

УТВЕРЖДАЮ:

И.о. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, доктор геол.-минер. наук
Реутский Вадим Николаевич



«11» сентября 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН)

Диссертация «Поведение золота в техногенно-минеральных образованиях месторождений золото-сульфидного типа» выполнена в лаборатории прогнозно-металлогенических исследований (№ 217) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук.

В период диссертации соискатель, Хусаинова Альфия Шамилевна, работала в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук в лаборатории прогнозно-металлогенических исследований (№ 217) в должности инженера, затем в должности младшего научного сотрудника в лаборатории структурной петрологии (№ 219).

В 2017 году А.Ш. Хусаинова окончила специалитет геологического факультета Пермского государственного университета (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет») по специальности «Прикладная геология». В 2020 году окончила очную аспирантуру Новосибирского государственного университета (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет») по специальности 25.00.11 «Геохимия, геохимические методы поисков» (диплом №105424 4014406 от 15.07.2020).

Научный руководитель – Калинин Юрий Александрович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований (№ 217) Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, доцент кафедры ПиГРМ Новосибирского государственного университета.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность исследований обусловлена необходимостью решения фундаментальной задачи рудной геологии и геохимии – выяснение условий, источников и механизмов формирования рудных концентраций металлов в экзогенных условиях на примере хвостохранилищ продуктов добычи и переработки разнообразных золотосодержащих руд, называемые *техногенно-минеральными образованиями* (ТМО). Их особенность заключается в том, что они являются аналогами природных систем, в которых все химические реакции происходят быстрее и в узко ограниченном пространстве [Наумов, 2010; Литвинцев и др., 2016; Kirillov et al., 2018; Wierchowicz et al., 2018; Кузнецова и др., 2019; Хусаинова и др., 2019, 2020]. Горизонты вторичного обогащения образуются за десятки – сотни лет, позволяя при этом рассматривать ТМО в качестве потенциальных (а зачастую и реальных) рудных объектов. Однако, вопрос о масштабах процессов растворения, переноса, перераспределения и образования «нового» золота остается дискуссионным [Петровская, 1973; Моисеенко, Палажченко, 2003; Калинин и др., 2006, 2009; Наумов, 2010; Reith et al., 2012; Николаева и др., 2015; Осовецкий, 2016; Shuster, Reith, 2018; Wierchowicz et al., 2018; Dunn et al., 2019]. Не до конца выяснены механизмы диспергации и укрупнения частиц Au, причины изменения пробности зерен, химизм и масштабы процессов растворения, переноса и отложения металлоносных комплексов Au, дальности их миграции в гипергенных условиях.

Цель работы заключается в определении основных минералого-геохимических характеристик, условий миграции и концентрирования золота в техногенно-минеральных образованиях месторождений золото-сульфидного типа.

Объектами исследования являются хвостохранилища переработанных руд колчеданно-полиметаллических месторождений (высокосульфидные): 1) Ново-Урское и Белоключевское (Северо-Восточный Салаир, Алтае-Саянская складчатая область (АССО), Россия); 2) Змеиногорское (Рудный Алтай, АССО, Россия). Кроме того, для сравнения золотоносности переработанных руд месторождений разных типов дополнительно изучались ТМО (низкосульфидные): 3) месторождения Тардан (Копто-Байсютский массив, АССО, Россия); 4) месторождений Акжал, Даубай, Яковлевское, Президент (Восточный Казахстан); 5) россыпей Чернореченская и бассейна рр. Ис и Тура (Урал, Россия).

Наиболее важные результаты, полученные соискателем:

1. В техногенно-минеральных образованиях сульфидного типа золото подвергается процессам растворения, миграции и осаждения. Происходит укрупнение золотинок, формирование наростов Au разных форм и размеров на поверхности самородных частиц и образование сростков Au с гипергенными минералами.

2. Специфика минеральных парагенезисов техногенно-минеральных образований (обилие пирита и выделений самородной серы) определяет условия миграции золота. В области метастабильной устойчивости FeS_2 , Au неизбежно осаждается на его поверхности при достижении пересыщения поровых вод ($\text{pH } 4$, $\text{AuHS}^0 > 0.01 \text{ мкг/л}$). При развитии процесса, в условиях образования $\text{S}_{(\text{эл})}$, происходит резкое увеличение миграционной способности золота за счет образования прочных тиосульфатных комплексов $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$.

(до 5 мг/л при pH 3). Именно их распад приводит в обильному переосаждению Au⁰ на окислительно-восстановительных барьерах в теле отвала.

3. Вне зависимости от типа складирования вещества, способа обогащения и размерности самородных частиц, в техногенно-минеральных образованиях золота активно подвергается поверхностным процессам преобразования, благодаря взаимодействию «вода-порода». В хвостохранилищах насыпного типа преобразование вещества происходит по аналогии с корами выветривания. При этом, главенствующими являются химические процессы преобразования золота, которые лучше проявляются при обилии сульфидных минералов и наличии ртути. Намывные ТМО близки к россыпным объектам, где определяющими являются механические процессы с незначительной трансформацией поверхности золотин.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации:

Автор принимал непосредственное участие на всех этапах работы: отбор и обогащение проб, пробоподготовка исходного вещества для аналитических исследований, подготовка материала и его изучение на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) (более 500 частиц), подготовка и создание полированных шашек с золотом для микрозондового анализа (МРСА) (более 100 частиц). Во время работы на СЭМ и МРСА, автор самостоятельно проводил изучение вещественного материала и анализировал полученные результаты. Помимо этого, автором проведен анализ и обобщение опубликованных и фондовых материалов по геохимии Au в гипергенных условиях, осуществлено сопоставление собственных полученных данных с материалами предыдущих исследований по изучению частиц самородного золота и его поведения в техногенных средах.

Степень достоверности и обоснованности результатов проведенных исследований. Научные положения и выводы диссертационной работы Хусаиновой А.Ш. являются достоверными и обоснованными. Достоверность предоставленных результатов исследований основывается на высоком научно-методическом уровне и представительности исходных данных, а также корректном использовании общепринятых методик и на глубокой проработке научной литературы и её широком использовании.

Основной объем аналитических исследований проводился в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (Новосибирск), а также в лаборатории ЛОПИ и секторе Наноминералогия ПГНИУ (Пермь). *Опробование* техногенных отложений осуществлялось по разным литологическим слоям (для насыпных отвалов) или вдоль профиля распространения вещества (для намывных отвалов), с объемом пробы не менее 10 л. каждая. Для каждой исходной пробы, методом квартования, отбирался дубликат для аналитических исследований. *Обогащение* осуществлялось гравитационным способом с помощью лотка или на установке «Мелкие-ценные минералы (МЦМ)» Пермского университета и винтовом шлюзе. В лабораторных условиях, полученный концентрат (черный шлик) доводился до суперконцентрата, с помощью домывки в бромформе (тяжелая жидкость) или воде. У полученной пробы отделялась магнитная и электромагнитная фракции и проводился ситовой анализ по классам: >1.0, 1.0-0.5, 0.5-0.25, 0.25-0.1, <0.1 мм. Проба, на наличие видимого золота, просматривалась под бинокулярным микроскопом (ЛОМО ХС1422).

Для *аналитических исследований* были использованы методы: а) атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) с использованием спектрометра 3030 В (Perkin-Elmer) и фотометра Solar М6 (Thermo Electron) для определения содержаний Au и Ag в исходных пробах (аналитик Ильина В.Н.); б) рентгено-флуоресцентного анализа (РФА) на спектрометре ARL-9900XP (Thermo Fisher Scientific Ltd) для определения элементного состава исходных проб (аналитик Карманова Н.Г.). Содержание благородных металлов в поровых растворах определялось методом масс-спектрометрического анализа с индуктивно-связанной плазмой (МС ИСП) в ХАЦ «Плазма» (Томск).

Исследования микроскульптуры поверхности золота и отдельных её участков осуществлялось с помощью *сканирующего электронного микроскопа* (СЭМ) TESCAN MIRA 3LMU (Tescan, Чехия) с энергетическим спектрометром OXFORD (Oxford Instruments, Великобритания) в режимах вторичных и обратно-рассеянных электронов при различных увеличениях (при ускоряющем напряжении электронного пучка 20 кВ) (аналитики Карманов Н.С., Хлестов М.В.) и на ED-спектрометре INCA ENERGY 350 (Oxford Instruments) на установке JSM 6390LV фирмы JEOL (аналитик Осовецкий Б.М.). Химический состав определялся методом локального микрорентгеноспектрального (*микрозондового*) анализа (МРСА) на установке Camebax micro (Камека, Франция), с ускоряющим напряжением 20 кВ, током зонда 70 нА (аналитик Хмельникова О.С.). Структурное травление золота проводилось по методике Н.В. Петровской [Петровская и др., 1980].

Термодинамическое моделирование проведено с помощью пакета программ «HCh 6.0» [Шваров, 2008], включающего базу термодинамических данных «UNITHERM», при 25°C и общем давлении 1 атм.

Научная новизна. Впервые изучены типоморфные характеристики золота (размер частиц, морфология, химический состав и внутреннее строение золота) из продуктов переработки руд Ново-Урского, Белоключевского и Змеиногорского месторождений. Выделены внешние и внутренние признаки, доказывающие, что золото, недоизвлеченное при промышленной добыче, подверглось существенным преобразованиям в техногенных отвалах. Предложена термодинамическая модель поведения золота в условиях разложения пород золото-сульфидного типа. Образующийся при этом горизонт вторичного обогащения, по условиям преобразования вещества, схож с горизонтом вторичного обогащения сульфидных руд в так называемых «железных шляпах» (по Крейтеру В.М.).

Практическая значимость работы соискателя. Показана и доказана перспективность ТМО месторождений золото-сульфидного типа на примере Ново-Урского, Белоключевского и Змеиногорского хвостохранилищ. Полученные типоморфные характеристики золота могут использоваться предприятиями для создания схем обогащения и извлечения металлов, а также для возможности управления процессами формирования зон с локальными (повышенными) концентрациями металла.

Соответствие результатов работы научной специальности. Представленная Хусаиновой Альфией Шамилевной диссертационная работа является законченной самостоятельной научной работой, содержащей ценные фактические данные и выводы. Работа, сделанная диссертантом, входит в область исследований, соответствующую формуле специальности 25.00.11 – «Геология, поиски и разведка твердых полезных

ископаемых, минерагения», а именно: пункту 2 – «Техногенные месторождения, перспективы их промышленного освоения».

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем. Результаты и материалы диссертации изложены А.Ш. Хусаиновой в научных публикациях и представлены на всероссийских и международных совещаниях и конференциях. Соискателем по теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК. Результаты исследований представлены в виде устных и стендовых докладов на 16 российских и международных конференциях.

Основные публикации соискателя, в которых опубликованы материалы диссертации:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Хусаинова А.Ш.,** Наумов В.А., Наумова О.Б. Дифференциация частиц золота из отвалов гравитационного обогащения руд Тарданского месторождения // Вестник Пермского государственного университета. Геология, 2019, Т. 18, № 3, с. 276-285. DOI: 10.17072/psu.geol.18.3.276
2. **Хусаинова А.Ш.,** Гаськова О.Л., Калинин Ю.А., Бортникова С.Б. Физико-химическая модель преобразования золота в продуктах переработки колчеданно-полиметаллических месторождений (Салаирский кряж, Россия) // Геология и геофизика, 2020, т. 61, № 9, с. 1181-1193. (DOI: 10.15372/GiG2020120).

Избранные тезисы докладов на конференциях и совещаниях:

1. **Хусаинова А.Ш.,** Кузнецова Е.А., Павлов А.В. Морфология техногенного золота Чернореченской россыпи // II Международной научно-практической конференции «Технологическая платформа. Твердые полезные ископаемые: технологические и экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений». Екатеринбург, 2015.
2. **Хусаинова А.Ш.** Некоторые факты и следствия техногеогенного рудогенеза золота // Материалы Шестой Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования». М.: ИГЕМ РАН, 2016, с. 377-380.
3. **Хусаинова А.Ш.** Признаки гипергенных преобразований в отвалах золоторудных и россыпных месторождений // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле: материалы конференции. ИГМ СО РАН, ИНГТ СО РАН. Новосибирск, 2018, с. 665-667.
4. **Хусаинова А.Ш.** Признаки гипергенного роста самородного золота в отвалах полиметаллических месторождений // Металлогения древних и современных океанов-2019: сборник конференции. Миасс: ИМин УрО РАН, 2019, с. 155-159.
5. **Alfiia Khusainova** Secondary gold structures: evidence of "new" gold's growth inside wastes of sulphide deposits // The material of 15th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Scotland, Glasgow, 2019.
6. **Хусаинова А.Ш.,** Калинин Ю.А., Гаськова О.Л. Условия преобразования золота в отвалах колчеданно-полиметаллических месторождений // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: мат-лы четвертой Всерос. конф. с международ. участием, Улан-Удэ, 2020, с. 270-273.

Диссертация «Поведение золота в техногенно-минеральных образованиях месторождений золото-сульфидного типа» Хусаиновой Альфии Шамилевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.11 – «геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения».

Заключение принято на расширенном заседании лабораторий прогнозно-металлогенических исследований (№ 217) и структурной петрологии (№ 219) ИГМ СО РАН. Присутствовало на заседании 22 человека (из них 13 докторов геолого-минералогических наук, 6 кандидатов геолого-минералогических наук, а также 3 младших научных сотрудников и студентов).

Заключение оформил:

*Сухоруков Василий Петрович,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
заведующий лабораторией прогнозно-
металлогенических исследований (№ 217)
ИГМ СО РАН*

