

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **Сарыг-Оол Багай-Оол Юрьевича**

«Концентрирование и формы нахождения золота и сопутствующих элементов при взаимодействии сульфидсодержащих отходов обогащения с природным органическим веществом», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 1.6.4 — Минералогия, кристаллография.

Геохимия, геохимические методы поиска полезных ископаемых.

Рассматриваемая диссертация касается аспектов взаимодействия минерального и органического вещества и выявления закономерностей накопления в гипергенных условиях благородных металлов, редких и рассеянных элементов. В качестве модельных объектов для исследования таких взаимодействий выбраны природно-техногенные системы складирования сульфидсодержащих отходов обогащения — Урское и Комсомольское хвостохранилища. Целью работы являлось установление закономерностей концентрирования и выявление форм нахождения золота и сопутствующих элементов, возникших в результате взаимодействия сульфидсодержащих отходов обогащения с природным органическим веществом (торфы).

К защите представлены следующие научные выводы.

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 кислорастворимой фракции.

Автором проанализирован материал из колонок, взятых на Урском (K1 и K2) и Комсомольском (P1) хвостохранилищах. Исследованные колонки сложены **вверху** илистыми отходами обогащения с примесью первичных (пирит, барит) и вторичных (англезит, ярозит) минералов, иногда с образованием линз гравитационного обогащения, а **внизу** тонкозернистым суглинком, обогащенным органическим веществом (ОВ, «торфяной» слой), кварцем, полевыми шпатами, гидрослюдами и каолинитом. Автором выявлены признаки миграции Fe, Pb, Zn, Cu, Hg, As, Se в составе водорастворимых соединений с сильной тенденцией концентрирования в ОВ. В K1 отмечается высокая концентрация потенциально токсичных элементов (ПТЭ) в верхних частях разреза. В основном это водорастворимые формы Fe, Cu, Zn, Pb. Показано, что с глубиной доля водорастворимых форм снижается и увеличивается доля легкоокисляемых форм Cu, Se, Hg. K2 расположена в обводненной части хвостохранилища. В этой колонке отмечается большое содержание сульфидов Zn, сульфидов и селенидов Hg, с примесью Ag, Cu, As, I. В торфяных прослоях установлен аутигенный барит, содержащий Sr. В этом разрезе доля водорастворимых форм Fe, Cu, As, Se, Hg, Pb незначительна, хотя их высокие содержания также отмечаются в поверхностных слоях, либо органических прослоях. Доля легкоокисляемых форм Fe, As, Pb здесь также мала. В разрезе P1 основное накопление Cu, Zn, Sb, Pb происходит в подстилающем почвенном слое. Разрез P1 характеризуется крайне малой долей водорастворимых форм ПТЭ, как и значительно меньшим содержанием легкоокисляемых форм. ПТЭ здесь представлены преимущественно восстанавливаемыми формами – вторичными соединениями Fe(III) с широким составом примесей.

Степень вторичного обогащения происходит в результате ступенчатого выщелачивания при варьировании условий от кислых до нейтрально-щелочных и в зависимости от окислительно-восстановительных свойств самих металлов и их соединений. В продуктах вторичного обогащения установлены новообразованные Sr-содержащий барит, галенит, сульфиды Zn, сульфиды и селениды Hg, англезит, Sb-As-S-соединения и гётит. Выявлены многочисленные микропсевдоморфозы сульфидов по клеткам микроорганизмов. Коэффициенты обогащения продуктивными элементами достигают 5–10, а для Zn – более 100. Извлечение этих элементов возможно в ходе

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%).

Автор, с помощью усовершенствованной методики ступенчатого выщелачивания, показал существенное различие в извлечении Au из различных форм его присутствия (нано-Au связанное с ОВ, Au связанное с сульфидами, и Au связанное с оксигидроксидами Fe). Отмечается, что существенное влияние на сорбцию Au в водорастворимых, ионообменных и кислорастворимых фракциях оказывают гуминовые кислоты. Установлено, что степень извлечения самородного Au при ступенчатом выщелачивании зависит от размеров его частиц: золотины микронных размеров концентрируются преимущественно в химически-нейтральной остаточной фракции, а химически-активные наноразмерные частицы (включения в сульфидах) – преимущественно в трудноокисляемой, частично в легкоокисляемой фракциях. Последнее объясняется образованием наноразмерным золотом ионизированных комплексов $AuCl_3(OH)^-$, которые позже могут восстанавливаться в среде гуминовых кислот с образованием более крупных и легче извлекаемых частиц самородного золота.

3. Сульфидосодержащие отходы, обогащенные ОВ, 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 Au_0 , до 96.7%). Ag аккумулируется в виде форм, извлекаемых в легкоокисляемую и восстанавливаемую фракции (54-86.6%), аналогично потенциально токсичным элементам.

Автором детально изучены формы нахождения и содержание Au и Ag в исследуемых разрезах хвостохранилищ. Установлено, что углеродистые сульфидосодержащие отходы обогащения являются потенциально продуктивными на золото из-за концентрирования в них именно химически-активных наноразмерных его форм с валовым содержанием Au от 0.3 до 10 г/т. В силу химической активности основная доля находящегося в хвостах золота способна переводиться в водорастворимые формы, мигрировать внутри колонок с переотложением в ОВ по крайней мере на 40–45 % и с перспективой последующего извлечения в сочетании с серебром.

В целом, судя по автореферату, диссертанту удалось достичь поставленной цели. Представленная к защите работа выглядит целостным и полноценным научным результатом, доказательства выдвинутых защищаемых положений выглядят

убедительными. Особенно подкупает значительный личный вклад диссертанта как в сборе материала, его обработке, так и в его обобщении. Сделанные нами замечания имеют смысл рекомендаций на будущее.

В качестве рекомендации можно посоветовать диссертанту более детально исследовать золотоконцентрирующее углеродное вещество, включая изучение его фазового состояния, органо-химического состава и изотопии в нем углерода и азота. Не исключено, что на уровнях тонких свойств это вещество в ходе перегруппировки благородных и цветных металлов может модифицироваться, обнаруживая еще неизвестные подробности исследованных диссертантом процессов.

Полученные диссертантом результаты достаточно полно и качественно опубликованы.

Таким образом, представленная к защите диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.6.4 — «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы поиска полезных ископаемых». А ее автор – **Сарыг-Оол Багай-Оол Юрьевич** – вполне заслуживает присвоения искомой ученой степени.

Научный сотрудник лаборатории петрографии
Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
кандидат г.–м. н.

Хазов Антон Федорович
akhazov@geo.komisc.ru

Главный научный сотрудник лаборатории петрографии
Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, доктор г.– м. н.

Силаев Валерий Иванович
silaev@geo.komisc.ru

Подпись удостоверяю.
Ведущий документовед
ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
«04» декабря 2023