулируются природным органическим веществом и извлекаются из него при ступенчатом выщелачивании в легкоокисляемую (вторичные сульфиды Zn, Hg, Sb, селениды Hg) и восстанавливаемую (ассоциированные с различными вторичными соединениями Fe(III)) фракции, при этом в кислых средах доля легкоокисляемой фракции выше, а в нейтрально-слабощелочных средах существенна доля кислоторастворимой фракции.

Колонка 1 (K1; рис. 4, 6) глубиной 37 см отобрана в западной части потока рассеяния Урского хвостохранилища (рис. 1), покрытой снесёнными отходами первичных руд. Она в верхней части до 10 см представлена отходами обогащения, перемешанными с детритовым веществом (растительные остатки), в котором присутствуют обломки исходных минералов (барит и пирит) и новообразованных (англезит, ярозит с примесью As, Ba, Pb). Ниже 10 см от поверхности колонка сложена тёмно-серым, илистым и песчано-илистым материалом, представленным обогащённым детритовым веществом тонкозернистым суглинком, в котором преобладают кварц, полевой шпат, гидрослюда и минералы группы каолинита.

В K1 высокие концентрации потенциально токсичных элементов (ПТЭ) наблюдаются в верхней части, но очевидна также миграция элементов в подстилающее вещество и их накопление (рис. 6). Для различных элементов пики

концентрирования внутри обогащенного ОВ суглинка располагаются на различной глубине: сверху вниз отмечаются пики Se, Pb, As, Zn, Cu (КК = 3.5, 0.5, 0.4, 0.7, 4.8 соответственно). Вероятнее всего такой ряд отражает миграционную способность элементов в данных условиях.

В К1 высокая доля водорастворимых форм характерна для Fe, Cu, Zn, Pb (рис. 6), причем в обогащенном ОВ суглинке на контакте с отходами (С4-С6), наблюдается существенное увеличение доли водорастворимых форм этих элементов. В целом содержания водорастворимых форм элементов в К1 высокие, что логично из-за более кислых условий среды и присутствия исходных окисляющихся сульфидов. Наблюдается уменьшение доли водорастворимых форм с глубиной, где Cu, Se, Hg представлены преимущественно легкоокисляемыми формами, тогда как Fe, Zn, As имеют существенную долю легкоокисляемых форм лишь в горизонтах, где органическое вещество перемешано с отходами (С1-С4). Доля легкоокисляемых форм Pb крайне незначительна во всем разрезе. В восстанавливаемую фракцию извлекаются различные соединения Fe, содержащие в качестве примесей Pb, As, Cu, Zn, Se, Hg. В остаточной фракции содержатся элементы, характерные для исходных сульфидов, – Fe, As, Pb.

Колонка 2 (К2; рис. 4, 7) глубиной 43 см отобрана из восточной части потока рассеяния, которая постоянно обводнена дренажными водами и покрыта отходами руд зоны окисления (рис. 1). Основная её часть сложена преимущественно обохренным илистым материалом снесённых отходов руд зоны окисления. В ней выделяются два крупных прослоя торфа в средней (15-23 см) и нижней (38-43 см) части. Отмечается также большое количество органических остатков, перемешанных с отходами.

Элементы Zn и Se концентрируются в значительных количествах в среднем торфяном прослое (КК = 113 и 8.5 соответственно). Cu и As накапливаются не только в среднем торфяном прослое, но и в нижнем (КК = 5.3 и 2.3 соответственно). Содержания Pb в торфяных прослоях существенно ниже содержаний в илистом материале отходов, поэтому активного концентрирования не наблюдается (КК=0.5). В торфяных прослоях присутствуют минералы, типичные для зон окисления сульфидных месторождений [Bigham, 1994; Lottermoser, 2010] – гидроксиды Fe(III), сульфаты Zn с примесью Cd, Cu и As (рис. 8а), гипс (рис. 8ж). Установлен аутигенный барит, содержащий Sr, который присутствует в виде мелкозернистого агрегата, заполняющего пустоты в органических остатках (рис. 8б); также наблюдаются друзы новообразованного барита. В полостях растительных остатков встречается галенит (PbS) и сульфат Pb, предположительно англезит (PbSO₄), в сростании с баритом (рис. 8в).

В большом количестве в среднем торфяном прослое присутствуют сульфиды Zn, сульфиды и селениды Hg. Выделено три основных разновидности – сульфиды Zn (рис. 8б); селениды Hg (рис. 8д); сульфиды Hg с примесью Ag, Zn, Cu, Se, As, I (рис. 8г, е-з). Сульфиды встречаются в виде тонкозернистых выделений (рис. 8г, ж), глобул (рис. 8з), порой обособлений, покрывающих клетки микроорганизмов (рис. 8е). Большое количество псевдоморфоз сульфидов по клеткам микроорганизмов в среднем торфяном слое позволяет считать, что

основным агентом концентрирования элементов и образования минералов являются микроорганизмы.

В К2 доля водорастворимых форм большинства элементов (Fe, Cu, As, Se, Hg, Pb) незначительна (рис. 7). Самые высокие содержания зафиксированы либо в поверхностных слоях (С-1,2), либо органических прослоях (С7, С14-15). Существенная доля водорастворимых форм в ней установлена для Zn. В торфяных прослоях наблюдается увеличение содержания водорастворимых форм лишь тех элементов, которые хорошо мигрируют в кислых сульфатных растворах (Fe, Zn, As). Доля легкоокисляемых форм Fe, As, Pb мала, причем максимальные значения соответствуют слоям, сложенным преимущественно торфяным веществом. Следующие элементы Zn, Cu, Se, Hg, которые формируют новообразованные сульфиды и селениды, представлены легкоокисляемыми формами. Восстанавливаемые формы резко доминируют у Fe, Pb, As. В материале колонки очень распространены соединения Fe(III) (гётит, минералы группы ярозита и т. д.) и набор элементов, связанных с восстанавливаемой фракцией, фактически отражает состав этих соединений и характерных для них элементов-примесей. В остаточной фракции содержатся Fe, As, Pb, которые характерны для сравнительно устойчивых исходных сульфидов.

Вертикальный разрез (P1, рис. 5, 9) глубиной около 130 см был отобран в северной части Комсомольского хвостохранилища, где складированы отходы переработки руд Комсомольского месторождения и Кадамжайских штейнов, где преобладает песчаная фракция отходов (рис. 2). Основную его часть составляет материал отходов (С1-С12), которое сверху (С1) покрывается небольшим слоем новообразованной почвы, а снизу (С13-С14) она подстилается захороненной почвой с остатками растительного детритового вещества. Здесь выделяется крупный горизонт (С5-С9) с характерным наличием линз гравитационного обогащения, в состав которых входят рудные минералы (пирит, магнетит, ильменит, пирротин, арсенопирит, халькопирит, галенит) и облаковидные образования – скопления фаз Fe-Sb-S [Лазарева, 2003]. В подстилающем детритовом веществе в тканях отмерших растений установлены соединения Sb-As-S (рис. 10). Их диагностика затруднена из-за малых размеров.

Подстилающее детритовое вещество в P1 аккумулирует Cu, Zn, Sb и Pb (КК = 42, 5.9, 6.0, 2.7 соответственно), существенного накопления As в нем не наблюдается (КК=0.9). При этом аккумулирующие свойства новообразованного почвенного горизонта по отношению к ПТЭ практически не выражены. Сканирование РФА-СИ (по данным распределения Cu и Zn) показывает, что концентрирование элементов происходит в достаточно узком диапазоне на глубине 108-110 см от дневной поверхности.

Разрез P1 характеризуется крайне малой долей водорастворимых форм ПТЭ в материале отходов (С1-С12), за исключением Sb (рис. 9), а в подстилающем детритовом веществе (С13-С14) её доля для Cu, Zn, Sb увеличивается, в то время как для Fe, As, Pb такой закономерности не наблюдается. В составе отходов присутствуют карбонаты (преимущественно кальцит и анкерит [Лазарева, 2003]), поэтому ионообменные и кислоторастворимые формы ПТЭ существенны не только в материале отходов, но и в подстилающем детритовом веществе. В слое

C14 доля и содержание этих форм снижаются на порядок. Легкоокисляемых форм в разрезе P1 значительно меньше, чем в колонках из Урского хвостохранилища, а их существенные содержания наблюдаются в подстилающем детритовом веществе (C13-C14). В целом, ПТЭ в разрезе P1, в том числе в подстилающем детритовом веществе, представлены преимущественно восстанавливаемыми формами – вторичными соединениями Fe(III) с широким составом примесей. В трудноокисляемую фракцию преимущественно выщелачиваются Fe и As, входящие в состав минералов – арсенопирита и пирита, сохранившихся в отходах обогащения. Преобладание Sb в остаточной фракции согласуется с нахождением её форм, полученным при применении методики ступенчатого выщелачивания на других схожих объектах [Wang et al., 2023].

Защищаемое положение 2: При ступенчатом выщелачивании Au-содержащих веществ происходит совместное извлечение нескольких форм Au в легкоокисляемую и трудноокисляемую фракции. В легкоокисляемую фракцию преимущественно извлекается Au, соосажденное с органическим веществом и с соединениями Fe(III). Наноразмерное и связанное в эндогенных сульфидах Au извлекается в трудноокисляемую фракцию (до 71 % и 95 %, соответственно), тогда как крупное Au содержится в остатке (до 88 %).

Поведение самородного Au при ступенчатом выщелачивании зависит от размеров его частиц. Крупные частицы размером >1 мкм полностью извлекаются в остаточную фракцию, частично – в трудноокисляемую (рис. 11). Наноразмерное золото практически полностью извлекается в трудноокисляемую фракцию, частично – в легкоокисляемую (рис. 11). Это объясняется непосредственно окислением и наночастиц Au, и углеродного носителя. Поскольку наночастицы золота синтезировались из водного раствора тетрахлороаурата водорода HAuCl_4 при $\text{pH}=2.5$, некоторая доля элемента адсорбируется на углеродный носитель в виде сложных $[\text{AuCl}_3(\text{OH})]^-$ комплексов [Simakova et al., 2010]. Эти комплексы полностью десорбируются в кислых условиях восстанавливаемой фракции из-за более низкого pH реагента ($\text{pH}\sim 2$) и наличия хлорид-ионов.

Золото в пирите селективно извлекается в трудноокисляемую фракцию, и, согласно данным [Tagirov et al., 2015], оно находится в матрице пирита в виде наночастиц сульфида золота(I) – Au_2S . Данная его форма, как и другие первичные сульфиды, полностью растворяется в присутствии сильных окислителей [Dold, Fontboté, 2002]; влияния других веществ на характер выщелачивания не выявлено (рис. 11).

При соосаждении комплексов Au(III) с оксидами/гидроксидами Fe(III) происходит его специфическая внутрисферная сорбция на поверхность минерала [Machesky et al., 1991; Greffié et al., 1996; Ran et al., 2002]. При извлечении водорастворимой, ионообменной и кислоторастворимой фракций может происходить десорбция этих комплексов. В экспериментах восстановление золота до Au^0 и образование самородных частиц затруднены из-за отсутствия восстановителей в системе (Fe^{2+} , Mn^{2+} , органическое вещество) [Greffié et al., 1996; Ran et al., 2002]. Однако высокая доля легкоокисляемых форм Au в оксидах/гидроксидах Fe(III) свидетельствует об образовании его наноразмерных

частиц, скорее всего, за счет фотовосстановления [Ran et al., 2002]. В смеси веществ существенное влияние оказывают гуминовые кислоты, которые частично сорбируют Au, извлеченное из фракций Ф1–Ф3 (рис. 11).

Известно, что взаимодействие водных комплексов Au(III) с гуминовыми кислотами идет по механизму специфической внутрисферной сорбции и сопровождается его восстановлением с образованием самородных частиц за счет окисления органического вещества [Ran et al., 2002; Radomskaaya et al., 2015], что затрудняет определение доли золота, непосредственно накопленного органическим веществом. Другие компоненты системы не оказывают существенного влияния на распределение Au, связанного с ОВ, при ступенчатом выщелачивании (рис. 11).

Результаты исследования по формам золота, извлекаемым на каждой фракции ступенчатого выщелачивания, представлены в таблице 3. В большинстве современных работ по ступенчатому выщелачиванию Au, выщелачиваемое в легкоокисляемой или органической фракциях, трактуется как «связанное с органическим веществом» [Reith, Cornelis, 2017; Junussov et al., 2018; Korshunova, Charykova, 2019; Choleva et al., 2020]. Согласно нашим результатам, при ступенчатом выщелачивании элемента наблюдается совместное извлечение нескольких форм золота в одной фракции. Таким образом, интерпретация результатов выщелачивания требует большего внимания и дополнительных исследований.

Таблица 3. Формы нахождения Au, извлекаемые в ходе ступенчатого выщелачивания.

Фракции	Выщелачиваемые формы Au
Водорастворимая	Мобильные формы
Ионообменная	
Кислоторастворимая	
Легкоокисляемая (окисляемая-1)	Au, связанное с органическим веществом, с вторичными и Су сульфидами; в незначительной степени наноразмерное самородное
Восстанавливаемая	Au, связанное с оксидами/гидроксидами Fe, Al, Mn
Трудноокисляемая (окисляемая-2)	Au, связанное с первичными сульфидами; наноразмерное самородное; в незначительной степени крупное самородное
Остаточная	Крупное самородное

Защищаемое положение 3: Сульфидсодержащие отходы, обогащенные органическим веществом, характеризуются высокими концентрациями водорастворимых форм Au (0.035-0.23 г/т) и Ag (0.017-0.24 г/т), вне зависимости от pH среды. Au аккумулируется в виде форм, извлекаемых в легкоокисляемую (связанное с органическим веществом, до 40.7%), восстанавливаемую (связанное с соединениями Fe(III), до 29.8 %), трудноокисляемую и остаточную фракции (нано- и субмикронные выделения Au⁰, до 96.7 %). Ag аккумулируется в виде форм, извлекаемых в

легкоокисляемую и восстанавливаемую фракции (54.0-86.6 %), аналогично потенциально токсичным элементам.

Концентрации Au в колонках из Урского хвостохранилища на порядки превышают значения, определенные для отходов обогащения [Myagkaya et al, 2016a]. Содержание Au в колонке К1 в целом очень высокое (КК до 64, рис. 12): в верхних горизонтах достигает 32 г/т, плавно падая до 0.3 г/т в нижнем. Данные РФА-СИ сканирования показывают локальное увеличение содержания золота в интервале от 0.5 до 3.5 см до 200 г/т, а в наиболее обогащенной точке до 345 г/т. Максимальное значение, установленное до этого в области потока рассеяния, покрытой отходами руд зоны окисления, составляло 155 г/т [Myagkaya et al., 2016 b]. Кроме этого, на глубине 11-14 см наблюдается второй пик содержания до 110 г/т. В обогащенных слоях установлено самородное Au в виде субмикронных частиц сферической формы, покрывающих растительный остаток, а также в виде самостоятельных глобул и чешуек (рис. 13). Все самородные частицы содержат примесь Cu в диапазоне 0.19-0.80 масс. %.

Верхние горизонты колонки К1 (С1-С3) характеризуются самыми высокими содержаниями водорастворимой формы Au – от 32 до 230 мг/т (рис. 12). Содержания легкоокисляемых форм достаточно ровные 0.4-0.5 г/т, а восстанавливаемых форм ниже – 0.02-0.3 г/т. Тем не менее, более 94 % золота приходится на остаточную фракцию. В захороненном под отходами обогащенном ОВ суглинке (С4-С12) концентрация водорастворимых форм ниже, чем в верхних слоях, и снижаются от переходного слоя С-4 (60 мг/т) до нижнего слоя С-12 (2 мг/т). Концентрация легкоокисляемых форм резко возрастает в переходном слое С-4 до 5 г/т и постепенно снижаются к С-12 до 0.14 г/т. Закономерности распределения восстанавливаемых форм Au аналогичны, но их содержания невысокие – не более 0.9 г/т. В суглинке основное количество Au также в остаточной фракции, но доля ниже, чем в верхних горизонтах – от 60 до 86 %.

По данным РФА-СИ сканирования наиболее высокие содержания Ag приурочены к верхним горизонтам К1 (рис. 12). От самых верхних миллиметров до глубины 5 см содержание почти равномерно снижается от 30 до 6 г/т. Затем оно снова возрастает двумя пиками концентраций до 35 и 50 г/т. Однако, по результатам анализа объемных проб максимальные содержания Ag сопоставимы с содержаниями в ОПП и составляют 18 г/т (КК=1.0). В суглинке, подстилающем отходы С5-С12, содержания элемента очень низкие – менее 1 г/т.

Верхние горизонты колонки К1 (С1-С3) также характеризуются самыми высокими содержаниями водорастворимых форм Ag – 110-240 мг/т (рис. 12). Концентрация легкоокисляемых форм Ag сопоставима с содержаниями водорастворимых форм – 18-170 мг/т. Наибольшее количество Ag приходится на восстанавливаемую фракцию – 6.6-12.2 г/т, что составляет 63-72 %. Доля остаточной фракции – 26-34 %. В суглинке (С4-С12) концентрация водорастворимых форм менее 8 мг/т, легкоокисляемых – менее 26 мг/т, восстанавливаемых – менее 0.9 г/т. Основными в слоях С4-С12 являются восстанавливаемые формы Ag, доля которых составляет 80-99 %. Только в двух слоях, переходном С-4 и нижнем С-12, наблюдается значительное увеличение

легкоокисляемых форм – 0.5 и 0.15 г/т соответственно, что обеспечивает 15 и 18 % от суммы.

Содержание Au в колонке K2 меньше, чем в K1 (рис. 14). В илистом материале снесенных отходов обогащения концентрация не превышает 0.5 г/т. Наблюдаются повышенные количества элемента в верхней части колонки в песчаном веществе до 1.5 г/т и его резкое увеличение в обоих крупных торфяных прослоях до 8-10 г/т (КК до 38). К сожалению, высокие содержания Hg в колонке K2 не позволили получить данные о концентрации Au методом РФА-СИ из-за наложения пиков. Минералогическими методами самородные частицы Au не выявляются, что может свидетельствовать или о крайне малом их размере, или об тесной ассоциации с аутигенными сульфидами или селенидами (рис. 8).

В верхней части колонки K2 в песчаном материале отходов (C1-C2) Au представлено преимущественно восстанавливаемыми и остаточными формами (рис. 14). В илистой части отходов обогащения с невысокими содержаниями Au (C3-C5, C8-C11) его формы распределены крайне неравномерно. В обоих типах отходов содержания водорастворимых и легкоокисляемых форм крайне низкие. В слоях, содержащих торфяное вещество (C6-C7, C12-C15), Au аккумулируется в основном в виде остаточных форм, на долю которых приходится от 50 до 97 % валовых содержаний. В торфяных прослоях количество водорастворимых форм достигает 35-42 мг/т, легкоокисляемых – 0.06-1.6 г/т, восстанавливаемых – 0.3-0.9 г/т. В целом по колонке наблюдается положительная корреляция между содержанием золота и потерями при прокаливании (LOI).

По данным РФА-СИ сканирования, концентрация Ag по колонке достигает 6 г/т, увеличиваясь до 15 г/т на уровне 6 см и до 23 г/т в среднем торфяном слое (рис. 14). Согласно данным ААС, в среднем торфяном слое содержание элемента увеличивается до 18 г/т, что немногим выше содержаний в ОРЗО (КК=1.4). В песчаной (C1-C2) и илистой (C3-C6, C8-C10) частях разреза он представлен, в основном, восстанавливаемыми формами, на долю которых приходится более 50 %. Вероятнее всего, это связано с вхождением элемента в виде примеси в минералах группы ярозита. Самые высокие содержания и доля восстанавливаемых форм в колонке K2 наблюдаются в слоях C-6 и C-8, т.е. на границе илистого и органического вещества. Аккумуляция Ag в среднем торфяном прослое происходит за счет увеличения содержания как легкоокисляемых, так и остаточных форм; в слоях C11-C15 – преимущественно за счет увеличения содержания остаточных форм. Установлено, что Ag является одной из основных примесей в новообразованных сульфидах Zn и Hg, обнаруженных в среднем торфяном прослое [Муагкауа et al., 2016b]. Кроме того, предыдущими исследованиями показано, что исходные минералы пирит и барит в веществе отходов обогащения содержат микровключения не только минералов с примесью серебра, но и его собственные минералы (например, жеффруаит, науманнит) [Мягкая, 2013]. Водорастворимые формы Ag в колонке K2 распределены крайне неравномерно, увеличения концентрации в органосодержащих слоях не прослеживаются.

В разрезе P1 содержания Au в материале отходов обогащения (C3-C12) варьируют от 0.13 до 0.41 г/т, в слое новообразованной почвы (C1-C2)

увеличиваются до 0.9 г/т, а в подстиляющем почвенном горизонте (С13-С14) до 3 г/т (КК=9.4). В разрезе Р1 элемент характеризуется более высокой мобильностью (рис. 15). Доля форм Au варьирует (%): водорастворимых – от 2.3 до 8.5, ионообменных – от 0.4 до 4.1, кислоторастворимых – от 0.4 до 4.1. При этом, содержания мобильных форм (Ф1+Ф2+Ф3) в подстиляющем детритовом веществе незначительно, чем в отходах обогащения. В слоях С1-С2 преобладают трудноокисляемые и остаточные формы, в С7 элемент равномерно распределен по фракциям, в С11 резко доминируют трудноокисляемые формы. Слои С13 и С14 разреза имеют одинаковое распределение и содержание мобильных, легкоокисляемых и трудноокисляемых форм, однако, в С13 больше остаточных, в С14 – восстанавливаемых.

Содержания Ag в материале отходов обогащения (С3-С12) варьируют от 0.27 до 1.2 г/т, в новообразованной почве (С1-С2) увеличиваются до 2.0 г/т, а в подстиляющем почвенном горизонте (С13-С14) до 10 г/т (КК=4.9). Доминирующими формами нахождения Ag являются восстанавливаемые (рис. 15): в слоях С1-С12 их доля составляет 37-58 %, при переходе в подстиляющие детритовый и почвенный горизонты (С13-С14) она возрастает до 70-83 %. В слое С2 наблюдается максимальная доля по разрезу и содержание легкоокисляемых форм Ag, сопоставимая с более высокими валовыми концентрациями в подстиляющем детритовом веществе. Трудноокисляемые и остаточные формы элемента распределены по разрезу Р1 достаточно равномерно. Серебро, в отличие от золота, менее мобильно в щелочных растворах Комсомольского хвостохранилища. Доли водорастворимых, ионообменных, кислоторастворимых форм крайне незначительны. Однако, в илистом материале отходов обогащения (слой С11) увеличивается содержание кислоторастворимых форм Ag, а в подстиляющем детритовом веществе (слой С13) – водорастворимых.

ВЫВОДЫ

1. Природное органическое вещество, взаимодействующее с сульфидсодержащими отходами обогащения, во всех рассмотренных случаях обладает резко выраженными осадительными свойствами по отношению к ПТЭ (Cu, Zn, As, Se, Sb, Pb) и благородным металлам (Au, Ag) вне зависимости от физико-химических условий хвостохранилища. Наибольшая аккумуляция сопровождается образованием вторичных минеральных фаз, в первую очередь, различных соединений Fe(III) с обширным примесным составом, далее при благоприятных условиях – аутигенных фаз сульфидов Zn и Hg и селенидов Hg. И те, и другие вторичные фазы содержат золото и серебро.

2. Аккумуляция элементов органическим веществом сопровождается образованием форм элементов, способных к повторной иммобилизации при смене условий среды. Так, установлены высокие содержания водорастворимых форм элементов (возможно в виде органоминеральных соединений), способных к дальнейшей миграции с дренажными растворами. Легкоокисляемые формы в виде вторичных сульфидов и форм, связанных с органическим веществом, как правило, не устойчивы в поверхностных условиях. Восстанавливаемые формы, связанные с соединениями Fe(III), могут высвобождаться при постоянном поступлении более кислых дренажных растворов [Bigham, 1994].

3. Повышенные содержания водорастворимых форм золота в обогащенных органическим веществом образцах свидетельствуют о концентрировании золота на ОВ из раствора с дальнейшим переотложением в виде самородного нано- и субмикронной размерности. Кроме того, сорбировать золото способны и вторичные фазы сульфидов и соединений Fe(III), образующихся при участии ОВ. Не исключено, что в процессе аккумуляции золота аккумулируется различными фазами. Данные процессы происходят в средах как с кислой, так и с нейтрально-щелочной обстановкой.

4. Методика ступенчатого выщелачивания ограниченно применима для изучения форм нахождения Au, так как происходит совместное извлечение нескольких форм золота в одной фракции. В легкоокисляемую фракцию совместно с наноразмерным Au⁰ извлекается золото, связанное с органическим веществом; в трудноокисляемую – золото в сульфидах эндогенного происхождения, наноразмерное и, частично, крупное (с размером частиц >1 мкм) Au⁰; в остатке – крупное Au⁰ золото.

Список опубликованных работ по теме диссертации:

Монографии:

1. Биогеохимический мониторинг в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом микробиологических факторов трансформации минеральных компонентов / [Л.П. Рихванов и др.]; М-во образования и науки РФ, Нац. исслед. Том. политехн. ун-т; Ин-т геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 437 с. Тираж 100, ISBN 978-5-7692-1558-2 [Абросимова Н.А., Барановская Н.В., Большунова Т.С., Горбатиюк Е.А., Еделев А.В., Межибор А.М., Мягкая И.Н., Соктоев Б.Р., Юсупов Д.В., Белан Л.Н., Бортникова С.Б., Густайтис М.А., Жмодик С.М., Ишук Н.В., Кириченко И.С., Наркович Д.В., Лазарева Е.В., Оленченко В.В., Саева О.П., **Сарыг-оол Б.Ю.**, Усманова Т.В., Юркевич Н.В.].

Статьи в рецензируемых журналах:

1. **Сарыг-оол Б.Ю.**, Мягкая И.Н., Жмодик С.М., Теплякова Т.В., Лазарева Е.В. Экспериментальные данные по ступенчатому выщелачиванию веществ с известными формами нахождения Au // Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – Т. 13. – № 2S. – С. 0619. **Scopus, WoS**

2. **Saryg-ool B.Yu.**, Myagkaya I.N., Kirichenko I.S., Gustaytis M.A., Shuvaeva O.V., Zhmodik S.M., Lazareva E.V. Redistribution and speciation of elements in gold-bearing sulfide mine tailings interbedded with natural organic matter: case study of Novo-Ursk deposit, Kemerovo Region, Siberia // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. – 2020. – Т. 20,(3). – С. 323-336. **Scopus, WoS**

3. Myagkaya I.N., **Saryg-ool B.Yu.**, Surkov O.N., Zhmodik S.M., Lazareva E.V., Taran O.P. Natural Organic Matter from the Dispersion Train of Gold Sulfide Tailings: Fraction Compositions and Speciation of Elements // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. – 2021. – V. 21, №1, geochem2020-052. **Scopus, WoS**

4. Мягкая И.Н., **Сарыг-оол Б.Ю.**, Лазарева Е.В., Жмодик С.М. Моделирование процесса сорбции Au природными сорбентами в условиях потока рассеяния сульфидного хвостохранилища // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. – 2019. - Т. 12. - № 4. - С. 580–589. **Scopus, WoS**.

5. Мягкая И.Н., **Сарыг-оол Б.Ю.**, Лазарева Е.В., Густайтис М.А., Жмодик С.М. Количественная оценка содержания Au и Ag в различных соединениях Ново-Урского месторождения и хвостохранилища // Вопросы естествознания. – 2018. - №1(15). – С. 121–127.

6. **Сарыг-оол Б. Ю.**, Мягкая И. Н., Лазарева Е. В. Экспериментальное исследование форм нахождения Au после сорбции из раствора на гидроксидах Fe(III) и гуминовых кислотах // Вопросы естествознания. – 2018. - №2(16). – С. 106–111.

7. **Saryg-ool B.Yu.**, Myagkaya I.N., Kirichenko I.S., Gustaytis M.A., Shuvaeva O.V., Zhmodik S.M., Lazareva E.V. Redistribution of elements between wastes and organic-bearing material in the dispersion train of gold-bearing sulfide tailings: Part I. Geochemistry and mineralogy // Science of the Total Environment. – 2017. – Т. 581-582. – С. 460-471. **Scopus, WoS**.

8. Мягкая И.Н., **Сарыг-оол Б.Ю.**, Лазарева Е.В., Ишук Н.В., Жмодик С.М. Формы нахождения золота и серебра в рудах Ново-Урского месторождения (Салаирский край) // Металлогения древних и современных океанов–2017. Дифференциация и причины разнообразия рудных месторождений. Научное издание. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2017. – С. 171–176.

9. Мягкая И.Н., **Сарыг-оол Б.Ю.**, Лазарева Е.В. Связь корреляций Cu, Zn, Se, Ba, Hg, Ag, Au в веществе потока рассеяния Урского хвостохранилища с его минеральным составом // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2016. – №2. – С. 122–132. **ВАК**.

10. **Сарыг-оол Б.Ю.**, Мягкая И.Н., Лазарева Е.В., Кириченко И.С. Формы нахождения элементов в вертикальном разрезе потока рассеяния сульфидсодержащего хвостохранилища // Вопросы естествознания. – 2015. – № 3(7). – С. 140–143.

11. Мягкая И.Н., **Сарыг-оол Б.Ю.**, Густайтис М.А., Лазарева Е.В. Новообразованные минералы меди, цинка, селена, ртути, мышьяка, золота и серебра в потоке рассеяния сульфидсодержащего хвостохранилища // Вопросы естествознания. – 2015. – № 3(7). – С. 118–122.

Материалы и тезисы конференций:

1. **Сарыг-оол Б.Ю.**, Мягкая И.Н., Лазарева Е.В. Формы нахождения Au в отходах обогащения сульфидных руд Комсомольского месторождения золота // Современные проблемы геохимии – 2021: Материалы конференции молодых ученых (Иркутск, 14–17 сентября 2021 г.) – Иркутск: Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 2021. – С. 84-87.

2. **Сарыг-оол Б.Ю.**, Мягкая И.Н., Лазарева Е.В. U и Th в отходах обогащения сульфидных руд Комсомольского месторождения золота // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI Международной конференции (Томск, 20-24 сентября 2021 г.) В 2 томах. Том 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – С. 513-517.

3. Myagkaya I.N., Gustaytis M.A., Kirichenko I.S., **Saryg-ool B.Yu.**, Lazareva E.V. (2019). Acid Mine Drainage Contamination of the Ur Impoundment: Environmental Geochemistry // 16th International Symposium on Water-Rock Interaction and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference). – E3S Web Conf. Volume 98. – P. 09021.

4. **Сарыг-оол Б.Ю.**, Мягкая И.Н., Лазарева Е.В., Жмодик С.М. Исследование форм нахождения золота в сульфидсодержащих породах с применением методики ступенчатого выщелачивания // Науки о Земле. Современное состояние: материалы IV Всерос. молодежной науч.-практ. школы-конф. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. – С. 43–46.

5. Мягкая И.Н., **Сарыг-оол Б.Ю.**, Лазарева Е.В., Густайтис М.А., Жмодик С.М. Эволюция форм нахождения Au, Ag, Hg, Se, I в системе «руды–отходы обогащения–дренажный раствор–торф потока рассеяния» на примере Ново-Урского месторождения // Науки о Земле. Современное состояние: материалы IV Всерос. молодежной науч.-практ. школы-конф. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. –С. 50-52.

6. **Saryg-ool B.Yu.**, Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Zhmodik S.M. Au speciation in sulfide- and organic-bearing materials by sequential extraction // Goldschmidt abstracts. – Paris, 2017. – P. 3511.

7. **Saryg-ool B.Yu.**, Myagkaya I.N., Gustaytis M.A., Lazareva E.V., Zhmodik S.M. Sequential extraction of noble metals from wastes and peat in tailing system // Proceedings of the 8th international siberian early career geoscientists conference. – Novosibirsk, 2016. – P. 109-110.

8. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Kirichenko I.S., Gustaytis M.A., **Saryg-ool B.Yu.**, Zhmodik S.M. Elements accumulation in vertical profile of a dispersion train gold-sulfide tailings // Proceedings of the 8th international siberian early career geoscientists conference. – Novosibirsk, 2016. – P. 349-350.

9. **Saryg-ool B.**, Myagkaya I., Gustaytis M., Lazareva E., Zhmodik S. Au and Ag speciation in vertical profile of tailing's dispersion train // Goldschmidt Abstracts. – Yokohama, 2016. – P. 2738

10. Мягкая И.Н., Лазарева Е.В., **Сарыг-оол Б.Ю.**, Густайтис М.А., Жмодик С.М. Торий, уран и золото в потоке рассеяния Урского хвостохранилища // Материалы V международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». – Томск, 2016. – С. 452–456.

11. Мягкая И.Н., **Сарыг-оол Б.Ю.**, Кириченко И.С., Густайтис М.А., Лазарева Е.В., Жмодик С.М. Формы концентрирования золота в торфяном веществе из кислого дренажного раствора // Материалы XV Международного совещания по геологии россыпей и месторождений кор выветривания (РКВ–2015) «Россыпи и месторождения кор выветривания: изучение, освоение, экология». – Пермь, 2015. – С.165-166.



Рис. 1. Схема и фотография Google Earth Урского хвостохранилища [Мягкая, 2013; Myagkaya et al., 2016a]. Условные обозначения: 1 – лесная зона; 2 – жилые кварталы; 3 – затопленный карьер; 4 – породный отвал; 5 и 6 – хвостохранилище (5 – отходы первичных руд; 6 – отходы руд зоны окисления); 7 – ближняя зона потока рассеяния, представленная снесенным материалом отходов первичных руд; 8 – ближняя зона потока рассеяния, представленная снесенным материалом отходов руд зоны окисления; 9-12 – средняя зона потока рассеяния (аналогично 7 и 8); 13 – заболоченная часть потока рассеяния; 14 – главный поток кислого дренажного ручья; 14 – техногенный пруд; 16 – наиболее удаленная зона потока рассеяния; 17 – дорога; 18 – переслаивание отходов первичных руд и отходов руд области окисления; 19 – условная граница, делящая поток рассеяния на зоны; 20 – точки отбора колонок.

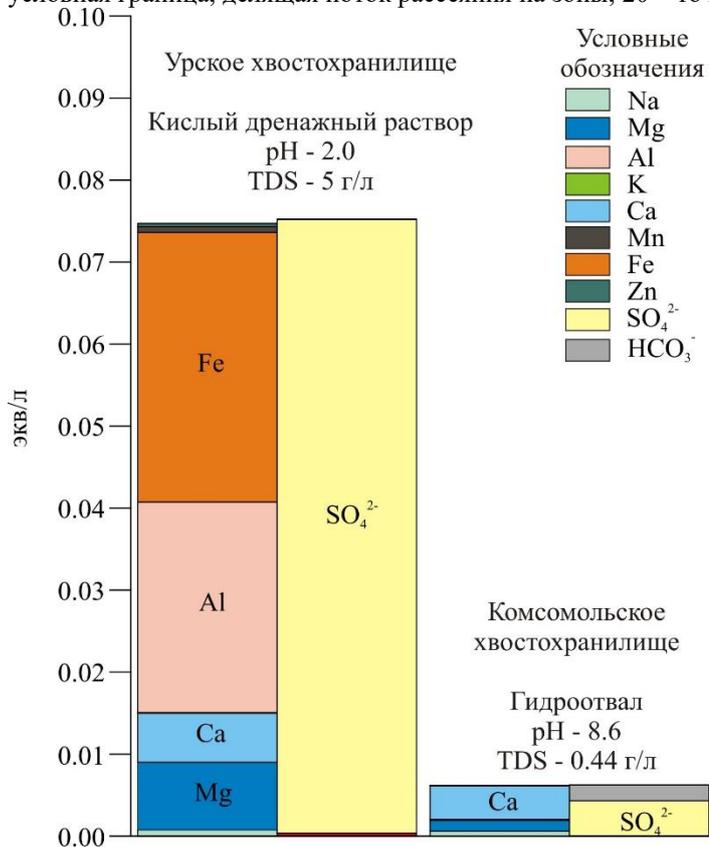


Рис. 2. Основной ионный состав техногенных растворов Урского и Комсомольского хвостохранилищ.

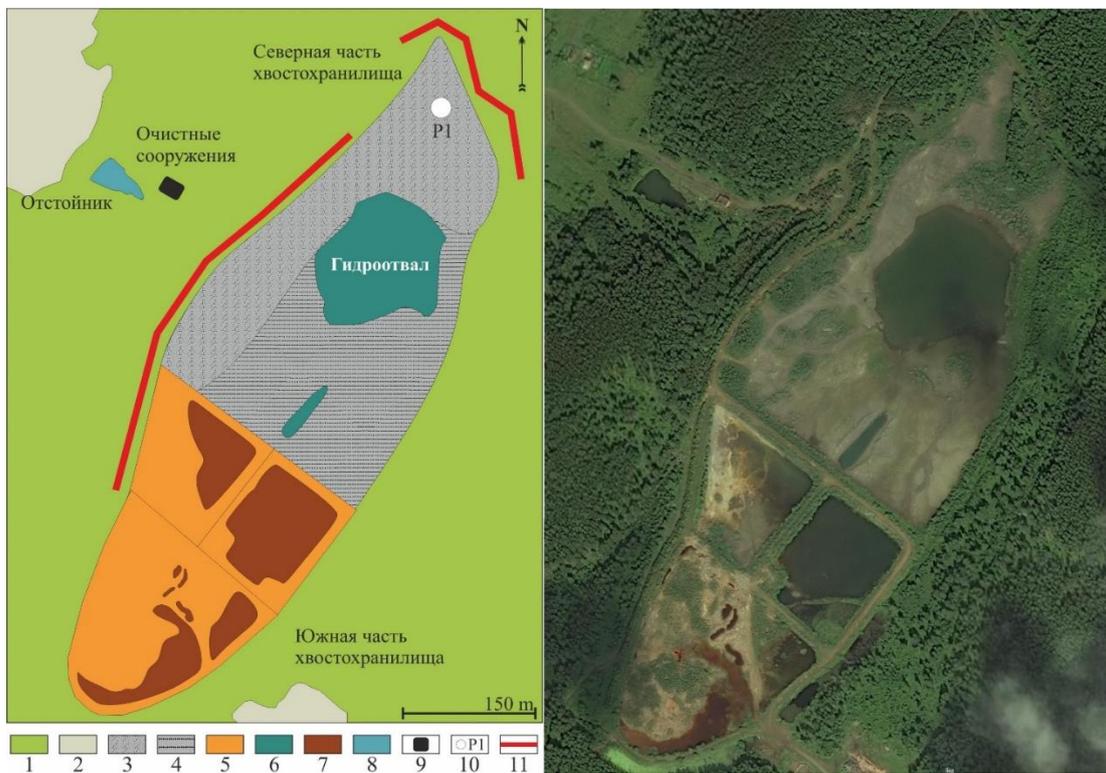


Рис. 3. Схема и фотография Яндекс.Карты Комсомольского хвостохранилища. Условные обозначения: 1 – лесная зона, 2 – жилые кварталы, 3-4 – часть хвостохранилища, складированная отходами цианирования Комсомольского золото-извлекающего завода и штейнами осадительной плавки сурьмяного концентрата Кадамжайского комбината (3 – с преобладанием песчаного материала, 4 – с преобладанием илистого материала), 5 – часть хвостохранилища, где поверх складированы кеки цианирования Бериккульского золото-извлекающего завода, 6 – гидроотвал, 7 – техногенные пруды, 8 – отстойник, 9 – очистные сооружения, 10 – точка отбора разреза, 11 – дамба.

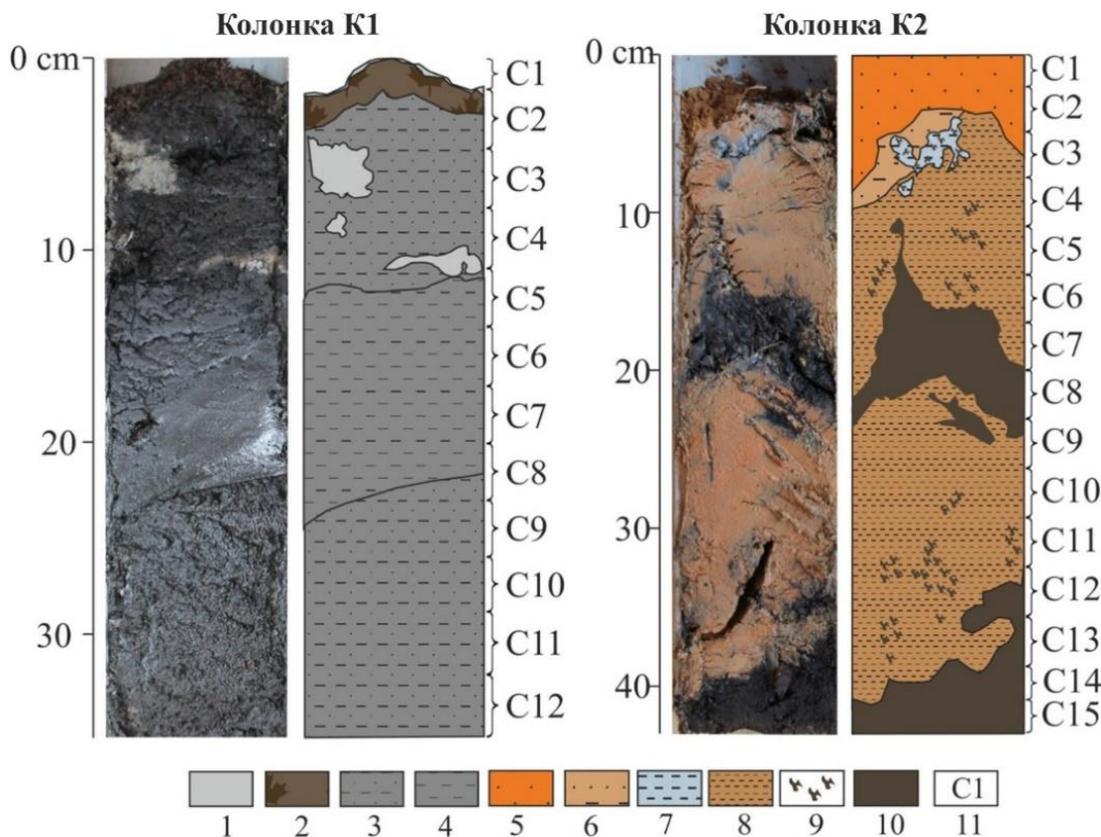


Рис. 4. Колонка 1 (К1) из области потока рассеяния, покрытой отходами обогащения первичных руд, и Колонка 2 (К2) из области потока рассеяния, покрытой отходами обогащения руд зоны окисления, Урского хвостохранилища. Условные обозначения: 1 – отходы первичных руд; 2 – органическое вещество с остатками растительности; 3- илистый материал, обогащенный органическим веществом; 4 – песчано-илистый материал, обогащенный органическим веществом; 5 – песчаный материал снесенных отходов руд зоны окисления; 6 – песчано-илистый материал, пропитанный гидроксидами Fe(III); 7 – илистый материал; 8 – илистый материал, пропитанный гидроксидами Fe(III); 9 – вкрапления торфяного вещества; 10 – прослой торфяного вещества; 11 – номера слоев колонки (C1-C12 в К1 и C1-C15 в К2).

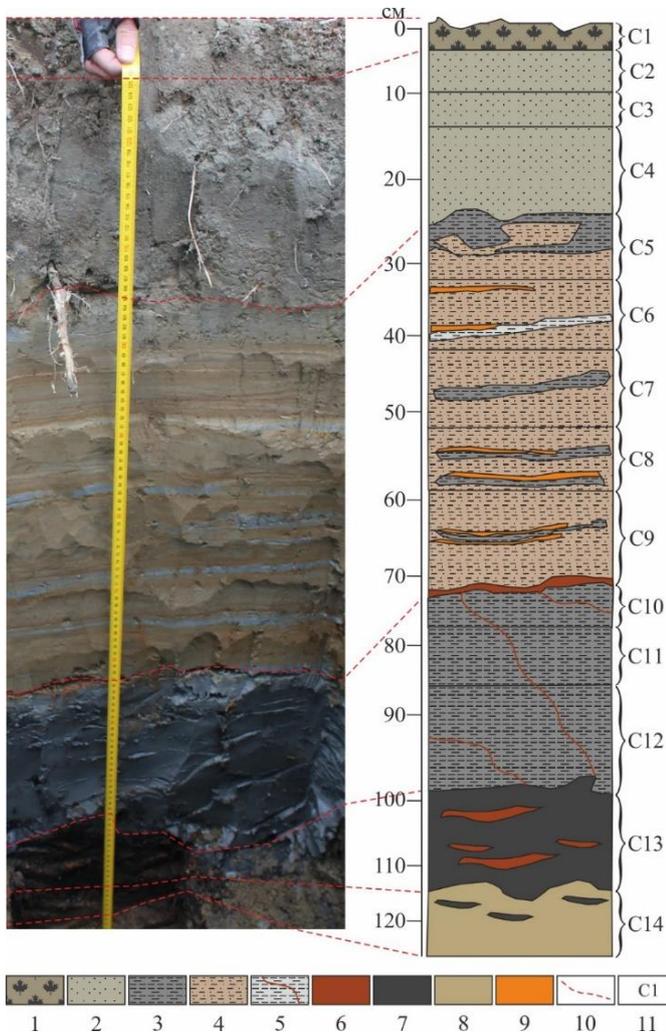


Рис. 5. Вертикальный разрез (P1) из Комсомольского хвостохранилища: 1 – почва, поросшая травой и мхом с песчаной фракцией отходов; 2 – песчаный материал отходов с небольшим количеством корешков и растительных остатков; 3 – илистый материал отходов; 4 – слоистый песчано-илистый материал отходов с линзами илистого материала; 5 – илистый материал отходов с мельчайшими прослоями гидроксидов Fe(III); 6 – прослой гидроксидов Fe(III); 7 – обогащенный органическим веществом материал с крупными растительными остатками, небольшим количеством отходов и линзами гидроксидов Fe(III); 8 – почва с растительными останками и вкраплениями вышележащего слоя; 9 – линзы гравитационного обогащения; 10 – граница, делящая преобладающие горизонты в пределах разреза; 11 – выделенные горизонты, более подробно.

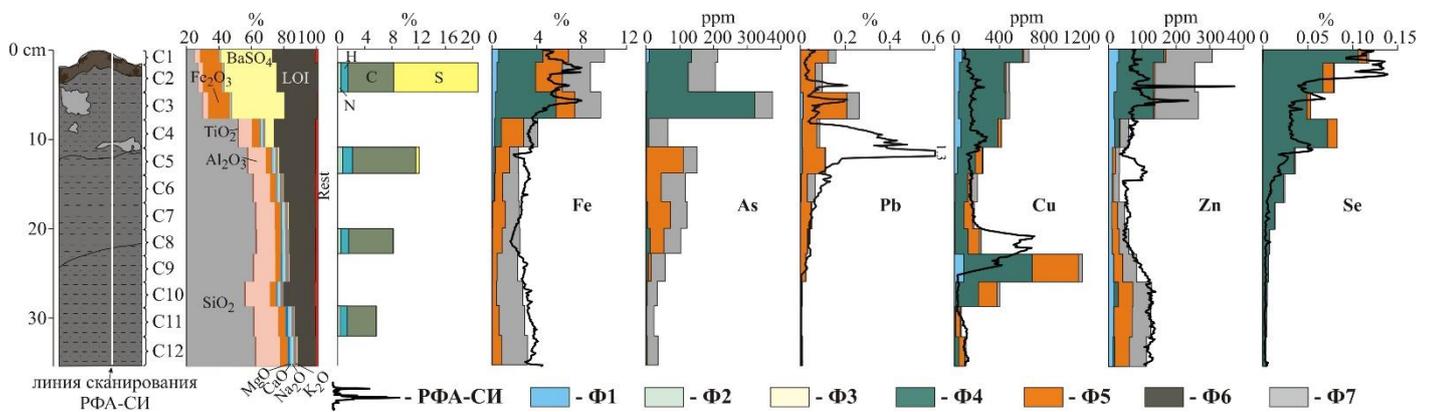


Рис. 6. Формы нахождения элементов в K1: условные обозначения смотрите в табл. 1.

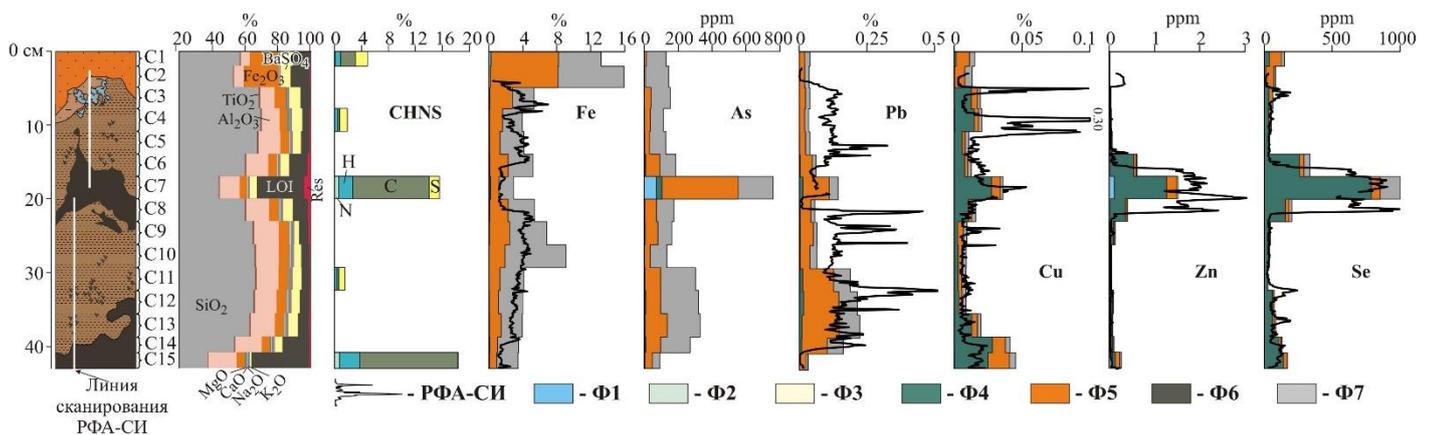


Рис. 7. Формы нахождения элементов в K2: условные обозначения смотрите в табл. 1.

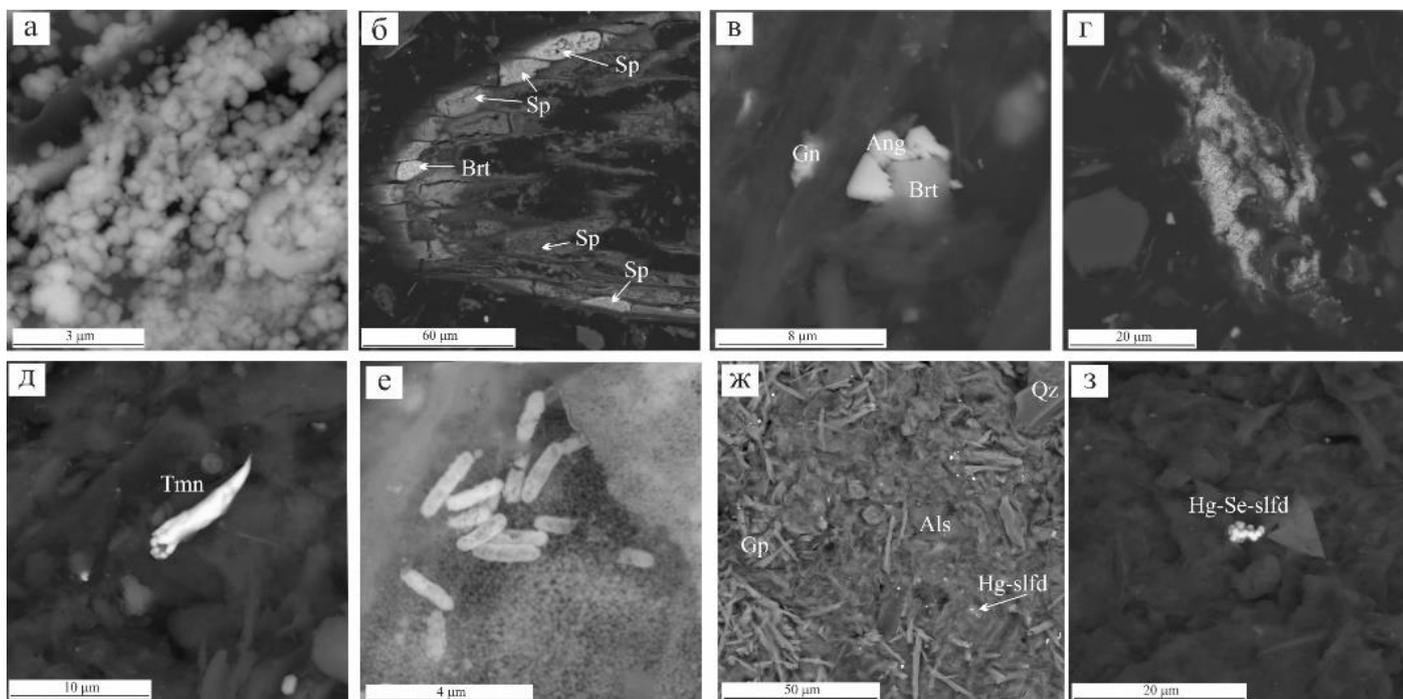


Рис. 8. Минералы в прослоях торфяного вещества К2: а – обособления сульфатов Zn в виде глобул (полированный аншлиф); б – сульфиды цинка (Sp) и барит (Brt) в пустотах органического остатка в полированном шлифе; в – галенит (Gn), англезит (Ang) и барит (Brt) в полости растительного остатка; г – совместное нахождение сульфидов Hg и Zn, представленных мелкозернистыми обособлениями (полированный аншлиф); д – полая трубочка тиманнита (Tmn); е – чехлы микроорганизмов, выполненные смесью сульфидов ртути и сульфидов цинка; ж – удлиненные индивиды гипса (Gp), створки диатомовых водорослей и сульфиды ртути (Hg-slfd) с кварцем (Qz) и алюмосиликатами (Als); з – глобулярные выделения селен-содержащего сульфида ртути (Hg-Se-slfd). Фото а-ж – горизонт 15-20 см; фото з – горизонт 39-40 см. Фото сканирующего микроскопа в режиме BSE.

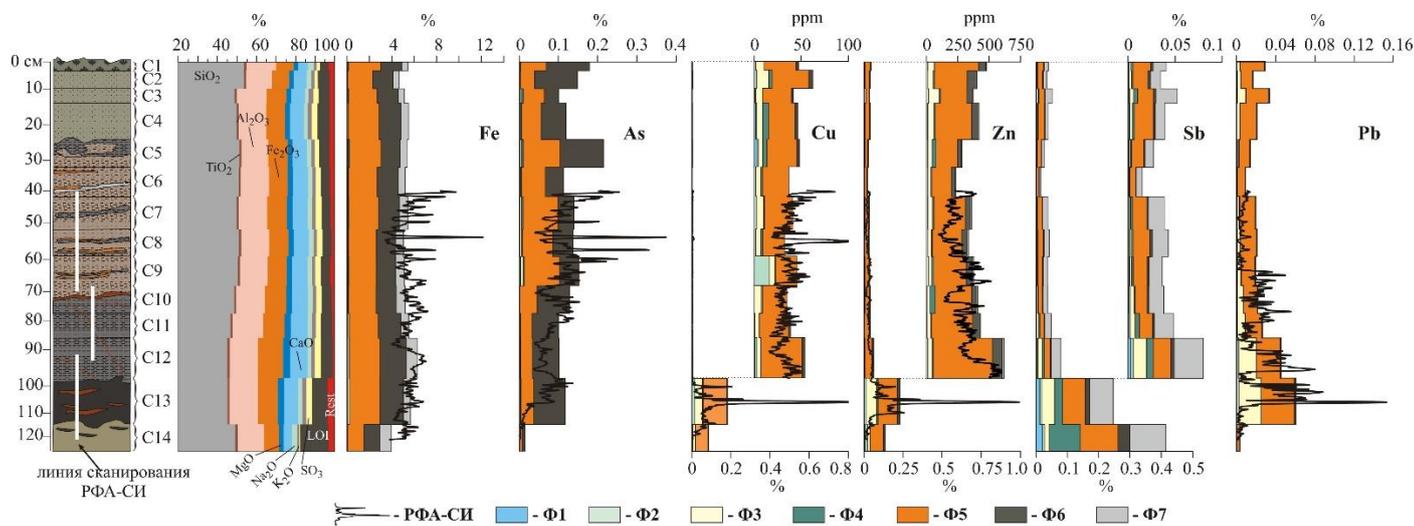


Рис. 9. Формы нахождения элементов в P1: условные обозначения смотрите в табл. 1.

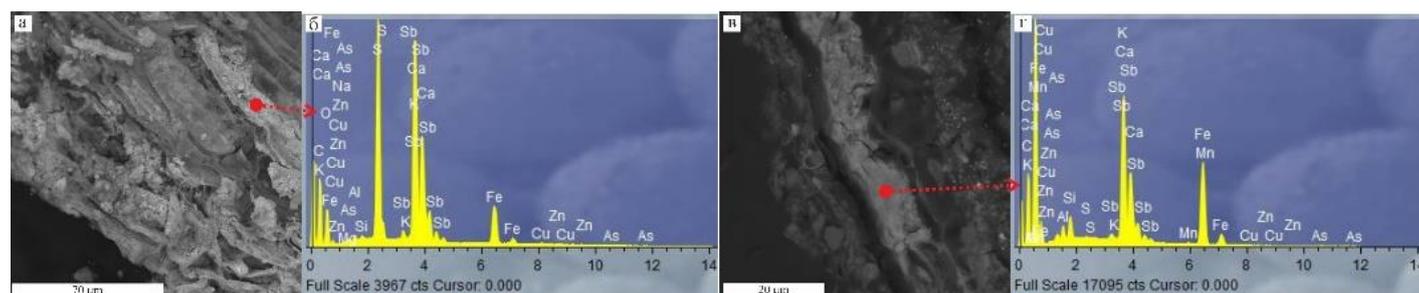


Рис. 10. Минералы в подстиляющем детритовом горизонте P1: а, в – сурьмяные фазы в тканях отмерших растений; б, г – энергодисперсионные спектры для участков в (а) и (в), отмеченных красной точкой.

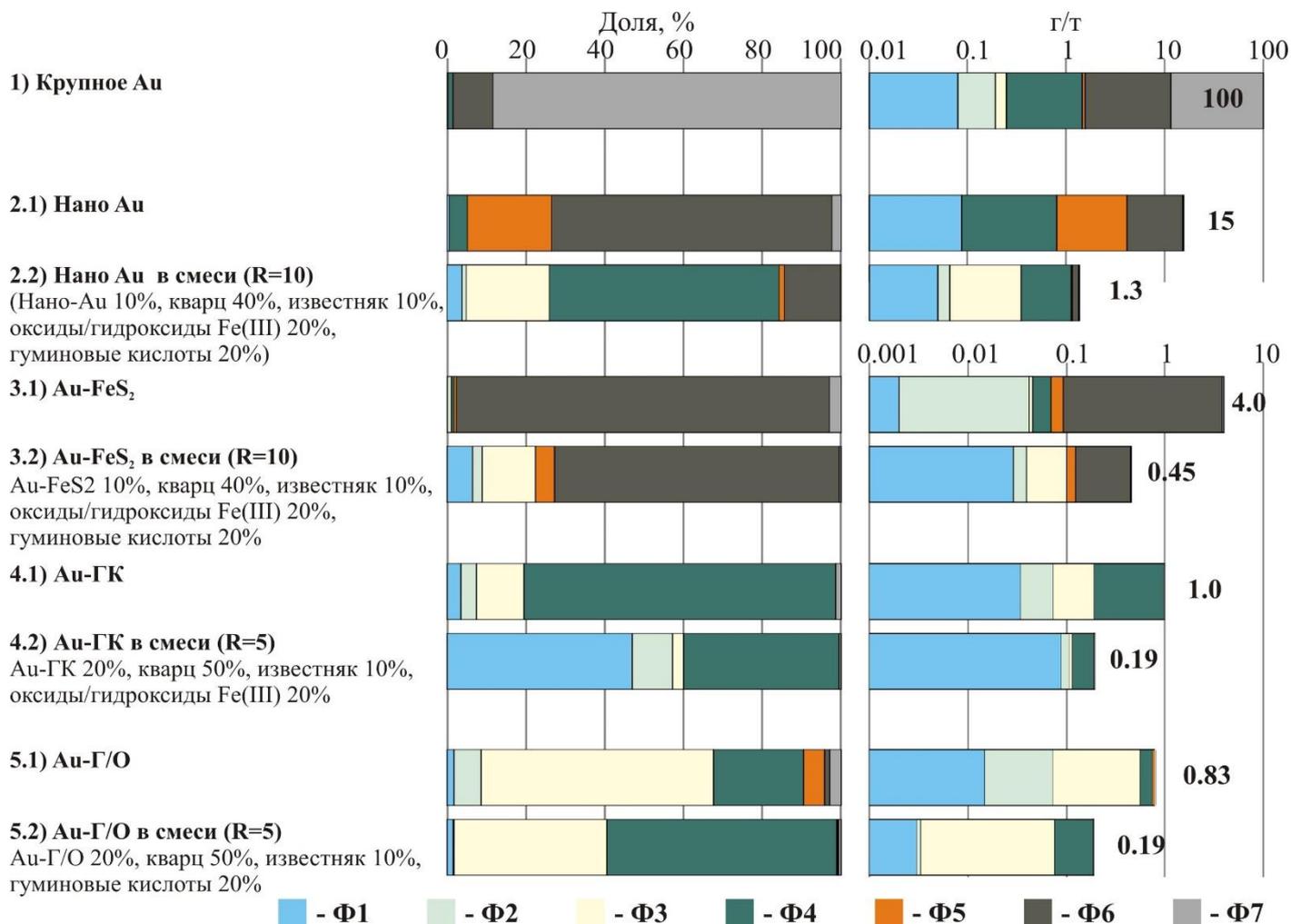


Рис. 11. Распределение золота в модельных веществах и в их смесях по фракциям ступенчатого выщелачивания: условные обозначения смотрите в табл. 1.

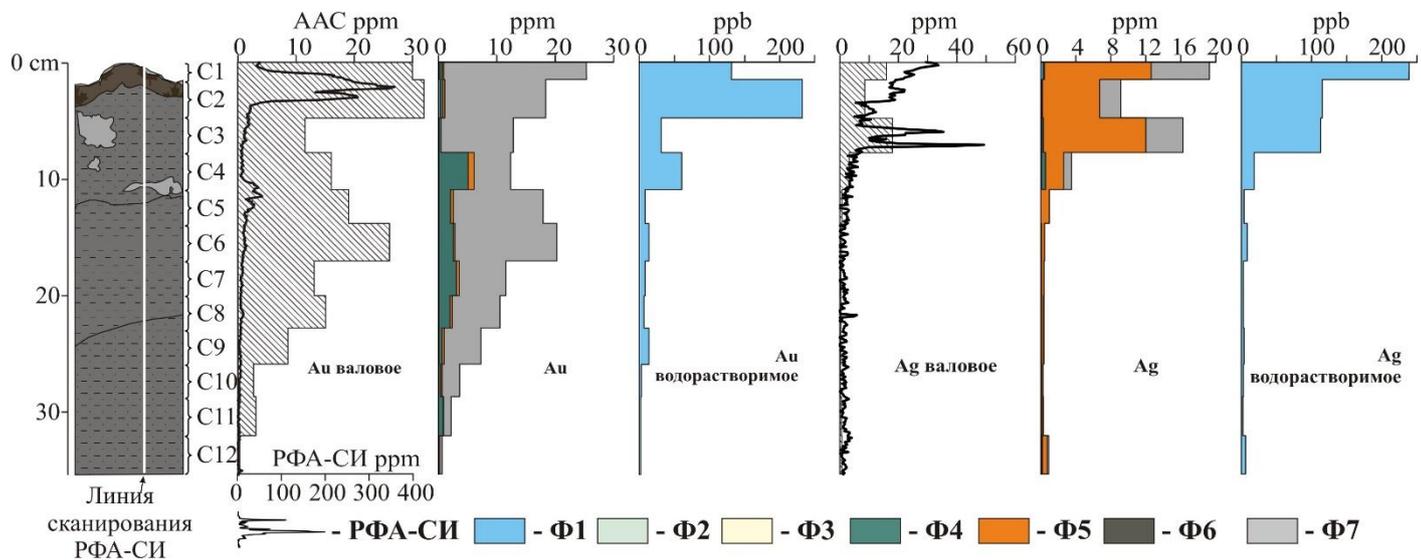


Рис. 12. Содержания и формы нахождения Au и Ag в K1: условные обозначения смотрите в табл. 1.

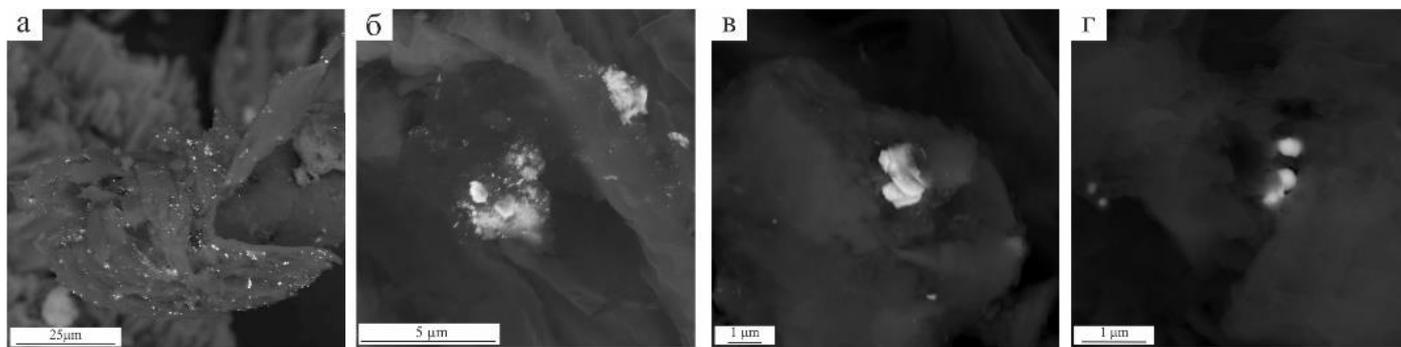


Рис. 13. Самородное Au в детритовом веществе K1: а – самородные выделения золота на растительном остатке; б – самородное золото, сложенное глобулами, внутри растительного остатка; в – пластинки самородного золота на поверхности растительного остатка; г – глобулы самородного золота внутри растительного остатка. Фото а-г – горизонт 1-4 см; фото д – горизонт 5-8 см. Фото сканирующего микроскопа в режиме BSE.

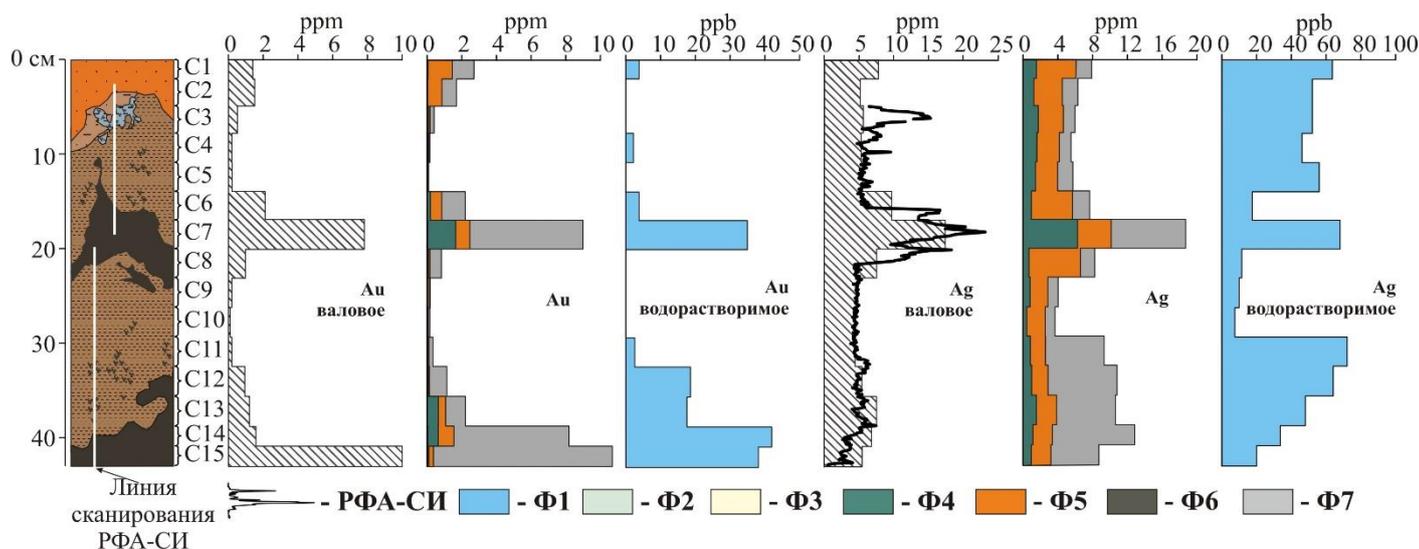


Рис. 14. Содержания и формы нахождения Au и Ag в K2: условные обозначения смотрите в табл. 1.

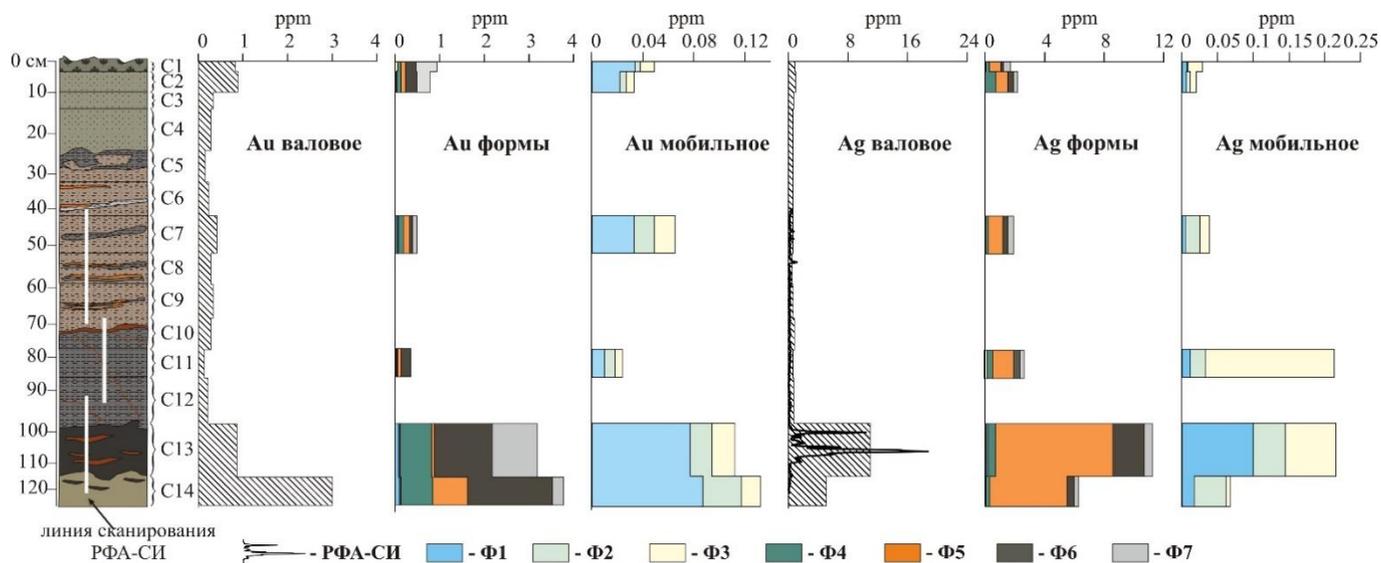


Рис. 15. Содержания и формы нахождения Au и Ag в P1: условные обозначения смотрите в табл. 1.