

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИГХ СО РАН
доктор геол.-мин. наук,
А.Б. Перепелов



«30» ноября 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Сарыг-оола Багай-оола Юрьевича

«Концентрирование и формы нахождения золота и сопутствующих элементов при взаимодействии сульфидсодержащих отходов обогащения с природным органическим веществом», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 – «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых»

Диссертационная работа Сарыг-оола Багай-оола Юрьевича «Концентрирование и формы нахождения золота и сопутствующих элементов при взаимодействии сульфидсодержащих отходов обогащения с природным органическим веществом» объемом 185 страниц состоит из «Введения», 7 глав, «Выводов» и списка литературы (377 наименований). Текст написан хорошим профессиональным языком, проиллюстрирован 25 рисунками (картой объектов исследования, колонками разрезов, схемами, фотографиями и микрофотографиями) 18 таблицами и 2 приложениями.

Актуальность темы и цели исследования.

Изучение форм нахождения (ФН) золота и сопутствующих элементов в сульфидсодержащих отходах обогащения – хвостохранилищах, выявление особенностей их концентрирования и взаимодействия с природным органическим веществом (ОВ) в гипергенных условиях, является темой крайне актуальной и в теоретическом, и в практическом отношении. Эти природно-техногенные системы, характеризующиеся высокой скоростью процессов и доступностью, служат хорошими модельными объектами для проведения фундаментальных научных исследований. Большим плюсом диссертационной работы является то, что ее автор Сарыг-оол Б.Ю., в отличие от авторов работ, которые были сосредоточены преимущественно на изучении поведения токсичных элементов, сосредоточился на исследовании трансформации различных форм Au при взаимодействии отходов обогащения и техногенных растворов с природным ОВ. Поставленные автором диссертации основные цели – установление закономерностей концентрирования и выявление ФН Au и сопутствующих элементов, возникших в результате взаимодействия сульфидсодержащих отходов обогащения с природным ОВ (торф, детрит) на примере Урского и Комсомольского сульфидсодержащих хвостохранилищ – успешно достигнуты.

Научная новизна и практическая значимость.

Предложена модифицированная 7-ступенчатая методика выщелачивания для изучения ФН Au и сопутствующих элементов в образцах природного и техногенного происхождения. Предложенная схема выглядит логично с точки зрения химических свойств различных форм элементов с одной стороны и свойств реагентов – с другой. При этом автором детализированы известные схемы применительно к конкретным объектам и добавлена фракция Ф6 трудноокисляемых сульфидов. По этой методике и с помощью применения модельных веществ с известными ФН элемента выявлены особенности распределения Au по фракциям 7-ступенчатой методики выщелачивания. Впервые для Ново-Урского и Комсомольского хвостохранилищ по этой методике были охарактеризованы ФН не только потенциально токсичных элементов, но что особенно важно, благородных металлов, Au и Ag.

В теоретическом отношении установленные закономерности могут быть использованы для объяснения природы процессов, приводящих к металлоносности углеродсодержащих пород, которые для многих орогенных месторождений золота являются вмещающими, а сама природно-техногенная система, сформированная на хвостохранилище, как модель раннего накопления разных элементов в процессе накопления отложений. В прикладном отношении проведенные диссертантом исследования могут успешно использоваться при создании систем рекультивации хвостохранилищ, что важно для сохранения окружающей среды. Не менее важны такие исследования и для создания технологий доизвлечения ценных компонентов, в первую очередь Au, из сульфидсодержащих отходов хвостохранилищ. Так на Урале, который является крупнейшей в мире провинцией по запасам попутного золота в колчеданных рудах, ежегодные потери этого металла в хвостах и пиритном концентрате достигают при обогащении 80%, превышая 12 т в год (Викентьев, 2015; Волков, Сидоров, 2017). Проблема извлечения такого Au крайне актуальна на сегодняшний день.

Фактический материал и методы исследований.

Диссертационная работа основана на значительном по объему представительном фактическом материале, собранном автором и его коллегами в полевые сезоны 2014 и 2016 гг. (колонки материала в потоке рассеяния Урского хвостохранилища, образцы сульфидсодержащих отходов обогащения Комсомольского хвостохранилища).

Для изучения геохимических и минералогических особенностей твердого вещества и вод применялся комплекс современных инструментальных методов анализа (ААС, РФА, элементный CHNS-анализ, ИСП-АЭС, ИСП-МС, ионная хроматография, СЭМ). Для выщелачивания сульфидсодержащих отходов обогащения использована методика ступенчатого выщелачивания.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в экспедиционных работах, самостоятельном проведении пробоподготовки всего отобранного фактического материала, выполнении комплекса минералого-геохимических исследований; обработки и интерпретации аналитических данных. Большое впечатление производят объемы и умелое, со знанием дела использование автором фондовой и опубликованной литературы по тематике исследования. Участие диссертанта в течение 10 лет в комплексных минералого-геохимических исследованиях, основанных на изучении представительного фактического материала, в экспериментальных и аналитических работах и его личный вклад в эти работы не вызывают сомнений. Обобщение фактического материала с имеющимся фондовым и опубликованным материалом способствовало получению достоверных, обоснованных и принципиально новых данных.

Основные результаты по теме диссертации докладывались на российских (Новосибирск, 2017; Иркутск, 2021) и международных научных конференциях как в России (Пермь, 2015; Томск, 2016, 2019, 2021; Новосибирск, 2016), так и за рубежом (Йокогама, 2016; Париж, 2017). Часть работ была выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 15-05-05362, 15-05-06950, 16-60108, РНФ 15-17-10011, интеграционных проектов СО РАН № 51, № 94. Результаты исследований опубликованы в 23 работах, включая 1 монографию, 11 статей в рецензируемых журналах, 11 материалов и тезисов конференций.

В первой главе дается литературный обзор по состоянию проблемы на сегодняшний день. Приводятся общие сведения по геохимии золота и его ФН, содержаниям в углеродистых породах, взаимодействию Au с ОВ. Подробно описаны состав и процессы, происходящие в хвостохранилищах. Глава интересна по содержанию, по объему материала широтой подхода к анализу имеющихся данных, что необычно для кандидатских диссертаций (377 наименований в списке литературы).

Замечания к первой главе.

1. п. 1.1. Заголовок «Общие сведения по геохимии золота и его формы нахождения в горных породах» не соответствует содержанию. Разве здесь речь идет о ФН Au в породах?

2. п. 1.1., стр. 13. «...золото находится в двух формах нахождения (ФН): видимые (крупные и наноразмерные минеральные виды) и «невидимые» (связанные с сульфидами, химически связанные и др.)». Разве к видимому золоту можно отнести наноразмерные минеральные виды? К видимому золоту относят такие его частицы, которые можно увидеть невооруженным взглядом. С сульфидами может быть связано не только «невидимое» золото, но и его самородные частицы (тонкодисперсные, микронные и наноразмерные).

3. п. 1.3. Тоже, что к п. 1.1. Хвостохранилища и что? В названии нужно было отразить содержимое этой главы, в которой описываются процессы преобразования продуктов отвальных отходов в хвостохранилищах.

4. стр. 25-26. «При отсутствии превентивных мер поступление тяжелых металлов в грунтовые и *природных* воды падает со временем незначительно». Разве грунтовые воды не относятся к природным? Наверное, речь шла о грунтовых и поверхностных водах?

5. п. 1.4. Тоже, что к п. 1.1 и 1.3. Описываются некоторые существующие методы изучения ФН. А в чем проблема? Они не применимы для природно-техногенных систем? Нужен ли этот пункт вообще? Тем более что методика ступенчатого выщелачивания, которая применяется для сульфидсодержащих отходов обогащения, дана в главе 3, пункт 3.3.

6. В конце главы следовало сформулировать основные цели работы исходя из представленных в литературном обзоре материалов и нерешенных в них вопросов (в частности, по конкретным объектам, которые изучал автор).

Во второй главе дается подробное описание объектов исследования – Урского и Комсомольского хвостохранилищ. Первое вмещает высокосульфидные отходы цианирования первичных и окисленных Cu-Zn колчеданных руд Ново-Урского месторождения, второе – заполнено отходами цианирования Au-арсенопирит кварцевых руд Комсомольского месторождения. Глава написана ясно, четко, хорошо иллюстрирована, таблицы информативны и даны в достаточном количестве.

Замечание ко второй главе.

Рис. 2.1. Изображена карта, на которой вообще нет никакого масштаба. На картах принято указывать хотя бы линейный масштаб.

В главе третьей подробно дается описание материала исследований. Колонки отбора проб показаны на рисунках и наглядно подтверждаются прекрасными фотографиями. Затем приводится подробная характеристика широкого спектра использованных в работе оптических и аналитических методов. Исследования выполнены на современных приборах в лабораториях ИГАБМ СО РАН (г. Якутск), ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), РЦ СПбГУ «Геомодель», Центра Изотопных Исследований ФГБУ «ВСЕГЕИ» и Института геологии и геохронологии докембрия РАН (г. Санкт-Петербург), ЦКП ДГИ ДВО РАН (г. Владивосток). В главе подробно и профессионально дано описание этих методов. При общей положительной оценке есть ряд вопросов и замечаний.

Вопросы и замечания к третьей главе.

1. Минералогические исследования проводились только методом СЭМ? Достаточно ли этого? Почему не использовались другие методы – оптический микроскоп, микрозонд, лазерная абляция?

2. За основу были взяты известные методы ступенчатого выщелачивания. Могут ли быть внесенные в них изменения основой для разработки нового метода извлечения элементов из сульфидсодержащих отходов обогащения, например для извлечения упорного золота?

3. На с. 48 и 91 отмечена положительная корреляция между содержанием Au и потерями при прокаливании. Как это совмещается с методикой ААС с предварительным обжигом при 650°C? Разве Au не теряется с органикой и летучими?

В главе четвертой представлены результаты исследования геохимических и минералогических особенностей материала хвостохранилищ. Дана подробная характеристика распределения элементов. Изучены минералы, связанные с прослоями ОВ,

описаны свойства водных вытяжек и поровых растворов. Глава наглядно дополнена таблицами, рисунками, графиками и микрофотографиями. Материал читается с большим интересом и заслуживает положительной оценки. Большая часть материала, приведенная в этой главе, является обоснованием первого защищаемого положения, сформулированного достаточно четко и ясно.

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.

Вопрос.

Почему в заголовке говорится о каком-то веществе «Геохимические и минералогические особенности вещества»? Наверное «Геохимические и минералогические особенности материала хвостохранилищ»?

В главе пятой приводятся результаты изучения ФН элементов по данным ступенчатого выщелачивания. Детально описаны ФН нерудных и рудных элементов (Ca, Na, Al, Fe, Mg, Cu, Pb, Zn, As, Ag, Se, Hg, Au) по колонкам 1 и 2 из потока рассеяния Урского хвостохранилища, по разрезу 1 Комсомольского хвостохранилища. Таблицы, рисунки и графики наглядно иллюстрируют материал. Приведен интересный и информативный материал, большая часть которого является обоснованием третьего защищаемого положения, сформулированного достаточно ясно и понятно.

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.

Существенных замечаний нет.

В главе шестой даны результаты модельных экспериментов, позволяющие установить особенности и закономерности в поведении крупного и наноразмерного самородного золота, «невидимого» золота в пирите и Au-содержащих гуминовых кислотах при ступенчатом выщелачивании образцов, содержащих сульфиды и ОВ. На основании материала этой главы сформулировано второе защищаемое положение.

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 %).

Хотелось бы подчеркнуть, что второе и третье защищаемые положения, где дается цифровой материал, смотрелись бы более убедительно, если бы были указаны не только максимальные, но и минимальные проценты Au во фракции, т.е. от...до..., а не просто ...до...

Глава седьмая посвящена обсуждению полученных результатов. Частично в ней повторяется материал по обобщению результатов п. 5.4 и п. 6.3 из глав 5 и 6.

Замечание или скорее пожелание на будущее. Логичнее было бы их объединить: – Глава 7 «Обсуждение и обобщение результатов».

Выводы. Приводится синтез результатов диссертационной работы. Недостатком является то, что выводы практически повторяют, только чуть подробнее, защищаемые положения.

Замечания.

1. стр.145. Вывод 1. Хотелось бы знать, по отношению к каким конкретно ПТЭ ОБ обладает осадительными свойствами? В реферате они указаны (Cu, Zn, As, Se, Sb, Pb). Здесь же: куда пропала фраза про благородные металлы (Au, Ag)?

2. стр.145. Вывод 2. Не мешало бы перечислить эти формы.

3. стр. 146. Выводы 4 и 5. Примененная в этой работе методика, по сравнению с традиционными, чем отличается? В чем ее преимущества?

В качестве пожелания. Диссертация только бы выиграла, если бы автор дал не выводы, а развернутое заключение, в котором были бы отражены все достоинства работы и тот большой интересный материал, который представлен к защите.

Несмотря на общую высокую положительную оценку работы в целом, имеется ряд существенных замечаний.

Основное замечание относится к главам 4-6.

1. Текст неудачно структурирован. Трудно понять какой материал, и к какому защищаемому положению относится. Обоснование первого защищаемого положения, кроме гл. 4, есть в гл. 2 и 3. Обоснование второго дается в гл. 6, а третьего – в гл. 4 и 5. Поэтому возникают трудности с оценкой защищаемых положений. Во Введении это необходимо было указать.

2. Полученные с помощью РФА-СИ-сканирования данные распределения элементов впечатляют, но хотелось бы также видеть статистический анализ и корреляционные связи между элементами. Без этого работа изобилует качественными характеристиками в ущерб обоснованной статистикой. Например, на с.72-73 «схожее распределение по разрезу...», «распределены равномерно...» (насколько?), «крайне неравномерное распределение...» (какой критерий?).

3. Трактовка «формы нахождения элемента» в данной работе весьма условна. Так, например, формы элементов трактуются как «легкоокисляемые» и «восстанавливаемые» даже для таких элементов с постоянной валентностью как K, Na, Mg, Ca и др. Ясно, что окислению или восстановлению подвергаются фракции, в которых они присутствуют, а не сами элементы, и в каких формах они присутствуют в этих фракциях – надо разбираться дополнительно. В некоторых случаях такие заключения делаются, но их надежность крайне низка. Например, на с.85 и 98 предполагается «вхождение свинца в качестве изоморфной примеси в минералы группы ярозита», но прямых доказательств этого не приводится. То же объяснение используется для Cu (с.86) и Ag (с.90), также бездоказательно. На с. 110 Pb уже трактуется как «примесь во вторичных соединениях Fe(III)», однако что это за соединения и где в них размещается Pb, остается неясным. Вероятно, более определенно можно говорить о форме Zn в виде сульфида (с.87), разлагающегося в легкоокисляемой фракции, а также Se в форме селенида (с.88), а в остаточной фракции – Au в форме частиц самородного металла (с.102). В принципе, это можно было установить не прибегая к процедуре выщелачивания. Другое дело, что получить количественные данные по распределению элемента в различных средах без применения методики последовательного выщелачивания крайне сложно.

4. Какой смысл в использовании так называемых модельных веществ, если результаты так сильно зависят от состава смесей, в которых они находятся (Рис.6.1)? А если реальные природные и техногенные смеси имеют другой состав? Перебирать можно бесконечно, а добиться соответствия – вряд ли. Так что, по нашему мнению, предлагаемый автором подход должен сопрягаться с методами диагностики минеральных форм, фазового и химического состояния изучаемого элемента (XRD, микроскопия, различные виды спектроскопии, параметры термовыхода элемента и др.). Следует иметь в виду, что окисляться или восстанавливаться под действием определенных реагентов могут совершенно разные ФН одного и того же элемента. Это наблюдал и сам автор – на с.127 он приходит к заключению, что «при ступенчатом выщелачивании наблюдается совместное извлечение нескольких форм золота в одной фракции».

Соответствие автореферата тексту диссертации. Автореферат информативен, его структура и содержание соответствуют в целом основным положениям диссертационной работы, но есть замечания.

1. В разделе «Апробация работы» хотелось бы увидеть названия конкретных мероприятий (с указанием городов и дат), на которых были доложены результаты по теме диссертации. Эту информацию можно почерпнуть, да и то с трудом, только из списка опубликованных работ.

2. В список работ по теме диссертации в подраздел «Статьи в рецензируемых журналах» под номером 8 почему-то попала работа, которая опубликована в сборнике материалов молодежной школы, проводимой в г. Миассе. Она должна находиться в подразделе «Материалы и тезисы конференций». В результате количество статей должно получиться 10, а материалов и тезисов конференций – 12. То же самое в диссертации.

3. Стр. 15, 4-й вывод. Автор относит к крупному золоту частицы >1 мкм. К крупному золоту обычно относят зерна размером ~70 мкм и более. В крайнем случае, можно было бы написать «...наноразмерное и, частично, более крупное (с размером частиц >1 мкм) Au⁰...».

В целом диссертационная работа Сарыг-оола Багай-оола Юрьевича производит хорошее впечатление широтой подхода, необычной для кандидатских диссертаций, использованием современных и информативных методов исследования и оценивается нами положительно. Часть замечаний носит технический характер, часть как пожелание на будущее.

Представленная диссертация работа выполнена на высоком профессиональном уровне, является законченным научно-квалификационным исследованием и отвечает критериям, установленным в пп. 9-11,13 и 14 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «Положение о присуждении ученых степеней» для ученой степени кандидата наук. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.6.4 – «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых», а ее автор – Сарыг-оол Багай-оол Юрьевич – несомненно, **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук.

Таусон Владимир Львович

докт. хим. наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией моделирования геохимических процессов № 28

Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН)

Адрес: 665033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а

vltauson@igc.irk.ru, т. 8 964 115 42 43

Я, Таусон Владимир Львович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

«28» ноября 2023 г.


Подпись Таусона В.Л.
ЗАВЕРЯЮ 28.11.2023
Зав. канцелярией
ИГХ СО РАН И.С. Филиппова



Кравцова Раиса Григорьевна

докт. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

лаборатории моделирования геохимических процессов № 28

Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН)

Адрес: 665033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а

kr@igc.irk.ru, т. 8 983 415 73 59

Я, Кравцова Раиса Григорьевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

«28» ноября 2023 г.


Подпись Кравцовой Р.С.
ЗАВЕРЯЮ 28.11.2023
Зав. канцелярией
ИГХ СО РАН И.С. Филиппова



Макшаков Артем Сергеевич
канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
лаборатории моделирования геохимических процессов № 28
Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН)
Адрес: 665033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а
artem_m@mail.ru, т. 8 924 637 67 38

Я, Макшаков Артем Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

«28» ноября 2023 г.

Мак
Подпись Макшаков А.С.
ЗАВЕРЯЮ 28.11.2023
Зав. канцелярией
ИГХ СО РАН И.В. Зильберва



Подписи д.г.-м.н. Кравцовой Раисы Григорьевны, д.г.-м.н. Кусона Владимира Львовича и к.г.-м.н. Макшакова Артема Сергеевича заверяю

Отзыв на диссертацию Сарыг-оола Багай-оола Юрьевича рассмотрен и одобрен в качестве официального отзыва на заседании Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН) (протокол № 8 от 30 ноября 2023 года).

Председатель Ученого совета ИГХ СО РАН
д.г.-м.н.



Ученый секретарь ИГХ СО РАН
к.х.н.

[Signature]
А.Б. Перепелов

[Signature]
И.Ю. Пархоменко