

Типоморфная характеристика золота из хвостохранилищ колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири

А.Ш. Хусаинова^{1*}, Ю.А. Калинин¹, О.Л. Гаськова¹, С.Б. Бортникова²

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

Долговременно складированные хвостохранилища обогащения руд колчеданно-полиметаллических месторождений представляют собой идеальную природную лабораторию, в которой можно исследовать трансформацию форм нахождения золота от первичных руд к гипергенным с наложенной антропогенной спецификой. На примере техногенно-минеральных образований (ТМО) Ново-Урского, Белоключевского и Змеиногорского месторождений (Западная Сибирь) изучены типоморфные характеристики самородного золота: гранулометрическое распределение и содержание Au, морфология, внутреннее строение и химический состав показывают особенности преобразования золота в процессах растворения, миграции и вторичного осаждения на геохимических барьерах.

В результате типоморфного анализа выделены внешние и внутренние признаки, доказывающие, что золото, недоизвлеченное при промышленной добыче, подверглось гипергенным преобразованиям непосредственно в теле техногенной насыпи. Наросты и скопления нано- и микроскопического золота, образование частиц агрегатного строения, слоистость, высокопробные частицы и прожилки, ажурные края, а также отсутствие физических повреждений на поверхности золотин, подтверждают активную подвижность золота в масштабах хвостохранилищ и подчеркивают сложный характер многостадийных процессов мобилизации золота.

Образование золота разного химического состава в ТМО объясняется специфическими физико-химическими условиями по разрезу насыпи складированных отходов, разными источниками первичного золота и геохимическими барьерами. $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_n^{(1-2n)}$ и $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ являются основными комплексами, ответственными за подвижность золота. Из тиосульфатных комплексов образуется золото низкой и средней пробности, тогда как из гидросульфидных – высокопробное золото.

Ключевые слова: гипергенное золото, типоморфные признаки, техногенно-минеральные образования

Для цитирования: Хусаинова А.Ш., Калинин Ю.А., Гаськова О.Л., Бортникова С.Б. (2021). Типоморфная характеристика золота из хвостохранилищ колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири. *Георесурсы*, 23(3), с. 149–163. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.18>

Введение

Преобладавшее долгие годы представление об ограниченности масштабов ремобилизации золота в экзогенных условиях в настоящее время претерпело полное изменение. Доказательством значительной подвижности золота в зоне гипергенеза может считаться наблюдаемое на ряде месторождений обогащение им тех или иных зон профиля выветривания (Freise, 1931; Петровская, 1973; Росляков, 1981; Hong, Tie, 2005; Калинин и др., 2006; Wierchowicz et al., 2018; Dunn et al., 2019; Kalinin et al., 2019 и др.). Явления активного перераспределения золота в экзогенных условиях также подтверждаются наблюдениями старателей и практикой отработки россыпей. В то же время, на целом ряде эксплуатируемых месторождений значимого золотого гипергенного обогащения не наблюдается, хотя локальное концентрирование отмечается практически повсюду.

Всё вышесказанное в полной мере относится к отвалам и хвостохранилищам – продуктам добычи и переработки разнообразных сульфидных руд (называемым часто *техногенно-минеральными образованиями* (ТМО) (Макаров, 2001; Наумов, 2010)).

Процессы растворения, миграции и роста золота, протекающие в зонах окисления сульфидных месторождений и в корах выветривания, являются аналогами процессов, протекающих в отвалах хвостохранилищ золоторудных и россыпных месторождений в приповерхностных условиях. Поведение золота в хвостохранилищах зависит от форм нахождения золота в породах, способа извлечения и складирования вещества (Ковлеков, 2002; Наумов, 2010; Литвинцев и др., 2016; Кузнецова и др., 2019). Биологические и химические процессы в комбинации с климатом и геологической обстановкой определяют физико-химические условия в среде и управляют процессами растворения, миграции и роста золота (Reith et al., 2012; Shuster, Reith, 2018; Dunn et al., 2019). Реальным отличием техногенно-минеральных образований от природных экзогенных обстановок является скорость протекания реакций и локализация на ограниченном пространстве. То, на что природа тратит миллионы лет, в техногенных отвалах протекает за десятки-сотни лет. При этом сформированные горизонты вторичного обогащения позволяют рассматривать ТМО в качестве потенциальных (а зачастую и реальных) рудных объектов.

При изучении условий подвижности Au и других элементов в различных экзогенных средах широко используются результаты экспериментальных исследований, термодинамических расчетов и непосредственное

* Ответственный автор: Альфия Шамилевна Хусаинова
e-mail: khusainova@igm.nsc.ru

© 2021 Коллектив авторов

изучение форм нахождения золота в поверхностных и рудничных водах в пределах золоторудных полей и месторождений (Плюснин, Погребняк, 1979; Росляков, 1981; Mann, 1984; Vlassopoulos, Wood, 1990; Шварцев, Дутова, 2001; Xia, 2008; Журавкова и др., 2019). Значительное число публикаций посвящено изучению типоморфных признаков золота и сопутствующих минеральных ассоциаций зон гипергенеза на различных месторождениях (Mann, 1984; Калинин и др., 2006; Хазов, Петровский, 2007; Банщикова и др., 2010; Fairbrother et al., 2012; Reith et al., 2012; Литвинцев и др., 2016; Shuster, Reith, 2018; Кузнецова и др., 2019; Хусаинова и др., 2019; Dunn et al., 2019; Хусаинова и др., 2020 и др.). Обзор обширной литературы по гипергенной геохимии золота показывает, что исследований, посвященных типоморфным особенностям самородного золота в отвалах и хвостохранилищах практически нет.

Целью данной работы является комплексное изучение типоморфных характеристик самородного золота для оценки степени их преобразования в процессе длительного хранения ТМО отработки руд колчеданно-полиметаллических месторождений. Для этого решались следующие задачи: 1) сравнить и проследить эволюцию индикаторных характеристик золота в системе «коренной источник – зона окисления – ТМО»; 2) выделить признаки, доказывающие процессы преобразования золота в гипергенной среде ТМО.

Методика исследований

В основу работы положены материалы, отобранные в ходе полевых исследований 2015–2019 гг. сотрудниками лаборатории Прогнозно-металлогенических исследований ИГМ СО РАН.

Объекты исследования – это насыпи переработанных руд, складированные на специальной отведенной территории (хвостохранилище). Объем каждой пробы составлял не менее 10 л. В лаборатории вещество обогащалось гравитационным методом с помощью лотка. Полученный концентрат («черный шлик») доводился до «суперконцентрата», с помощью его домывки в чашечке в воде. Для удобства просмотра пробы под бинокулярным микроскопом (ЛОМО ХС1422) у «суперконцентрата» отделялась магнитная и электромагнитная фракции, и проводился ситовый анализ по классам: >1.0 , $1.0-0.5$, $0.5-0.25$, $0.25-0.1$, <0.1 мм.

Пробы из техногенных отложений Змеиногорского хвостохранилища представлены опытно-производственным участком пробоподготовки ИГМ СО РАН (Бондаренко В.П.). Образцы первичных и окисленных руд отобраны авторами непосредственно на карьере месторождения.

Основной объем аналитических исследований проводился в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Содержание Au и Ag определялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) с использованием спектрометра 3030 В (фирма Perkin-Elmer) и фотометра Solar М6 (фирма Thermo Electron) (аналитик Ильина В.Н.).

При изучении самородного золота выявлялись специфические морфологические особенности, количественно оценивались признаки преобразования:

характер поверхности, наличие сростков и пленок. При описании золота авторы опирались на классические труды (Петровская, 1973; Николаева, Яблокова, 2007; Осовецкий, 2012, 2013; Николаева и др., 2015). Исследование осуществлялось с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «TESCAN MIRA 3LMU» (Чехия) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Ltd) (аналитики Карманов Н.С., Хлестов М.В.) и электронно-зондового микроанализатора Camebax micro (Франция), с ускоряющим напряжением 20Кv, током зонда 70na (аналитик Хмельникова О.С.).

Объекты исследования

К объектам исследования относятся хвостохранилища продуктов переработки руд месторождений Урского рудного поля (Ново-Урское (рис. 1а) и Белоключевское (рис. 1б) (Салаир)) и хвостохранилище золото-извлекательной фабрики (ЗИФ) Змеиногорского месторождения (рис. 1с) (Рудный Алтай). Месторождения относятся к колчеданно-полиметаллическому типу с хорошо развитой зоной окисления.

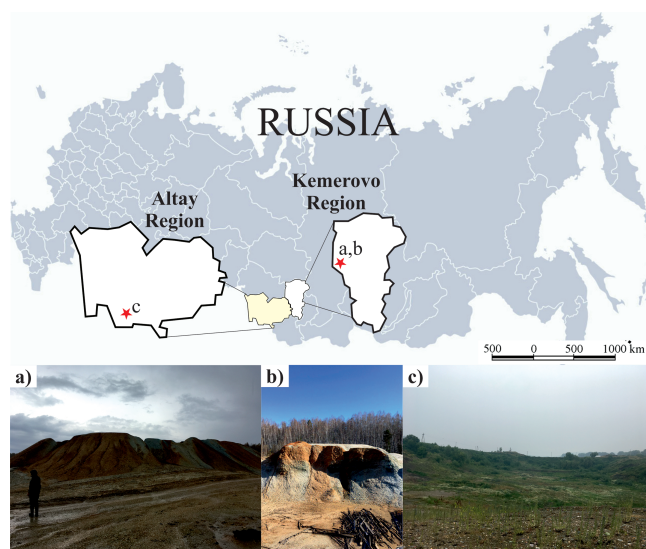


Рис. 1. Географическое расположение объектов исследования (обозначено звездочкой) и общий вид хвостохранилищ: а) Ново-Урское; б) Белоключевское; в) Змеиногорское

Хвостохранилища Урского рудного поля

Зона окисления Ново-Урского и Белоключевского месторождений обрабатывалась на Au и Ag в начале 1930-х гг. с помощью цианидных растворов.

Месторождения (геологическое строение, морфология и вещественный состав рудных тел, последовательность минералообразования) описывались многими исследователями. Известно, что эндогенное золото находится в самородном и связанном виде в сульфидах (Болгов, 1937; Черепнин, 1957; Дистанов, 1977) и в маломощных кварцевых жилах. Его размеры не превышают 0.015 мм. Золото отмечено в ассоциации с халькопиритом, пиритом и блеклыми рудами (Зеркалов, 1962; Ковалев, 1969), с аргентитом в кварце (Черепнин, 1953). Содержание Au в пирите составляет 5.8 г/т (Рослякова и др., 1983). В пирите присутствуют включения других рудных минералов: галенита, халькопирита, борнита, арсенопирита, сфалерита, теннантита, алтаита, геффрита и теллурида ртути.

В барите установлены включения науманнита и селенида Hg со значительными примесями Ag и S (Gustaytis et al., 2018). Кроме того, в пирите обнаружено металлическое золото (910 ‰) с примесями Cu (28.6 мас. %) и Ag (61.4 мас. %) (Myagkaya et al., 2020). Незначительно развиты теллуриды Au и Ag – алтаит и гессит (Дистанов, 1977).

В результате формирования зоны окисления золото высвобождалось, образуя самородные выделения, при этом относительно первичных руд происходило обогащение Au в 7–20 раз, Ag в 5–7 раз и As в 2–3 раза (Болгов, 1937; Дербигов, 1937). Зона окисления характеризуется высоким содержанием Hg, проявленной как в самородном виде, так и в виде киновари. Источником ртути является блеклая руда и сфалерит (Ковалев, 1969), а также теллуриды и селениды ртути.

Современные хвостохранилища Ново-Урского и Белоключевского месторождений представлены насыпями высотой 10–12 м. В техногенных отложениях содержание Au варьирует от 0.13 до 1.2 г/т; Ag – 0.72–31 г/т. Из минералов преобладают пирит, барит и кварц, также присутствуют ярозит, гипс, гетит, меньше мусковит, альбит, хлорит и микроклин. Протекающие на территории хвостохранилища ручьи имеют следующий состав: воды – соленые (TDS до 4,8 г/л), сильноокислые (pH 1.8–2.7, Eh 665–760 мВ), сульфатные, Al-Fe-Са и содержат 2.5 мг/л Cu, 11 мг/л Zn, 110 мкг/л Pb, 630 мкг/л As, 440 мкг/л Se, 28 мкг/л Te, 11.4 мкг/л Hg и 18 мкг/л Cd (Оленченко и др., 2016; Myagkaya et al., 2016a, b; Юркевич и др., 2017). Концентрации Au в дренажном ручье из-под отвалов варьируют в зависимости от сезона от 0.2 до 1.2 мкг/л; Ag – от 0.01 до 0.3 мкг/л. С удалением от отвалов в дренажном ручье увеличивается pH, а концентрации Au снижаются до 0.003 мкг/л, Ag – до 0.008 мкг/л (Мягкая и др., 2013).

Руды и ТМО Змеиногорского месторождения

«Отходы» Змеиногорской ЗИФ накапливались преимущественно в два этапа: с 1904 по 1917 гг. и с 1936 по 1956 гг. Сырьём являлись золотосодержащие роговики, первичные сульфидные и окисленные руды, в поздний период – отходы хвостохранилища. Извлечение на фабрике осуществлялось двумя способами: выделением гравитационного концентрата с последующей амальгамацией и цианированием в первый период и флотацией с амальгамацией – во второй.

Состав концентрата для переработки состоял из первичных руд, представленных пиритом, халькопиритом, борнитом, галенитом, золотом, серебром и окисленных руд, включающих азурит, малахит, церуссит, смитсонит, оксиды и гидроксиды Fe и Mn (рис. 2).

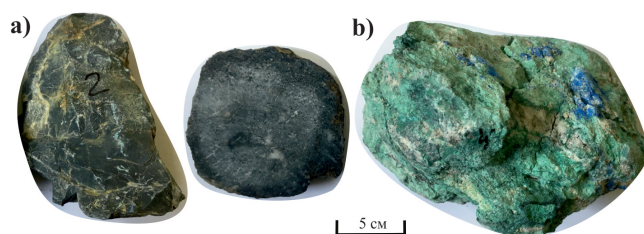


Рис. 2. Руды Змеиногорского месторождения: а) первичные (золотоносные роговики); б) окисленные

Крупное золото (до 2–3 мм) встречалось, в основном, в окисленных рудах. В первичных сульфидных рудах Au содержалось до 2.25 г/т, в окисленных рудах – 3.2 г/т, в золотосодержащих роговиках – до 3 г/т (Половникова, 2009). Отмечается, что накопленные «отходы» руды были неоднократно переработаны, причем последний раз относится к началу 2000-х годов.

Хвостохранилище Змеиногорской ЗИФ расположено в своеобразном «котловане», в аллювиальных отложениях первой надпойменной террасы р. Корбалиха. Как было сказано выше, после очередной отработки «отходов» хвостохранилища в 2000-х гг., насыпи стали невысокими (до 2 м), пологими и покрылись растительностью. Остаточное содержание золота в переработанных рудах достигает 0.87 г/т. Материал отвала состоит, преимущественно, из кварца (50%), слюды, плагиоклаза, барита, каолинита. Иногда встречается гематит, часто в виде псевдоморфоз по пириту. В шлихах, в небольших количествах отмечаются малахит, а также оксиды и гидроксиды Mn и Fe. Из рудных минералов отмечаются пирит, халькопирит, борнит, блеклая руда, золото.

Результаты

При изучении типоморфных характеристик золота особое внимание уделено следующим параметрам: содержанию Au в насыпи, размеру, форме и микроскульптурам поверхности частиц, химическому составу (пробности и элементам-примесям) и микроструктурам Au (внутреннему строению), которые представлены в сводных таблицах 1 и 2.

Хвостохранилища Ново-Урского и Белоключевского месторождений

В отвалах Ново-Урского месторождения преобладает золото мелкое, класс <0.25 мм (рис. 3а), в то время как в отвалах Белоключевского месторождения – >0.25 мм (рис. 3б).

По форме частиц встречаются золотины изометрического (49 %) (рис. 4а, е, h), вытянутого (40 %) (рис. 4 b-d, g, i), реже уплощенного облика (8 %) (рис. 4f).

Среди микроскульптур поверхностей золота можно выделить: 1) наросты Au нано- и микронного размера округлых, неправильных и чешуйчатых форм на поверхности самородных частиц золота и в ассоциации с гипергенными минералами в виде единичных или множественных скоплений (рис. 4d, f); 2) присутствие на поверхности частиц различных гипергенных новообразований: пленки и налеты (корочки) по составу близкие к Au-Ag-S-Se-Hg-фазам (рис. 4b, e); 3) сростки золота с зёрнами барита (рис. 4g), гидроксидов железа, халькопирита, кальцита и кварца (рис. 4b); 4) скульптуры растворения в виде выщелоченного рельефа (рис. 4 g-i). Для золота из Белоключевского хвостохранилища обнаружена микрослоистость.

Пробность, химический состав и внутреннее строение золота из ТМО Ново-Урского и Белоключевского месторождений имеют некоторые различия. Ново-Урские золотины имеют диапазон от низкопробного до весьма высокопробного состава с постоянным присутствием Hg и Ag, тогда как для Белоключевского месторождения встречается золото только средней пробности при полном отсутствии Hg. У части золотин этих двух объектов

Объекты	ТМО Ново-Урского месторождения	ТМО Белоключевского месторождения
Параметры		
Среднее содержание Au и Ag в насыпи	Au – 1.1 г/т Ag – 15 г/т	Au – 0.60 г/т Ag – 17 г/т
Морфология зерен самородного золота	1. Интерстициального и кристаллического облика; 2. Изометричной формы уплощенного облика; 3. Вытянутые таблитчатые формы.	
Микроскульптуры поверхностей зерен Au	1. Наросты Au нано- и микронного размера на поверхности самородных частиц и в ассоциации с гипергенными минералами; 2. Скульптуры роста и микрослоистость; 3. «Губчатые» формы; 4. Вторичная минерализация, в виде пленок (налетов, корочек, наростов), состав которых близок к петровскиту, тиманниту, колорадоиту и др.; 5. Включения минералов и парагенезисы с баритом, халькопиритом, кальцитом, кварцем.	1. Ступенчатые формы и микрослоистость; 2. Скульптуры растворения; 3. Ячеистый рельеф (скульптуры растворения), в углублениях которых отмечены новообразованные фазы. 4. Включения зерен барита.
Химический состав (микрондовый анализ)	1. Низкопробное золото: Au 643-794 ‰, Hg до 5 мас.%; Ag до 27 мас.%; 2. Среднепробное золото: Au 805-860 ‰, Hg до 3 мас.%; Ag до 17 мас.%; 3. Весьма высокопробное золото: Au – 973 ‰, Ag до 3 мас. %.	1. Среднепробное золото: Au – 847-899 ‰, Ag до 16 мас.%, Hg до 0.4 мас.%, Cu до 0.2 мас. %.
Внутреннее строение (микроструктуры Au)	1. Присутствие нано- и микро-наростов Au на границе с поверхностью самородной частицы; 2. «Губчатые» формы; 3. Включения зерен барита; 4. Уменьшение пробности от центра к краям.	1. Включения зерен барита; 2. Ажурные края; 3. Уменьшение пробности от центра к краям.

Табл. 1. Типоморфные характеристики золота из ТМО Урского рудного поля

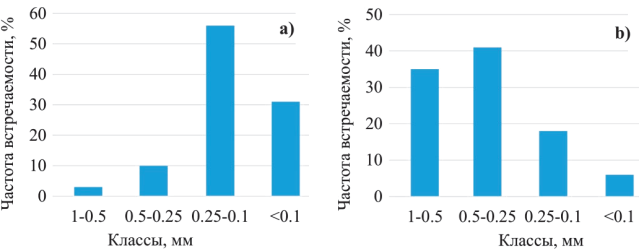


Рис. 3. Гранулометрическое распределение частиц золота по классам крупности (мм): а) Ново-Урское; б) Белоключевское

пробность Au закономерно уменьшается к краям. При этом, обнаружены «Ново-Урские» зерна, состоящие из нескольких составных частей, химический состав которых варьирует от низко- до весьма высокопробного золота. Для золотин обоих объектов отмечены включения барита, ажурные края и наросты Au.

Змеиногорское рудное поле

На Змеиногорском месторождении видимое самородное золото обнаружено в первичных и окисленных рудах и техногенных отложениях. Обратим внимание, что с помощью ААС нами определено высокое содержание золота в окисленных рудах, которое достигает 15 г/т (табл. 2). По сравнению с первичными рудами, среднее содержание серебра уменьшилось до 10 раз в техногенных отложениях. Это объясняется более высокой миграционной способностью серебра. При этом в отвале происходит значительное увеличение количества тонкого и мелкого золота, за счет его преимущественного осаждения и постепенного роста. Преобладающие классы 0.5–0.25 мм и <0.1 мм (рис. 5).

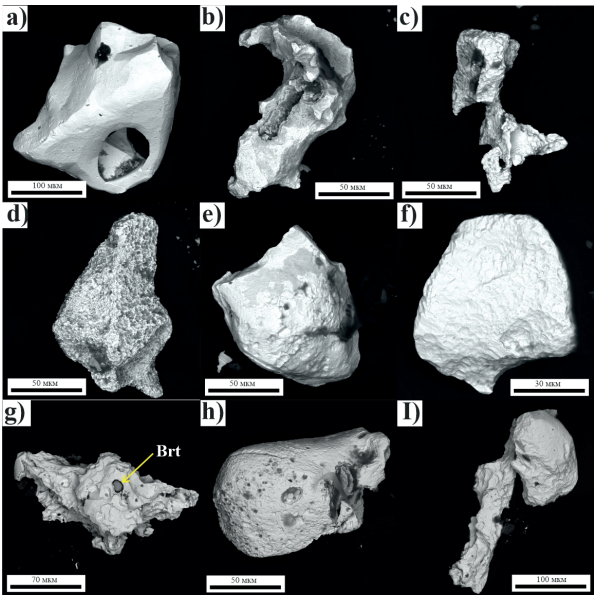


Рис. 4. Морфология индивидов золота из ТМО Урского рудного поля: а-ф) Ново-Урское месторождение: а) зерно кристаллического облика с гладкой поверхностью и дыркой; б) вытянутая частица кристаллического облика, покрытая пленкой Au-Ag-S-Se-Hg-состава (серого цвета); в) вытянутая золотина дендритного облика; д) частица кристаллического облика и наростами Au на её гранях; е) частица изометричной формы с корочкой тимманитового состава (HgSe) серого цвета; ф) уплощенная частица изометричной формы; г-и) отвал Белоключевского месторождения: г) массивная частица с гладкой поверхностью, раковистым изломом и включением барита (brt); h) массивная частица с ячеистым рельефом, в углублениях которых есть новообразования округлой формы; и) агрегат, состоящий из двух индивидов вытянутой и округлой форы

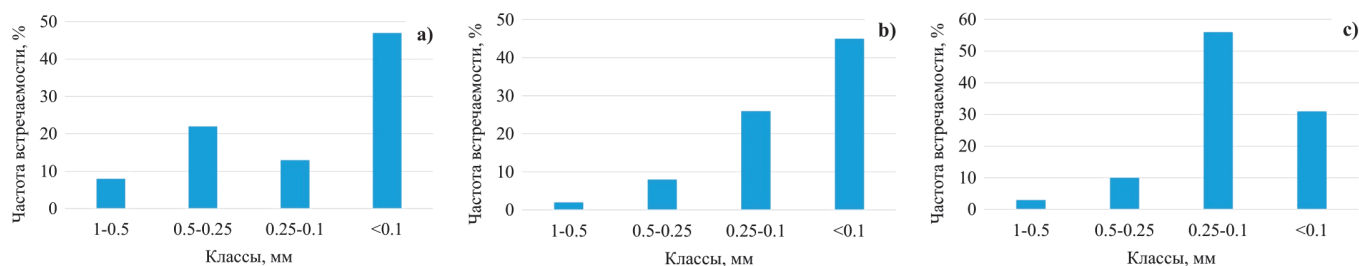


Рис. 5. Гранулометрическое распределение частиц золота по классам крупности (Змеиногорское месторождение): а) техногенные отложения; б) первичные; в) окисленные руды

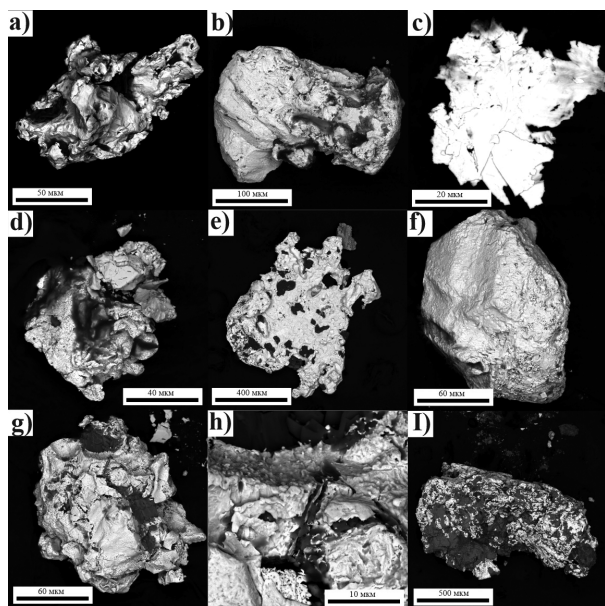


Рис. 6. Морфология индивидов золота Змеиногорского рудного поля: а-с) отложения ТМО: а) вытянутая частица комковидного облика; б) массивная золотина с преобразованной поверхностью и пленками в углублениях; в) уплотненные частицы Au пластинчатого облика; д-ф) первичные руды: д) массивная частица комковидного облика; е) уплотненная частица с ямчатой поверхностью; ф) зерно кристаллического облика с наростами Au на поверхности; г-и) окисленные руды: г) массивное зерно комковидного облика; h) ув. фрагмент и с выделениями губчатого золота; и) массивная частица в сростках с малахитом

изменение их пробности с 900 до 980 ‰.

Закономерности распределения серебра тоже отражаются в химическом составе частиц. Например, в хвостохранилище в золотилах с блоковым строением количество примесного Ag составляет около 30 %, в первичных рудах – более 50 %, в окисленных – менее 50 %.

Микроскульптуры роста и растворения частиц Au

Для золота из ТМО переработанных руд колчеданно-полиметаллических месторождений выделены следующие признаки, которые свидетельствуют о преобразовании золота. Среди элементов роста – это нано- и микрочастицы Au. Их образование является прямым доказательством мобильности золота в гипергенной среде (Осовецкий, 2012, 2013; Reith et al., 2012; Kirillov et al., 2018; Wierchowicz et al., 2018; Dunn et al., 2019). Новообразованные фазы золота на поверхности самородных частиц представлены в виде одиночных зерен и/или скоплений нано- и микронных размеров разных

морфологических форм (округлой, овальной, вытянутых форм). Они встречаются как на ровных, гладких поверхностях зерен, так и на возвышенностях рельефа и углублениях, неровностях. Часто их нахождение связано с вторичными минеральными ассоциациями (каолинит, гидроксиды Fe, барит) (рис. 7).

Рисунок 7е наглядно показывает, каким образом зерна различных минералов могут быть захвачены при росте золота. Для золота из Ново-Урского и Белоключевского хвостохранилищ включения барита внутри зерен Au – частая находка.

Другой пример, показывающий, как золото непосредственно растет в теле отвала, изображен на рис. 8, а именно, новообразованные фазы золота осаждаются в виде вытянутых (овальных) частиц и формируют «губчатые» образования, которые, в последующем, образуют более крупные частицы.

Кроме этого, «губчатость» может проявляться иначе на поверхности самородных частиц (рис. 9).

Следующий пример – элементы слоистости и штриховки на поверхности частиц, которые также свидетельствуют о послойном росте золота в условиях отвала (рис. 10). Визуальные мощности слоев <1 мкм. Элементы слоистости чаще всего обнаруживаются на частицах кристаллического облика.

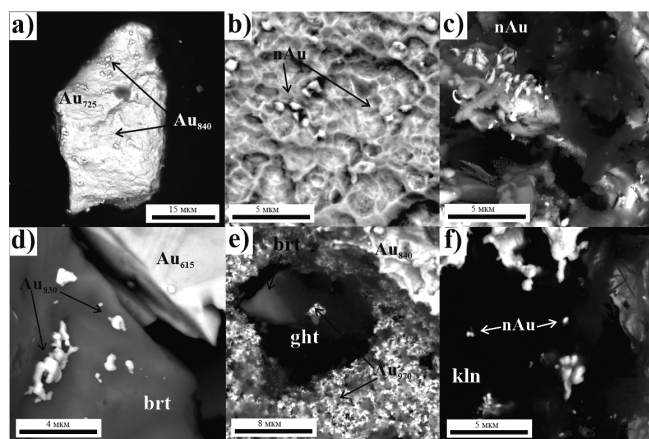


Рис. 7. Новообразованные фазы золота на различных поверхностях: а) нано- и микрочастицы Au округлой и вытянутой формы на гладкой поверхности золотины; б) наночастицы Au на выщелоченной поверхности золотины; в) вытянутые (денуритные) наночастицы в рыхлой пленке петровскита и гидроксидов Fe; д) нано- и микрочастицы Au на поверхности зерна барита (brt); е) наночастицы Au «губчатой» формы обрастают зерно барита (brt), который покрыт пленкой гидроксидов Fe (ght); ф) ассоциация нано- и микрочастиц Au в каолините (kln)

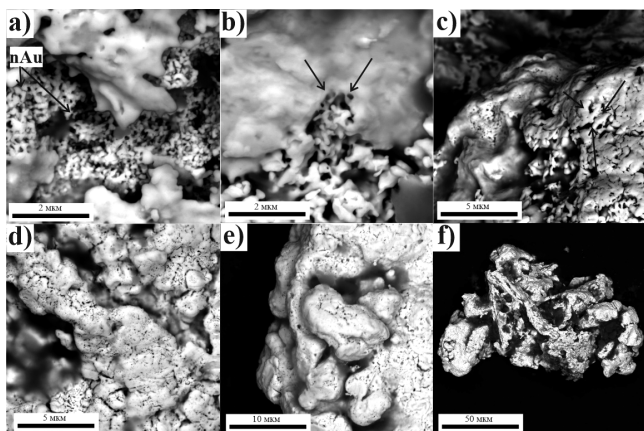


Рис. 8. Механизм роста частиц Au агрегатного (глобулярно-го) строения из хвостохранилища Змеиногорской ЗИФ: а) скопление наночастиц Au, которые при укрупнении и соединении формируют «губчатые» формы; b-c) объединение массивного однородного золота и «губчатых» скоплений; d) пористая поверхность на золоте, образуемая в результате объединения нано- и микрочастиц; e) фрагменты отдельных глобул на поверхности основной золотины; f) общий вид частицы агрегатного строения, в углублениях которых расположены пленки гидроксидов Fe

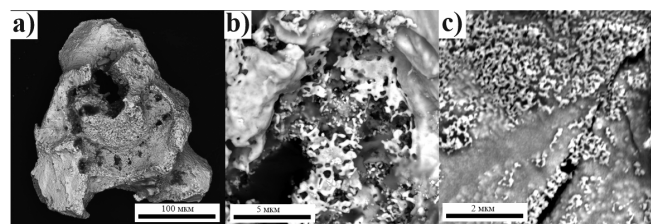


Рис. 9. Элементы «губчатости» на частицах золота: а) центральная часть золотины состоит из «губчатого» золота, создавая при росте частицу кристаллического облика, т.е. укрупнение происходит от краев к центру; b) амeboобразные формы «губчатого» золота; c) мелкая «губчатость»

На поверхности золотин из Ново-Урского и Белоключевского хвостохранилищ наблюдаются своеобразные углубления воронкообразной (октаэдрической) формы (рис. 10 d-f). Такие образования называются скелетными формами или, в зарубежной литературе, кристаллами Хоперра. Их особенностью является то, что края кристаллов полностью развиты, но внутреннее пространство не заполнено. Воронкообразная форма углублений возникает при преобладании диффузионного лимита в процессе роста (Краснова, Петров, 1997). Образование скелетных форм происходит в результате быстрого роста кристаллов, когда электрическое напряжение выше по краям и углам кристаллов, чем в центре. На формирование скелетных кристаллов может оказывать влияние и химический состав среды, т.е. эти процессы идут и при смешанном лимите процесса роста (с преобладанием диффузионного лимита).

К скульптурам растворения можно отнести изъеденную поверхность (рис. 11) с мелкоячеистым и натечным рельефом, которая образуется в результате химического травления поверхностного слоя золота под влиянием агрессивных компонентов внешней среды (порových растворов).

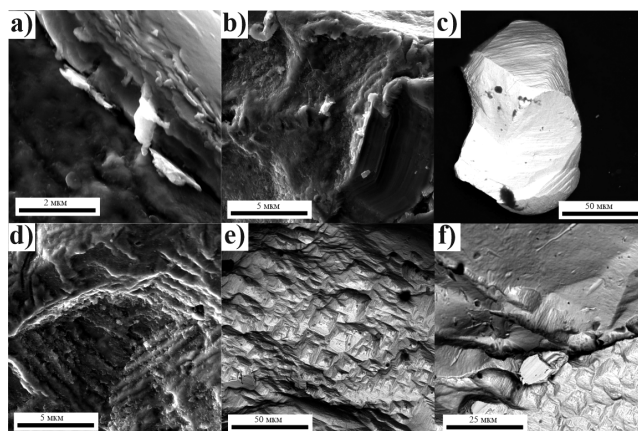


Рис. 10. Скульптуры послойного роста на поверхности самородных частиц: a-b) нанослоистость; c) элементы слоистости на кристалле золота; d) ув. фрагмент октаэдрических форм, в которой видно послойное нарастание вещества; e) общий вид поверхности золотины с множеством углублений октаэдрических форм; f) переход октаэдрических форм в гладкую ровную поверхность и сглаживание (выравнивание) слоистости

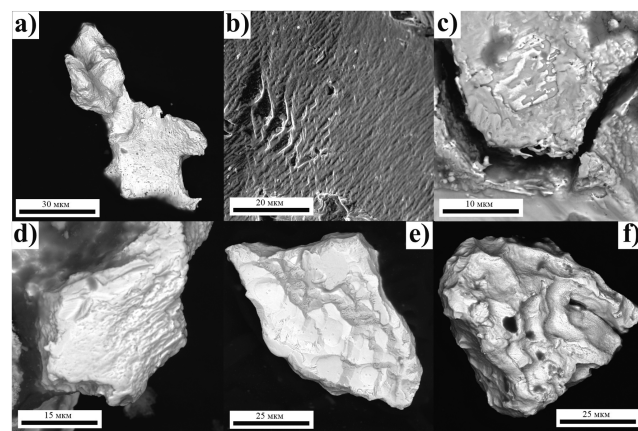


Рис. 11. Скульптуры растворения: а) углубления на поверхности золотины; b) натечные формы, показано направление протекания растворов по поверхности; c-e) образованные ступенчатые элементы в результате растворения, на границах уровней поверхностей выделяются желобки; f) натечные формы растворения в виде мелкой ряби

Гипергенные новообразования на поверхности золота

На поверхности частиц золота были выделены пленки, корочки, наросты, рыхлые образования разного химического состава, которые мы объединили под общим названием гипергенные новообразования.

1) *Пленки и корочки.* Хрупкие, цвет от темно-серого до черного, имеют различную плотность. Толщина варьирует от 3 до 20 μm . Более плотные корочки (рис. 10c) визуально отличаются от тонкозернистых микропористых агрегатов (пленок, рыхлых масс) (рис. 12a, b, j). Их расположение приурочено к дефектам (углублениям, ямкам) поверхностям Au (рис. 12a), также граням зерен (рис. 12c).

По составу они близки к петровскиту ($\text{AgAu}(\text{S}, \text{Se})$), науманниту (Ag_2Se), тиманниту (HgSe). Чаще всего эти образования плохо диагностируются, вызывая трудности определения стехиометрии минералов. Эту сложность объясняют наличием фазовых смесей ($\text{Ag}_2\text{S} + \text{Ag}_3\text{AuS}_2$,

$\text{AgAuS} + \text{Ag}_3\text{AuS}_2$) или существованием твердых растворов $\text{Ag}_{2-x}\text{Au}_x\text{S}$ (Пальянова и др., 2011; Таусон и др., 2018). Кроме того, занижение суммы при анализах связано с микропористостью данных минеральных фаз, а также появлением дополнительных минеральных фаз и продуктов их последующих преобразований (Нестеренко и др., 1984).

В рыхлых массах можно наблюдать микровкрапленность золота (светлые частицы) (рис. 12b). В составе пленок есть примеси I (3.2 мас. %), Br (3.8 мас. %), Cl (3.9 мас. %), Sb (2.4 мас. %), Pb (3.9 мас. %), Bi (3.6 мас. %). Кроме того, обнаружены фазы ютенбогаардитита (Ag_3AuS_2) (рис. 12d) в петровсканитовой пленке и фишессерита (Ag_3AuSe_2) (рис. 12g) на поверхности зерен золота.

2) *Наросты*. Это единичные зерна и скопления частиц неправильной округлой формы, размером от 1–2 до 10 μm . По составу соответствуют колорадоиту (HgTe) (рис. 12e), монтродоиту (HgO) (рис. 12f) и метациннабариту (HgS).

3) Рыхлые минеральные образования на поверхности золота в виде оксидов и гидроксидов Fe, Mn и Pb (рис. 12i), глинистых минералов (каолинит) (рис. 7f), в которых присутствуют одиночные выделения самородного золота.

Пробность, химический состав, внутреннее строение

Внутреннее строение золотин является отражением внешних преобразований частиц в процессе роста и растворения в окружающей среде. При анализе были обнаружены «губчатые» образования, ажурные края и наросты, а также высокопробные прожилки и каемки (рис. 13).

Для золотин Урского рудного поля характерных остаточных ядер и высокопробных кайм и прожилков не было обнаружено. Наличие остаточных ядер доказывало бы, что исследуемые частицы нарастают на остаточные золотины, как на затравки. А наличие высокопробных кайм и прожилков могло бы служить свидетельством самоочищения золота за счет выноса элементов-примесей. Наоборот, выявляется обратная закономерность – пробность золотин уменьшается к краям: от средне- к низкопробному (рис. 13с). При этом можно отметить агрегатность строения золотин, состоящих из разнопробных зерен-частей (рис. 13а). Поскольку химический состав напрямую зависит от источника золота, способа переноса и специфики геохимического барьера (Ким, 1975; Осовецкий, 2013; Николаева и др., 2015), то только наличие высокопробного состава не может быть показателем его «новообразования».

Для Змеиногорского объекта выявляется следующая закономерность: в техногенных отложениях присутствует 88 % золота с однородным составом, тогда как в первичных – 60 %, и окисленных рудах – только 10 %. А характерное блоковое (мозаичное) строение золотин в окисленных рудах (до 90 %) заметно сокращается до 12 % в техногенных отложениях. Это свидетельствует о повышении пробности золота в условиях хранения «отходов» обогащения данного состава.

Обсуждение

В гипергенных объектах золото разделяют на остаточное (аллотигенное) и новообразованное (аутигенное). Независимо от происхождения, Au подвергается процессам укрупнения и разрушения, что проявляется,

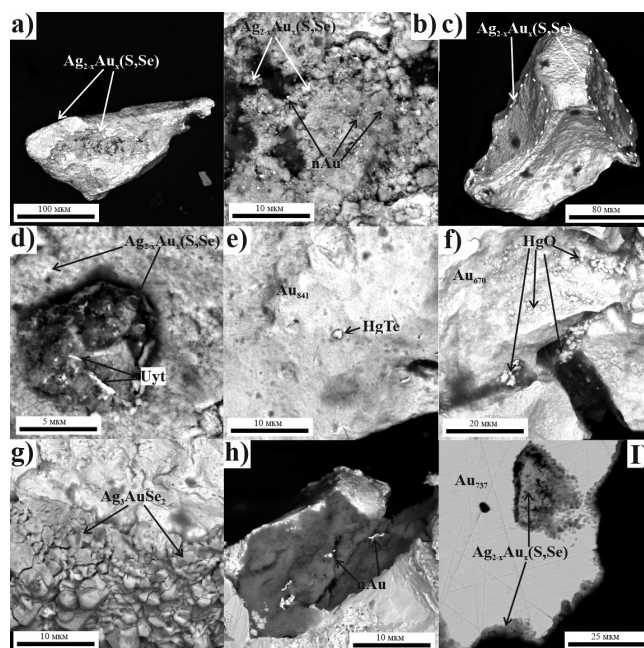


Рис. 12. Гипергенные новообразования на поверхности самородных частиц золота: а) рыхлая пленка Au-Ag-S-Se-Hg состава; б) ув. фрагмент «а» с выделенными микровключениями Au; в) корочки Au-Ag-S-Se-Hg состава по граням золотины; д) выделения ютенбогаардитита в $\text{Ag}_{2-x}\text{Au}_x(\text{S,Se})$ пленке; е) нарост колорадоита; ф) выделения монтроидитовой фазы; г) наросты фишессерита; h) гидроксиды Fe (Pb, Mn) в углублениях на поверхности золотины с выделениями nAu; и) полированный срез золотины, в которой прослеживается небольшая мощность рыхлой Au-Ag-S-Se-Hg-пленки

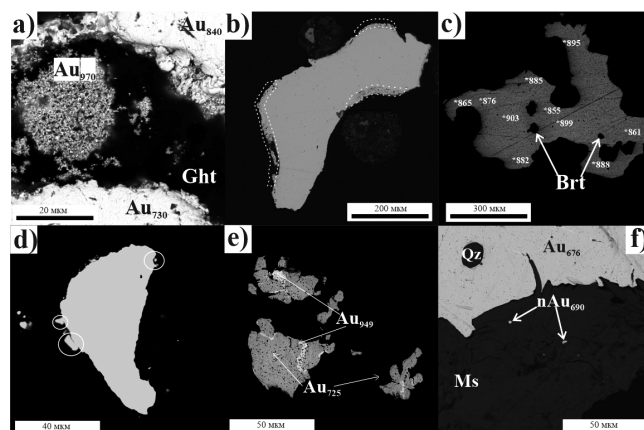


Рис. 13. Внутреннее строение частиц: а) частица массивного золота, внутри которой фрагмент «губчатого» золота в рыхлой массе гидроксидов Fe (Ght). По границам массивного золота видно нарастание «губчатого» Au; б) ажурные края; в) включения барита (Brt) внутри частицы и распределение пробности; д) нано- и микронаросты Au на поверхности золотины; е) прожилки высокопробного золота внутри частицы; ф) микровключения Au в мусковите (Ms)

соответственно, в скульптурах роста и растворения. Зачастую трудно установить истинную природу микроскульптуры частиц и их внутреннюю неоднородную структуру (Петровская, 1973; Kirillov et al., 2018; Wierchowicz et al., 2018). Но ключевое различие между этими процессами заключается в том, что растворение действует преимущественно на поверхностные дефекты и границы субзерен, в то время как рост происходит в

результате повторного зародышеобразования наночастиц Au с последующей их агрегацией (Falconer, Craw, 2009).

Поэтому есть ряд внешних и внутренних признаков, доказывающих, что золото преобразовано. К первым относятся такие морфологические изменения, как:

1) *наличие наночастиц Au* (Осовецкий, 2013; Shuster, Reith, 2018; Wierchowicz et al., 2018). Наночастицы являются компонентами коллоидных или ионных растворов, которые выпадают в осадок на различных геохимических барьерах и способствуют образованию геохимических аномалий в виде горизонтов вторичного обогащения. Они могут быть приурочены как к поверхностям самородных частиц золота, так и к вторичной минерализации (пленкам, глинистым минералам и пр.). Чаще всего считается, что нанозолото – высокопробное (Reith et al., 2012; Wierchowicz et al., 2018). Однако показано (Ким, 1975; Осовецкий, 2013; Николаева и др., 2015), что наночастицы золота имеют широкий диапазон химического состава, не всегда стремящийся к 100 % Au. При этом химический состав матричного металла и наночастиц золота на его поверхности может совпадать.

2) *наличие различных видов наростов и новообразований Au* разных форм и размеров на поверхности самородных золотинок. Они могут иметь червеобразные, округлые, игольчатые, кристаллические, «губчатые» и прочие формы (Осовецкий, 2012; Литвинцев и др., 2016; Shuster et al., 2017; Dunn et al., 2019). Их последовательная концентрация и укрупнение происходит от наноразмерных до видимых выделений, а именно, кластеры формируют сфероиды, сфероиды–агрегаты, а последние образуют самостоятельные выделения сложных и простых форм (Falconer, Craw, 2009; Осовецкий, 2013; Кузнецова и др., 2019).

3) *слоистость и кристаллический облик частиц* (Краснова, Петров, 1997; Хазов, Петровский, 2007; Осовецкий, 2012). Одним из признаков новообразованного золота является отсутствие механических деформаций и сохранение формы, приобретенной при кристаллизации. Эта форма определяется возрастными соотношениями золота с окружающими минералами. Слоистость свидетельствует о стадийном нарастании новых порций вещества.

4) *«агрегатное» и зернистое строение частиц* (Наумов, 2010; Осовецкий, 2012; Кузнецова и др., 2019). Данные золотины представляют наглядный механизм укрупнения и роста золота в гипергенной среде. Укрупнение может происходить как за счет механических, так и биохимических процессов. Разновозрастные частицы соединяются между собой с помощью неструктурированного золота и являются очень хрупкими и сложно диагностируемыми (Осовецкий, 2013).

5) *присутствие новообразованных фаз золота в ассоциации с гипергенными минералами* (Калинин и др., 2009; Николаева, Яблокова, 2007; Осовецкий, 2012, 2013; Reith et al., 2012; Николаева и др., 2015). Данный парагенезис свидетельствует о совместном росте и близких физико-химических условиях существования в гипергенной среде. Так, например, при окислении сульфидов одновременно образуются гидроксиды железа и высвобождается содержащееся в них золото. Кроме того, глинистые минералы способны сорбировать золото на дефектах кристаллической решетки.

6) *присутствие вторичных (Au-Ag-S-Se-Hg) минеральных парагенезисов на поверхности золота в виде пленок, налетов, корочек*. Их образование происходит в результате взаимодействия поверхностного слоя золота со специфическим «техногенным» флюидом, состоящим из смеси жидкой и газовой фаз. В составе паро-газовых потоков, выделяющихся из Урского и Белоключевского отвалов, присутствуют серо-, селен- и азот-содержащие газы (Yurkevich et al., 2019), которые в сочетании с поровыми растворами активно преобразуют зерна золота, растворяя их поверхности и переотлагая новые минеральные фазы. Микрочастицы золота в пленках петровсканитового состава играют существенную роль в мобильности Au. Присутствие Cl, Br, I соединений в составе этих минеральных парагенезисов доказывает роль гипергенных процессов (Кужугет, 2014, 2018).

Однако нельзя исключать, что данный пассивирующий слой (Au-Ag-S-Se-Hg состава) на поверхности самородного золота может образовываться в результате технологического извлечения золота (Senanayake, 2004; Birich et al., 2019; Wang et al., 2019).

7) Среди внутренних изменений чаще всего выделяют *образование высокопробных кайм и прожилков* (Петровская, 1973; Нестеренко, 1991), которые характерны для золотинок россыпей и зон окисления. Их образование объясняют электрохимическим процессом очищения золота от элементов-примесей. В частности, в этом процессе поведение Au и Ag различается и объясняется тем, что растворение Ag происходит в диффузионном режиме, в то время как для Au – это результат взаимодействия поверхностных реакций (процесс солиubilизации). Присутствие высокопробных прожилков и кайм в золоте из техногенных отложений доказывает процессы преобразования частиц. Кроме того, обнаруженные нами ажурные края, включения зерен, сростки микрочастиц с поверхностью и «губчатые» образования, также могут быть отнесены к внутренним признакам трансформации золота, которые свидетельствуют об активном росте частиц.

Все вышеперечисленные признаки являются доказательствами значительных гипергенных преобразований золота непосредственно в техногенных отложениях, включая его ремобилизацию и новообразование, вплоть до формирования горизонтов вторичного золотого обогащения.

Использование схем цианирования и амальгамации для извлечения золота оказывает непосредственное влияние на преобразование золота в процессе длительного хранения складированных переработанных руд. Цианиды и ртуть в ТМО являются катализаторами химических реакций, поскольку в захороненных условиях они сохраняются десятки и более лет (Гаськова и др., 2000; Наумов, 2010; Кузнецова и др., 2019 и др.). Однако четко выделить роль тех или иных факторов на преобразование золота зачастую очень сложно.

Результаты проведенных исследований позволяют расширить представления об условиях его миграции и формах переотложения, а также предположить физико-химические механизмы этого процесса. Они по своей сути подобны тем, которые проявляются в природных зонах окисления, однако приводят к более широкому разнообразию минеральных видов и морфологии выделений,

причем в узких интервалах разреза складированных насыпных «отходов» обогащения. Резкая смена окислительно-восстановительных условий в таких хвостохранилищах имеет ярко выраженный сезонный компонент (Dunn et al., 2019), который вносит значительный вклад в преобразование переработанных руд.

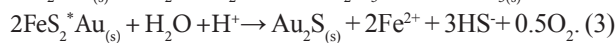
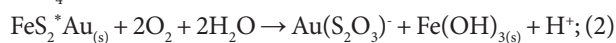
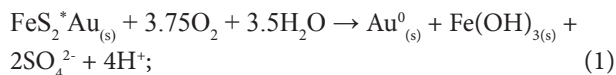
Золото растворяется с помощью различных окислителей в присутствии ряда лигандов (L), с формированием соединений типа $Au(I)L_2$ и/или $Au(III)L_4$. В гипергенных условиях преобладают хлоридные, тиосульфатные и высокомолекулярные органические гуминовые и фульвовые кислоты (Boyle, 1979; Росляков, 1981; Mann, 1984; Hough et al., 2007; Shuster, Reith, 2018). При этом, тиосульфатный лиганд играет значимую роль только в краткосрочной мобилизации золота в гипергенной среде, т.е. неустойчив (Craw, Lilly, 2016; Харламова, 2018; Liua et al., 2020). При цианировании руд в щелочных растворах (pH 11), в техногенных системах будут долго устойчивы цианидные- и гидроксокомплексы (Гаськова и др., 2000).

Как показали исследования (Наумов, 2010; Литвинцев и др., 2016; Wierchowicz et al., 2018; Кузнецова и др., 2019; Хусаинова и др., 2020 и др.), все же определяющим фактором перехода золота в раствор является размер его частиц и форма нахождения в первичных рудах. Этот переход зависит от растворимости самого золота, химической активности среды и устойчивости к химическому выветриванию его минералов-носителей. Преимущественно, в раствор переходит тонкодисперсное золото с размером частиц менее 0.1 мкм, а зерна с размерами 2–3 мкм до 0.2 мм не подвергаются растворению, так как обладают повышенной устойчивостью (Росляков, 1981).

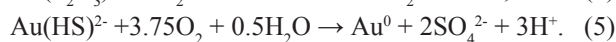
В результате перехода золота в раствор происходит дифференциация по подвижности на трудно-, легко- и подвижную формы (Росляков, 1981). Первое золото прочно связывается с глинистыми минералами и мигрирует вместе с ними за счет механических перемещений под действием гравитационных сил. Подвижное золото находится в поровых растворах в форме устойчивых органокомплексных соединений. В целом, поровые растворы содержат разнообразные электролиты, которые способствуют коагуляции коллоидальных частиц золота и образованию самостоятельных частиц причудливой морфологии. Легкоподвижное золото представлено неорганическими комплексными соединениями и истинными коллоидами, именно на него более всего влияют Eh-pH условия.

При изменении физико-химических параметров среды золото осаждается, формируя самородные фазы. Только при резкой смене этих условий могут образовываться горизонты вторичного золотого обогащения. Поскольку Ag является более подвижным элементом, оно может либо формировать Ag-содержащие минеральные фазы, либо выноситься из данной системы, концентрируясь в последующем на различных геохимических барьерах.

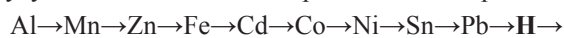
Выщелачивание Au из сульфидных минералов действует как непрерывный источник Au в системе хвостохранилища. При этом из пиритов золото будет высвобождаться в виде Au^0 и Au_2S следующим образом, соответственно, в окислительных, промежуточных и восстановительных условиях (1–3):



Тиосульфатные комплексы будут разрушаться с образованием сульфат- или гидросульфид-ионов и самородного золота в зависимости опять же от Eh-pH условий среды (4, 5). Это будет приводить к укрупнению золотин или образованию агрегатов в зависимости от наличия затравок и диффузионного режима фильтрации раствора.

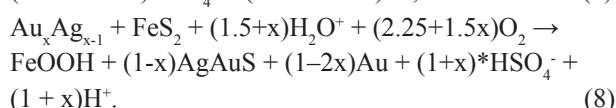
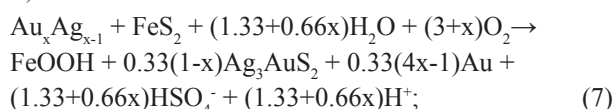


Именно при сопоставлении реакции (4, 5) и фрагментов электрохимического ряда активностей металлов (6), можно понять, что в случае, когда инертное золото уже кристаллизуется, другие металлы мигрируют в растворе и будут выпадать только в порядке своей очередности.



Как сказано выше, $Au(S_2O_3)_n^{(1-2n)}$, где $(1-2n)$ – это валентность комплекса, являются метастабильными и могут переноситься на короткие расстояния в пределах профиля осадка, а дестабилизация происходит посредством: 1) тиосульфат-окисляющих бактерий, которые используют тиосульфат в качестве источника энергии (восстановительная биоминерализация золота) (Lengke, Southam, 2005; Etschmann et al., 2016; Shuster et al., 2017); 2) присутствием таких восстановителей как органическое вещество и ионы Fe^{2+} ; 3) при снижении pH, когда золото восстанавливается с осаждением на уже существующей поверхности самородных частиц (Hyland, Bancroft, 1989; Mucroft et al., 1995).

Эти процессы, усиленные воздействием газовой фазы, объясняют присутствие Au-Ag-S-Se-Hg минерализации в виде пленок на поверхности золотин хвостохранилищ, представленную такими минералами как: петровскит, ютенбогаардит, науманит, тиманнит и фишессерит. Их образование происходит по реакциям (6, 7) (Савва и др., 2010):



На образование разных генераций золота влияют геохимические барьеры (Kirillov et al., 2018, Хусаинова и др., 2020). Образование Ag-содержащего (14–20 мас. % Ag) самородного Au является результатом распада смешанных тиосульфатных комплексов типа $(Au, Ag)(S_2O_3)_2^{3-}$. Доказательствами являются пленки $Ag_{2-x}Au_xS$ состава на поверхности золотин с включениями pAu (рис. 12b). При дальнейшем воздействии кислых растворов Ag-содержащее вторичное Au подвергается повторному растворению в форме гидросульфидных комплексов и переотложению. Более высокая растворимость Au в кислых окислительных условиях приводит к осаждению

нескольких генераций крайне высокопробного Au различной морфологии при смене условий. Это подтверждается ассоциацией «губчатого» золота с гидроксидами Fe на поверхности массивного золота (рис. 9а, 13а).

Выводы

Рассмотрены основные типоморфные характеристики золота из хвостохранилищ переработанных руд колчеданно-полиметаллических месторождений рудных районов Сибири. Полученные результаты подтверждают подвижность золота в масштабах хвостохранилищ и подчеркивают сложный характер многостадийных процессов растворения и повторного осаждения золота.

Среди типоморфных сходств выделяются следующие параметры: 1) увеличение количества мелкого и тонкого класса золота; 2) присутствие хорошо сохранившихся наростов нано- и микроскопического золота разнообразных форм; 3) изменчивый химический состав новообразованных фаз (от низко- до весьма высокопробного), причем состав новообразований и матричного золота может быть одинаковым или кардинально отличаться; 4) кристаллический облик частиц и присутствие элементов послынного роста (слоистость); 5) отсутствие физических повреждений на новообразованных частицах.

Среди типоморфных отличий выделяются следующие параметры: 1) для Ново-Урского и Белоключевского хвостохранилища: а) присутствие Au-Ag-S-Se-Hg минерализации на поверхности «Ново-Урских» золотин, которая свидетельствует о специфических физико-химических условиях в техногенных отложениях данного объекта и миграции золота в виде тиосульфатных комплексов; б) зональность химического состава (пробность уменьшается к краям), отсутствуют остаточные ядра; в) включения зерен барита и его обрастание золотом как на поверхности, так и внутри частиц. 2) для Змеиногорского хвостохранилища: а) значительное уменьшение содержания Ag в рудах: в первичных (290 г/т) и окисленных (100 г/т) рудах и техногенных отложениях (21 г/т); б) образование зерен агрегатного строения, которые отсутствуют в первичных и окисленных рудах; в) наличие и увеличение мощности прожилков и их химического состава (до 98 мас. % Au) в частицах.

В результате длительного существования хвостохранилищ обогащения руд колчеданно-полиметаллических месторождений произошло значительное преобразование техногенных отложений и перераспределение благородных металлов (Au и Ag) за счет взаимодействия вода-порода. Наличие золотосодержащих сульфидных минералов, а также малая размерность их зерен, способствовали более быстрым процессам окисления и осаждения золота при смене физико-химических условий.

Химический состав новообразованных фаз золота напрямую зависит от золото-содержащегося комплекса минералов. В ТМО колчеданно-полиметаллических месторождений присутствует золото разного химического состава: от низкопробного до весьма высокопробного. Из-за умеренно кислой и флуктуирующей окислительно-восстановительной природы техногенных отложений, $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ и $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_n^{(1-2n)}$ являются основными комплексами, ответственными за подвижность золота. Формой миграции золота средней пробности

можно считать смешанные тиосульфатные комплексы, а высокопробного – гидросульфидные.

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.

Финансирование

Работа выполнена по госзаданию ИГМ и ИНГГ СО РАН.

Литература

- Банщикова Т.С., Литвинцев В.С., Пономарчук Г.П. (2010). Морфологические характеристики техногенного золота и закономерности его пространственного расположения в отвальных комплексах. *Мат. XIV межд. сов. по геол. россыпей и м-й кор выветривания*. Новосибирск: ИГМ СО РАН, с. 82–86.
- Болгов Г.П. (1937). Сульфиды Салаира, Урская группа полиметаллических месторождений. *Изв. Томск. инд. ин-та*, 53(11), с. 45–96.
- Гаскова О.Л., Бортникова С.Б., Айрияц А.А., Колмогоров Ю.П., Пашков М.В. (2000). Геохимические особенности техногенного озера, содержащего отходы цианирования золото-арсенинит-кварцевых руд. *Геохимия*, 3, с. 317–328.
- Дербилов И.В. (1937). Ново-Урское полиметаллическое месторождение. *Матер. по геол. Зап.-Сиб. края*, 42, 58 с.
- Дистанов Э.Г. (1977). Колчеданно-полиметаллические месторождения Сибири. Новосибирск: Наука, 351 с.
- Журавкова Т.В., Пальянова Г.А., Калинин Ю.А., Горячев Н.А., Зинина В.Ю., Житова Л.М. (2019). Физико-химические условия образования минеральных парагенезисов Au и Ag на месторождении Валунистое (Чукотка). *Геология и геофизика*, 60(11), с. 1565–1576. <https://doi.org/10.15372/RGG2019049>
- Зеркалов В.И. (1962) Минералогия и геология колчеданных медно-цинковых месторождений Сев.-Вос. Салаира. *Автореф. дис. канд. геол.-мин. н.* Томск: ТПИ, 20 с.
- Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Прудников С.Г. (2006). Золотоносные коры выветривания юга Сибири. Новосибирск: Гео, 339 с.
- Калинин Ю.А., Ковалев К.Р., Наумов Е.А., Кириллов М.В. (2009). Золото коры выветривания Сузальского месторождения (Казахстан). *Геология и геофизика*, 50(3), с. 241–257. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.09.002>
- Ким А.А. (1975). Анализ минералогических особенностей самородного золота в первичных и окисленных рудах месторождений Центрального Алдана. *Древние коры выветривания Якутии*. Якутск, с. 109–127.
- Ковалев К.Р. (1969). Особенности формирования руд колчеданно-полиметаллических месторождений Северо-Восточного Салаира и Восточной Тувы. *Дис. д. геол.-мин. н.* Новосибирск, 283 с.
- Ковлеков И.И. (2002). Техногенное золото Якутии. Москва: Изд-во МГУ, 303 с.
- Краснова Н.И., Петров Т.Г. (1997). Генезис минеральных индивидов и агрегатов. Санкт-Петербург: Невский курьер, 228 с.
- Кужугет Р.В. (2014). Иодидная и бромидная минерализация в окисленных рудах Хаак-Саирского золоторудного месторождения, Западная Тува. *Записки Российского минер. общ.*, CXLI, 2, с. 64–80.
- Кужугет Р.В., Монгуш А.А., Ооржак Ш.Н., Бутанаев Ю.В. (2018). Иодсодержащие минералы ряда хлораргирит – бромаргирит в окисленных рудах золото-кварцевых рудопоявлений Хаак-Саир и Тардан-2 (Тува, Россия). *Изв. Томского политех. ун-та, Инжиниринг георесурсов*, 329(12), с. 80–93.
- Кузнецова И.В., Сафронов П.П., Моисеенко Н.В. (2019). Вещественно-минеральная характеристика техногенных россыпей – потенциальных источников благородного металла (на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья, Россия). *Георесурсы*, 21(1), с. 2–14. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.2-14>
- Литвинцев В.С., Леоненко Н.А., Банщикова Т.С. (2016). Типоморфные особенности золота техногенных россыпей Приамурья в аспекте новых технологий. *Тихоокеанская геология*, 35(4), с. 89–99.
- Макаров В.А. (2001). Условия формирования техногенных золото-содержащих объектов и особенности методики их геолого-технологической оценки. *Автореф. дис. д. геол.-мин. наук*. Красноярск, 33 с.

- Мягкая И.Н., Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Густайтис М.А. (2013). Распределение золота и серебра в потоке рассеяния Урского хвостохранилища (Кемеровская область). *Мат. XXV Всерос. мол. конференции: Строение литосферы и геодинамика*, с. 60–62.
- Наумов В.А. (2010). Минерогения, техногенез и перспективы комплексного освоения золотоносного аллювия. *Автореф. дис. д. геол.-мин. н.* Пермь: ПГУ, 42 с.
- Нестеренко Г.В. (1991). Прогноз золотого оруденения по россыпям. Новосибирск: Наука, 200 с.
- Нестеренко Г.В., Кузнецова А.И., Пальчик Н.А., Лаврентьев Ю.Г. (1984). Петровскит $\text{AuAg}(\text{S}, \text{Se})$ – новый селеносодержащий сульфид золота и серебра. *Зап. Всесоюз. минерал. общ.*, 4(5), с. 602–607.
- Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н., Яблокова С.В., Шатилова Л.В. (2015). Самородное золото рудных и россыпных месторождений России: атлас. Москва: ЦНИГРИ, 200 с.
- Николаева Л.А., Яблокова С.В. (2007). Типоморфные особенности самородного золота и их использование при геологоразведочных работах. *Руды и металлы*, 6, с. 41–57.
- Оленченко В.В., Кучер Д.О., Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Еделев А.В., Гора М.П. (2016). Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир). *Геология и геофизика*, 57(4), с. 782–795. <https://doi.org/10.15372/GiG20160410>
- Осовецкий Б.М. (2012). Наноскульптура поверхности золота: монография. Пермь: ПГНИУ, 232 с.
- Осовецкий Б.М. (2013). Природное нанозолото. Пермь: ПГНИУ, 176 с.
- Пальянова Г.А., Кох К.А., Сереткин Ю.В. (2011). Образование сульфидов золота и серебра в системе Au-Ag-S . *Геология и геофизика*, 52(4), с. 568–576.
- Петровская Н.В. (1973). Самородное золото: общие характеристики, типоморфизм, вопросы генезиса. М.: Наука, 349 с.
- Плюснин А.М., Погребняк Ю.Ф. (1979). Экспериментальное изучение поведения золота в условиях зон окисления сульфидных месторождений. *Геология рудных месторождений*, 21(1), с. 106–109.
- Половинкова Л.М. (2009). Геологический отчет о техногенных образованиях хвостохранилища Змеиногорской золотоизвлекательной фабрики. Отчет, Роснедра, 31 с.
- Росляков Н.А. (1981). Геохимия золота в зоне гипергенеза. Новосибирск: Наука, 237 с.
- Рослякова Н.В., Щербаков Ю.Г., Агеев Н.Ф., Портяников Д.И., Бортникова С.Б., Радостева Н.Е. (1983). Условия золотоносности колчеданно-полиметаллических месторождений. *Тр. ИГиГ*, 533, с. 31–65.
- Савва Н.Е., Пальянова Г.А., Колова Е.Е. (2010). Минералы золота и серебра в зоне вторичного сульфидного обогащения. *Вестник СВНЦ ВО РАН*, 1, с. 33–45.
- Тайсон В.Л., Кварцова Р.Г., Липко С.В., Макшаков А.С., Арсентьев К.Ю. (2018). Типохимизм поверхности самородного золота. *ДАН*, 480(2), с. 210–216. <https://doi.org/10.7868/S0869565218140165>
- Хазов А.Ф., Петровский Д.В. (2007). Генетические особенности гипергенно-модифицированного золота в корах выветривания. *ДАН*, 416(4), с. 533–537. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07070331>
- Харламова В.Ю. (2018). Высокоустойчивые комплексы золота (I) с серосодержащими лигандами в водном растворе. *Авторефер. дисс. канд. хим. наук.* ИНХ СО РАН, 22 с.
- Хусаинова А.Ш., Наумов В.А., Наумова О.Б. (2019). Дифференциация частиц золота из отвалов гравитационного обогащения руд Тарданского месторождения. *Вестник Пермского государственного университета. Геология*, 18(3), с. 276–285. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.3.276>
- Хусаинова А.Ш., Гаськова О.Л., Калинин Ю.А., Бортникова С.Б. (2020). Физико-химическая модель преобразования золота в продуктах переработки руд колчеданно-полиметаллических месторождений (Салаирский край, Россия). *Геология и геофизика*, 61(9), с. 1181–1193. <https://doi.org/10.15372/GiG2020120>
- Черепнин В.К. (1957). К вопросу о составе и генезисе руд Урских месторождений Салаира. *Изв. Томск. политехн. ин-та*, 90, с. 56–68.
- Шварцев С.Л., Дутова Е.М. (2001). Гидрогеохимия и мобилизация золота в зоне гипергенеза (Кузнецкий Алату, Россия). *Геология рудных месторождений*, 43(3), с. 252–261.
- Юркевич Н.В., Карин Ю.Г., Кулешова Т.А. (2017). Состав отвала Белоключевского месторождения золота по данным электромагнитного сканирования и геохимического опробования. *Труды XXI Межд. симп.: Проблемы геологии и освоения недр*, 1, с. 853–855.
- Birich A., Stopic S., Friendrich B. (2019). Kinetic Investigation and Dissolution Behavior of Cyanide Alternative Gold Leaching Reagents. *Scientific Reports*, 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43383-4>
- Boyle R.W. (1979) The geochemistry of gold and its deposits. *Geol. Surv. Canada, Bull.*, 280, 584 p.
- Craw D., Lilly K. (2016). Gold nugget morphology and geochemical environments of nugget formation, southern New Zealand. *Ore Geology Reviews*, 79, pp. 301–315. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.001>
- Dunn S.C., Heyden B.P., Rozendaal A., Taljaard R. (2019). Secondary gold mineralization in the Amani Placer Gold Deposit, Tanzania. *Ore Geology Reviews*, 107, pp. 87–107. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.011>
- Etschmann B., Brugger J., Fairbrother L., Grosse C., Nies D.H., Martinez-Criado G., Reith F. (2016). Applying the Midas touch: Differing toxicity of mobile gold and platinum complexes drives biomineralization in the bacterium *Cupriavidus metallidurans*. *Chemical Geology*, 438, pp. 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.05.024>
- Fairbrother L., Brugger J., Shapter J., Laird J.S., Southam G., Reith F. (2012). Supergene gold transformation: Biogenic secondary and nanoparticulate gold from arid Australia. *Chemical Geology*, 320–321, pp. 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.025>
- Falconer D.M., Craw D. (2009). Supergene gold mobility: a textural and geochemical study from gold placers in southern New Zealand. *Society of Economic Geologists*, 14, pp. 77–93. <https://doi.org/10.5382/SP.14.08>
- Friese F.W. (1931). The transportation of gold by organic underground solutions. *Econ. Geol.*, 26(4), pp. 421–431. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.26.4.421>
- Gustaytis M.A., Myagkaya I.N., Chumbaev A.S. (2018). Hg in snow cover and snowmelt waters in high-sulfide tailing regions (Ursk tailing dump site, Kemerovo region, Russia). *Chemosphere*, 202, pp. 446–459. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.076>
- Hong H., Tie L. (2005). Characteristics of the minerals associated with gold in the Shewushan supergene gold deposit, China. *Clays Clay Miner.*, 53, pp. 162–170. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2005.0530206>
- Hough R.M., Butt C.R.M., Reddy S.M., Verrall M. (2007). Gold nuggets: supergene or hypogene? *Aust. J. Earth Sci.*, 54, pp. 959–964. <https://doi.org/10.1080/08120090701488289>
- Hyland M.M., Bancroft G.M. (1989). An XPS study of gold deposition at low temperatures on sulphide minerals: reducing agents. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, pp. 367–372. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90388-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90388-8)
- Kalinin Y.A., Palyanova G.A., Kovalev K.R., Naumov E.A., Pirajno F. (2019). Supergene remobilization of Au in Au-bearing regolith related to orogenic deposits: a case study from Kazakhstan. *Ore Geology Reviews*, 109, pp. 358–369. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.019>
- Kirilov M.V., Bortnikov S.B., Gaskova O.L., Shevko E.P. (2018). Authigenic gold in stale tailings of cyanide leaching of gold-sulfide-quartz ores (Komsomol'skii gold-extracting factory, Kemerovo Region). *Doklady Earth Sciences*, 481(2), pp. 1091–1094. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18080299>
- Lengke M.F., Southam G. (2005). The effect of thiosulfate-oxidizing bacteria on the stability of the gold-thiosulfate complex. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69, pp. 3759–3772. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.03.012>
- Liu X., Jianga T., Xua B., Zhang Y., Lia Q., Yanga Y., He Y. (2020). Thiosulphate leaching of gold in the $\text{Cu-NH}_3\text{-S}_2\text{O}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ system: An updated thermodynamic analysis using predominance area and species distribution diagrams. *Minerals Engineering*, 151, 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106336>
- Mann A.W. (1984). Mobility of gold and silver in lateritic weathering profiles: some observations from Western Australia. *Econ. Geol.*, 79(1), pp. 38–49. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.79.1.38>
- Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. (2016). Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: Migration in water flow. *Journal of Geochemical Exploration*, 160, pp. 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.10.004>
- Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. (2016). Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 2: Reprecipitation on natural peat. *Journal of Geochemical Exploration*, 165, pp. 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.01.016>
- Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Zaikovskii V.I., Zhmodik S.M. (2020). Interaction of natural organic matter with acid mine drainage: Authigenic mineralization (case study of Ursk sulfide tailings, Kemerovo region, Russia). *Journal of Geochemical Exploration*, 211, 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106456>
- Mycroft J.R., Bancroft G.M., McIntyre N.S., Lorimer J.W. (1995). Spontaneous deposition of gold on pyrite from solutions containing Au(III) and Au(I) chlorides. 1. A surface study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, pp. 3351–3365. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00211-H](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00211-H)
- Reith F., Stewart L., Wakelin S.A. (2012). Supergene gold transformation: Secondary and nanoparticulate gold from southern New Zealand. *Chemical Geology*, 320–321, pp. 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.021>

Senanayake G. (2004). Gold leaching in non-cyanide lixiviant systems: critical issues on fundamentals and applications. *Minerals Engineering*, 17(6), pp. 785–801. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.008>

Shuster J., Reith F. (2018). Reflecting on Gold Geomicrobiology Research: Thoughts and Considerations for Future Endeavors. *Minerals*, 8(9), 401. <https://doi.org/10.3390/min8090401>

Shuster J., Reith F., Cornelis G., Parsons J.E., Parsons J.M., Southam G. (2017). Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments. *Chemical Geology*, 450, pp. 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.027>

Vlassopoulos D., Wood S.A. (1990). Gold speciation in natural waters: I. Solubility and hydrolysis reactions of gold in aqueous solution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54(1), pp. 3–12. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90189-R](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90189-R)

Wang L., Wang H., Ma B., Wang Ch., Xing P., Ma R. (2019). Research on gold extraction from uytenbogaardtite via in situ microzone analysis. *Hydrometallurgy*, 186, pp. 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.04.013>

Wierchowicz J., Mikulski St.Z., Gasiński A. (2018). Nanoforms of gold from abandoned placer deposits of Wądroże Wielkie, Lower Silesia, Poland – The evidence of authigenic gold mineralization. *Ore Geology Reviews*, 101, pp. 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.07.009>

Yurkevich N., Bortnikova S., Abrosimova N., Makas A., Olenchenko V., Yurkevich Nic., Edelev A., Saeva O., Shevko A. (2019). Sulfur and Nitrogen Gases in the Vapor Streams from Ore Cyanidation Wastes at a Sharply Continental Climate, Western Siberia, Russia. *Water Air Soil Pollut*, 230, 307. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4363-y>

Xia C. (2008). Associated Sulfide Minerals in Thiosulfate Leaching of Gold: Problems and Solutions. *PhD Thesis*. Ontario, 339 p.

Сведения об авторах

Альфия Шамильевна Хусаинова – канд. геол.-мин. наук, младший научный сотрудник лаборатории структурной петрологии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, д. 3
e-mail: khusainova@igm.nsc.ru

Юрий Александрович Калинин – доктор геол.-мин. наук, главный научный сотрудник лаборатории прогнозно-металлогенических исследований, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, д. 3

Ольга Лукинична Гаскова – доктор геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории рудообразующих систем, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, д. 3

Светлана Борисовна Бортникова – доктор геол.-мин. наук, заведующая лабораторией геоэлектрохимии, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, д. 3

Статья поступила в редакцию 28.05.2020;

Принята к публикации 15.01.2021; Опубликована 30.09.2021

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Typomorphic characteristic of gold from tailings of pyrite-polymetallic deposits of Siberian

A.Sh. Khusainova^{1*}, Yu.A. Kalinin¹, O.L. Gaskova¹, S.B. Bortnikova²

¹Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

*Corresponding author: Alfya Sh. Khusainova, e-mail: khusainova@igm.nsc.ru

Abstract. The long-term stored tailings of the ore concentration of pyrite-polymetallic ore deposits are an ideal natural laboratory in which it is possible to study the gold transformation from primary ores to supergene with superimposed anthropogenic characteristics. The typomorphic characteristics of native gold are studied on the example of technogenic-mineral formations (TMF) of the Novo-Ursk, Belokluch and Zmeinogorsk deposits (Western Siberia). The grain size distribution of gold and its concentration, morphology, internal structure and chemical composition shows the features of gold conversion in the processes of dissolution, migration and secondary deposition at geochemical barriers.

As a result of a typomorphic analysis, external and internal signs were identified that prove that gold underwent supergene transformations directly in the body of the technogenic tailings. The growths and accumulations of nano- and micro-size gold, the formation of particles of aggregate structure, lamination, fine particles and veinlets, openwork edges, as well as the absence of physical damage on the surface of the golds, confirm the active mobility of gold at the scales of tailings and emphasize the complex nature of multi-stage processes of gold mobilization.

The gold formation of different chemical composition in TMF is explained by specific physical and chemical conditions for the section of the mound of stored waste, different sources of primary gold and geochemical barriers. $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_n^{(1-2n)}$ and $\text{Au}(\text{HS})_2$ are the main complexes responsible for the mobility of gold. Gold of low and medium fineness is formed from thiosulfate complexes, whereas high-fineness gold is formed from hydrosulfide complexes.

Keywords: supergenegold, typomorphic features, technogenic mineral formations

Acknowledgements

The work was carried out according to the state assignment of the Sobolev Institute of Geology and Mineralogy and Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Recommended citation: Khusainova A.Sh., Kalinin Yu.A., Gaskova O.L., Bortnikova S.B. (2021). Typomorphic characteristic of gold from tailings of pyrite-polymetallic deposits of Siberian. *Georesursy = Georesources*, 23(3), pp. 149–163. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.18>

References

- Banshchikova T.S., Litvintsev V.S., Ponomarchuk G.P. (2010). Morphological characteristics of technogenic gold and patterns of its spatial location in dump complexes. *Proc. XV Int. Meet. on Geology of Placers and Deposits of Weathering Crusts*. Novosibirsk: IGM SO RAN, pp. 82–86. (In Russ.)
- Birich A., Stopic S., Friendrich B. (2019). Kinetic Investigation and Dissolution Behavior of Cyanide Alternative Gold Leaching Reagents. *Scientific Reports*, 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43383-4>
- Bolgov G.P. (1937). Salair sulfides, Ursk group of polymetallic deposits. *Izv. Tomsk. Polytechnic Inst.*, (11), pp. 45–96. (In Russ.)
- Boyle R.W. (1979) The geochemistry of gold and its deposits. *Geol. Surv. Canada, Bull.*, 280, 584 p.
- Cherepnin V.K. (1953). The question of the composition and genesis of the ores of the Ursk deposits (Salair). *Izv. Tomsk. Polytechnic Inst.*, 90, pp. 56–68. (In Russ.)
- Craw D., Lilly K. (2016). Gold nugget morphology and geochemical environments of nugget formation, southern New Zealand. *Ore Geology Reviews*, 79, pp. 301–315. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.06.001>
- Derbikov I.V. (1937). Novo-Ursk polymetallic deposit. *Material on the geology of the West Siberia region*, 42, 58 p. (In Russ.)
- Distanov E.G. (1977). Pyrite-polymetallic deposits of Siberia. Novosibirsk: Nauka, 351 p. (In Russ.)
- Dunn S.C., Heyden B.P., Rozendaal A., Taljaard R. (2019). Secondary gold mineralization in the Amani Placer Gold Deposit, Tanzania. *Ore Geology Reviews*, 107, pp. 87–107. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.011>
- Etschmann B., Brugger J., Fairbrother L., Grosse C., Nies D.H., Martinez-Criado G., Reith F. (2016). Applying the Midas touch: Differing toxicity of mobile gold and platinum complexes drives biomineralization in the bacterium *Cupriavidus metallidurans*. *Chemical Geology*, 438, pp. 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.05.024>
- Fairbrother L., Brugger J., Shapter J., Laird J.S., Southam G., Reith F. (2012). Supergene gold transformation: Biogenic secondary and nanoparticulate gold from arid Australia. *Chemical Geology*, 320–321, pp. 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.025>
- Falconer D.M., Craw D. (2009). Supergene gold mobility: a textural and geochemical study from gold placers in southern New Zealand. *Society of Economic Geologists*, 14, pp. 77–93. <https://doi.org/10.5382/SP.14.08>
- Friese F.W. (1931). The transportation of gold by organic underground solutions. *Econ. Geol.*, 26(4), pp. 421–431. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.26.4.421>
- Gaskova O.L., Bortnikova S.B., Airiyants A.A., Kolmogorov Yu.P., Pashkov M.V. (2000). Geochemical features of an anthropogenic impoundment with cyanidation wastes of gold-arsenopyrite-quartz ores. *Geochemistry International*, 38(3), pp. 281–291.
- Gustaytis M.A., Myagkaya I.N., Chumbaev A.S. (2018). Hg in snow cover and snowmelt waters in high-sulfide tailing regions (Ursk tailing dump site, Kemerovo region, Russia). *Chemosphere*, 202, pp. 446–459. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.076>
- Hong H., Tie L. (2005). Characteristics of the minerals associated with gold in the Shewushan supergene gold deposit, China. *Clays Clay Miner.*, 53, pp. 162–170. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2005.0530206>
- Hough R.M., Butt C.R.M., Reddy S.M., Verrall M. (2007). Gold nuggets: supergene or hypogene? *Aust. J. Earth Sci.*, 54, pp. 959–964. <https://doi.org/10.1080/08120090701488289>
- Hyland M.M., Bancroft G.M. (1989). An XPS study of gold deposition at low temperatures on sulphide minerals: reducing agents. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, pp. 367–372. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90388-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90388-8)
- Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A., Prudnikov S.G. (2006). Gold-bearing weathering crust of the southern Siberia. Novosibirsk: Geo, 339 p. (In Russ.)
- Kalinin Yu.A., Kovalev K.R., Naumov E.A., Kirillov M.V. (2009). Gold in the weathering crust at the Suzdal deposit (Kazakhstan). *Russian Geology and Geophysics*, 50(3), pp. 174–187. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.09.002>
- Kalinin Y.A., Palyanova G.A., Kovalev K.R., Naumov E.A., Pirajno F. (2019). Supergene remobilization of Au in Au-bearing regolith related to orogenic deposits: a case study from Kazakhstan. *Ore Geology Reviews*, 109, pp. 358–369. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.04.019>
- Khazov A.F., Petrovskii D.V. (2007). Genetic features of supergene modified gold in weathering crusts. *Doklady Earth Sciences*, 416(1), pp. 1128–1131. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07070331>
- Kharlamova V.Yu. (2018). Highly stable complexes of gold (I) with sulfur-containing ligands in aqueous solution. *Abstract. Sci. Diss. INKh SB RAS*, 22 p. (In Russ.)
- Khusainova A.Sh., Naumov V.A., Naumova O.B. (2019). Differentiation of gold particles after gravity concentration (Tardan deposit, Tuva Republic, Russia). *Bulletin of Perm University. Geology = Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 18(3), pp. 276–285. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.3.276>
- Khusainova A.Sh., Gaskova O.L., Kalinin Yu.A., Bortnikova S.B. (2020). Physical-chemical model of gold transformation in the pyrite-polymetallic ores treatment wastes (Ursk, Kemerovo Region, Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 61(9), pp. 1181–1193. <https://doi.org/10.15372/GiG2020120>
- Kim A.A. (1975). Analysis of the mineralogical features of native gold in primary and oxidized ores of deposits of Central Aldan. *Ancient weathering crust of Yakutia*. Yakutsk, pp. 109–127. (In Russ.)
- Kirillov M.V., Bortnikov S.B., Gaskova O.L., Shevko E.P. (2018). Authigenic gold in stale tailings of cyanide leaching of gold-sulfide-quartz ores (Komsomol'skii gold-extracting factory, Kemerovo Region). *Doklady Earth Sciences*, 481(2), pp. 1091–1094. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18080299>
- Kovalev K.R. (1969). Features of the formation of ores of pyrite-polymetallic deposits of the North-Eastern Salair and East Tuva. *Abstract Sci. Diss. Novosibirsk*, 283 p. (In Russ.)
- Kovlekov I.I. (2002). Technogenic gold of Yakutia. Moscow: Moscow State University, 303 p. (In Russ.)
- Krasnova N.I., Petrov T.G. (1997). The genesis of mineral individuals and aggregates. St.Petersburg: Nevskiy kur'er, 228 p. (In Russ.)
- Kuznetsova I.V., Safronov P.P., Moiseenko N.V. (2019). Matter-mineral characteristics of technogene placers – potential sources of precious metals (on the example of the Nizhneselemdzhinsky gold-bearing node of Priamurye, Russia). *Georesursy = Georesources*, 21(1), pp. 2–14. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.3-14>
- Kuzhuget R.V. (2014). Iodide and bromide mineralization in oxidized ores of the Khaak-sair gold-ore deposit, Western Tuva. *Zapiski RMO = Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, CXLIII, 2, pp. 64–80. (In Russ.)
- Kuzhuget R.V., Mongush A.A., Oorzhak Sh.N., Butanaev Yu.V. (2018). Iodine-bearing minerals of chlorargyrite-bromargyrite series in oxidized ores of the Khaak-sair and the Tardan-2 gold-quartz ore occurrences (Tuva, Russia). *Izv. Tomsk. polit. un-ta, Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 329(12), pp. 80–93. (In Russ.)
- Lengke M.F., Southam G. (2005). The effect of thiosulfate-oxidizing bacteria on the stability of the gold-thiosulfate complex. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 69, pp. 3759–3772. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.03.012>
- Litvintsev V.S., Leonenko N.A., Banshchikova T.S. (2016). Typomorphic gold specifications in the anthropogenic placer from Priamurye in terms of innovation technology. *Tikhookeanskaya Geologiya*, 35(4), pp. 89–99. (In Russ.)
- Liua X., Jianga T., Xua B., Zhang Y., Lia Q., Yanga Y., He Y. (2020). Thiosulphate leaching of gold in the Cu–NH₃–S₂O₃^{2–}–H₂O system: An updated thermodynamic analysis using predominance area and species distribution diagrams. *Minerals Engineering*, 151, 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106336>
- Makarov V.A. (2001). Conditions for the formation of technogenic gold-bearing objects and features of the methodology for their geological and technological assessment. *Abstract. Sci. Dis. Krasnoyarsk*, 33 p. (In Russ.)
- Mann A.W. (1984). Mobility of gold and silver in lateritic weathering profiles: some observations from Western Australia. *Econ. Geol.*, 79(1), pp. 38–49. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.79.1.38>
- Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. (2016). Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: Migration in water flow. *Journal of Geochemical Exploration*, 160, pp. 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.10.004>
- Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. (2016). Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 2: Reprecipitation on natural peat. *Journal of Geochemical Exploration*, 165, pp. 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.01.016>
- Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Zaikovskii V.I., Zhmodik S.M. (2020). Interaction of natural organic matter with acid mine drainage: Authigenic mineralization (case study of Ursk sulfide tailings, Kemerovo region, Russia). *Journal of Geochemical Exploration*, 211, 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106456>
- Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Gustaytis M.A. (2013). Distribution of gold and silver in the dispersion stream of the Ursk tailings (Kemerovo region). *Proc. XXV Russ. Conf.: Structure of the lithosphere and geodynamics*, pp. 60–62. (In Russ.)
- Mycroft J.R., Bancroft G.M., McIntyre N.S., Lorimer J.W. (1995). Spontaneous deposition of gold on pyrite from solutions containing Au(III) and Au(I) chlorides. 1. A surface study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, pp. 3351–3365. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00211-H](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00211-H)

Naumov V.A. (2010). Minerageny, technogenesis and prospects for the integrated development of gold-bearing alluvium. Abstract Sci. Diss. Perm: PSU, 42 p. (In Russ.)

Nesterenko G.V. (1991). Forecast for placer gold mineralization. Novosibirsk: Nauka, 200 p. (In Russ.)

Nesterenko G.V., Kuznetsova A.I., Pal'chik N.A., Lavrent'ev Yu.G. (1984). Petrovskaita AuAg (S, Se) – a new selenium-containing sulfide of gold and silver. *Zap. Vsesoyuzn. mineral. obshch.*, 4(5), pp. 602–607. (In Russ.)

Nikolaeva L.A., Gavrilov A.M., Nekrasova A.N., Yablokova S.V., Shatilova L.V. (2015). Native gold of ore and placer deposits in Russia: atlas. Moscow: TsNIGRI, 200 p. (In Russ.)

Nikolaeva L.A., Yablokova S.V. (2007). Typomorphic features of native gold and their use in exploration. *Rudy i metally*, 6, pp. 41–57. (In Russ.)

Olenchenko V.V., Kucher D.O., Bortnikova S.B., Edelev A.V., Gas'kova O.L., Gora M.P. (2016). Vertical and lateral spreading of highly mineralized acid drainage solutions (Ur dump, Salair): electrical resistivity tomography and hydrogeochemical data. *Russian Geology and Geophysics*, 57(4), pp. 617–628. <https://doi.org/10.15372/GiG20160410>

Osovet'skiy B.M. (2012). Nanosculpture of the surface of gold. Perm: PSU, 232 p. (In Russ.)

Osovet'skiy B.M. (2013). Natural nanogold. Perm: PSU, 176 p. (In Russ.)

Pal'yanova G.A., Kokh K.A., Seryotkin Y.V. (2011). Formation of gold and silver sulfides in the system Ag-Au-S. *Russian Geology and Geophysics*, 52(4), pp. 443–449. (In Russ.) <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.03.006>

Plyusnin A.M., Pogrebnik Yu.F. (1979). An experimental study of the gold behavior in the oxidation zones conditions of sulfide deposits. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy = Geology of Ore Deposits*, 21(1), pp. 106–109. (In Russ.)

Petrovskaya N.V. (1973). Native gold. Moscow: Nauka, 348 p. (In Russ.)

Polovnikova L.M. (2009). Geological report on the technogenic formations of the tailing dump of the Zmeinogorsk gold mining plant. Report, Rosnedra, 31 p. (In Russ.)

Reith F., Stewart L., Wakelin S.A. (2012). Supergene gold transformation: Secondary and nanoparticulate gold from southern New Zealand. *Chemical Geology*, 320–321, pp. 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.021>

Roslikova N.V., Shcherbakov Yu.G., Ageenko N.F., Portnyannikov D.I., Bortnikova S.B., Radosteva N.E. (1983). Gold conditions of pyrite-polymetallic deposits. *Trudy IGG*, 533, pp. 31–65. (In Russ.)

Roslyakov N.A. (1981). Geochemistry of gold in the hypergenesis zone. Novosibirsk: Nauka, 237 p. (In Russ.)

Savva N.E., Paljanova G.A., Kolova E.E. (2010). Gold and Silver Minerals within Sulfide Enrichment Area (Krutoe Lode, Northeastern Russia). *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*, 1, pp. 33–45. (In Russ.)

Senanayake G. (2004). Gold leaching in non-cyanide lixiviant systems: critical issues on fundamentals and applications. *Minerals Engineering*, 17(6), pp. 785–801. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.008>

Shuster J., Reith F. (2018). Reflecting on Gold Geomicrobiology Research: Thoughts and Considerations for Future Endeavors. *Minerals*, 8(9), 401. <https://doi.org/10.3390/min8090401>

Shuster J., Reith F., Cornelis G., Parsons J.E., Parsons J.M., Southam G. (2017). Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments. *Chemical Geology*, 450, pp. 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.027>

Shvartsev S.L., Dutova E.M. (2001). Hydrogeochemistry and gold mobilization in the supergene zone (Kuznetsk Alatau, Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy = Geology of Ore Deposits*, 43(3), pp. 252–261. (In Russ.)

Tauson V.L., Kvartsova R.G., Lipko S.V., Makshakov A.S., Arsent'ev K.Yu. (2018). Surface typochemistry of native gold. *Doklady Earth Sciences*, 480(1), pp. 624–630. DOI: 10.7868/S0869565218140165

Vlassopoulos D., Wood S.A. (1990). Gold speciation in natural waters: I. Solubility and hydrolysis reactions of gold in aqueous solution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54(1), pp. 3–12. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90189-R](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90189-R)

Wang L., Wang H., Ma B., Wang Ch., Xing P., Ma R. (2019). Research on gold extraction from uytenbogaardite via in situ microzone analysis. *Hydrometallurgy*, 186, pp. 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.04.013>

Wierchowicz J., Mikulski St.Z., Gąsiński A. (2018). Nanoforms of gold from abandoned placer deposits of Wądroże Wielkie, Lower Silesia, Poland – The evidence of authigenic gold mineralization. *Ore Geology Reviews*, 101, pp. 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.07.009>

Yurkevich N., Bortnikova S., Abrosimova N., Makas A., Olenchenko V., Yurkevich Nic., Edelev A., Saeva O., Shevko A. (2019). Sulfur and Nitrogen Gases in the Vapor Streams from Ore Cyanidation Wastes at a Sharply Continental Climate, Western Siberia, Russia. *Water Air Soil Pollut*, 230, 307. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4363-y>

Yurkevich N.V., Karin Yu.G., Kuleshova T.A. (2017). Composition of the dump of the Beloklyuchevskoe gold deposit according to the data of electromagnetic scanning and geochemical sampling. *Proc. Int. Sci. Symp.: Problems of Geology and Subsurface Development*, 1, pp. 853–855. (In Russ.)

Zerkalov V.I. (1962). Mineralogy and geology of pyrite copper-zinc deposits of North-East Salair Ridge. *Abstract Sci. Diss.* Tomsk: TPI, 20 p. (In Russ.)

Zhuravkova T.V., Palyanova G.A., Zhuravkova T.V., Sazonov A.M., Silyanov S.A. (2019). Composition of Pyrrhotite as an Indicator of Gold Ore Formation Conditions at the Sovetskoe Deposit (Yenisei Ridge, Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 60(7), pp. 735–751. <https://doi.org/10.15372/RGG2019049>

Xia C. (2008). Associated Sulfide Minerals in Thiosulfate Leaching of Gold: Problems and Solutions. *PhD Thesis*. Ontario, 339 p.

About the Authors

Alfiya Sh. Khusainova – PhD (Geology and Mineralogy), Junior Researcher, Laboratory of Structural Petrology, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

3, Ac. Koptyug Av., 3 Novosibirsk, 630090, Russian Federation

e-mail: khusainova@igm.nsc.ru

Yury A. Kalinin – DSc (Geology and Mineralogy), Chief Researcher of the Laboratory of Forecasting and Metallogenic Researches, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

3, Ac. Koptyug Av., 3 Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Olga L. Gaskova – DSc (Geology and Mineralogy), Leading Researcher of the Laboratory of Ore Forming Systems, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

3, Ac. Koptyug Av., 3 Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Svetlana B. Bortnikova – DSc (Geology and Mineralogy), Head of Geoelectrochemistry Laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

3, Ac. Koptyug Av., 3 Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Manuscript received 28 May 2020;

Accepted 15 January 2021; Published 30 September 2021