

На правах рукописи



ХУСАИНОВА Альфия Шамилевна

**ПОВЕДЕНИЕ ЗОЛОТА В ТЕХНОГЕННО-МИНЕРАЛЬНЫХ
ОБРАЗОВАНИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТО-
СУЛЬФИДНОГО ТИПА**

25.00.11 – геология, поиски и разведка твердых полезных
ископаемых, минерагения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК 2020

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

Научный руководитель: **Калинин Юрий Александрович**
Доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник Института
геологии и минералогии имени В.С.
Соболева СО РАН

Официальные оппоненты: **Макаров Владимир Александрович**
Доктор геолого-минералогических наук,
директор института горного дела, геологии и
геотехнологий Сибирского федерального
университета (г. Красноярск)

Юркевич Наталья Викторовна
Кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник Института
нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.
Трофимука СО РАН (г. Новосибирск)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт геологии алмаза
и благородных металлов СО РАН, Якутск

Защита состоится «4» декабря 2020 г., в 14.00 на заседании диссертационного
совета Д 003.067.03, созданного на базе ИГМ СО РАН, в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. ак. Коптюга, 3; факс: 8 (383) 333-21-30;
e-mail: turkina@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГМ СО РАН.
Адрес сайта: <http://www.igm.nsc.ru>, раздел «Образование».

Автореферат разослан «4» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор геол.-минер. наук

О.М. Туркина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальность исследований обусловлена необходимостью решения фундаментальной задачи рудной геологии и геохимии – выяснение условий, источников и механизмов формирования рудных концентраций металлов в экзогенных условиях. Опубликованный материал по разнообразным экзогенным золотоносным объектам [Билибин, 1937; Петровская, 1973; Шило, 2002; 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 и др.] позволяет говорить о новом облике гипергенной геохимии Au, в связи с достаточно высокой его мобильностью, способностью изменять свои минеральные и растворимые формы, концентрироваться на геохимических барьерах.

Воссоздание модели поведения Au и Ag позволит объяснить физико-химические условия формирования не только рудных концентраций в природных объектах, но и в зонах вторичного обогащения техногенных объектов. К последним относятся хвостохранилища продуктов добычи и переработки разнообразных золотосодержащих руд, называемые *техногенно-минеральными образованиями* (ТМО). Их особенность заключается в том, что они, по своей сути, 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 первые десятки – сотни лет, позволяя при этом рассматривать ТМО в качестве потенциальных (а зачастую и реальных) рудных объектов.

Однако, вопрос о масштабах перераспределения и образования «нового» золота остается дискуссионным. Не до конца выяснены механизмы диспергации и укрупнения частиц Au, причины изменения пробности зерен, химизм и масштабы процессов растворения, переноса и отложения Au из металлоносных комплексов, 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.

Для этого решались следующие **задачи**:

1. Комплексно изучить типоморфные характеристики самородного золота и оценить степень их преобразования в процессе хранения ТМО.
2. Охарактеризовать зоны вторичного обогащения гипергенным золотом и классифицировать геохимические барьеры.
3. Создать термодинамическую модель растворения, переноса и отложения золота в системе ТМО.

4. Сравнить типоморфные характеристики и степень преобразования золота в ТМО на примере хвостохранилищ золоторудных и россыпных месторождений разных генетических типов.

Предметом исследования является самородное золото, золотосодержащие растворы и вмещающее их вещество (первичные и окисленные руды, техногенные отложения). Под месторождениями золото-сульфидного типа автор понимает объекты, в продуктах переработки (ТМО) которых присутствует значимое количество сульфидных минералов: (5-50 %) – высокосульфидные; (до 5%) – низкосульфидные.

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

Фактический материал. Первичный материал с ТМО Ново-Урского, Белоключевского и Змеиногорского месторождений, а также с ТМО золоторудных месторождений Восточного Казахстана (Акжал, Даубай, Яковлевское и Президент) получены автором совместно с коллегами ИГМ СО РАН в ходе полевых работ за период 2015-2019 гг.

Фактический материал с «хвостов» гравитационного обогащения месторождения Тардан был получен студенческим полевым отрядом Пермского государственного университета (ПГНИУ) в 2013 г. и изучался автором на протяжении обучения на программе специалитета в ПГНИУ в лаборатории осадочных полезных ископаемых (ЛОПИ). Кроме того, за этот период были изучены коллекции вещества ТМО и частиц золота, отобранные сотрудниками Естественно-научного института ПГНИУ, из техногенных отложений Чернореченской россыпи и бассейна рр. Ис и Тура.

Методика исследования. 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 кг каждая. Для каждой исходной пробы методом квартования отбирался дубликат для аналитических исследований. *Обогащение* осуществлялось гравитационным способом с помощью лотка или на установке «Мелкоценные минералы (МЦМ)» ПГНИУ и винтовом шлюзе. В лабораторных условиях, полученный концентрат (черный шлик) доводился до суперконцентрата, с помощью домывки в бромформе 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. Выделение самородного золота осуществлялось под бинокулярным микроскопом (ЛЮМО ХС1422).

Для *аналитических исследований* были использованы методы: а) атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) с использованием спектрометра 3030 В (Perkin-Elmer) и фотометра Solar M6 (Thermo Electron) для определения содержания 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 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 (*микронного*) 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 известной методике [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. Расчеты проводились в 19-компонентной системе H₂O-Na-Ca-Mg-K-Sr-Ba-Si-Al-Cl-C-S-Fe-Mn-Ag-Au-Cu-Zn, включающей частицы в растворе, минералы и газы. Исходной информацией служили аналитические данные по минеральному и химическому составу вещества по данным РФА. Окислительно-восстановительные условия задавались открытием системы по кислороду, кислотность создавалась степенью окисления сульфидов при разных Eh, щелочность корректировалась присутствием в растворе карбонат- и бикарбонат-ионов в равновесии с CO_{2(газ)}, соответствующим атмосферному, т.е. 10^{-3.5} 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 физико-химическая модель поведения золота в хвостохранилищах продуктов переработки руд 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 исследований. 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.

Основные защищаемые положения:

1. В техногенно-минеральных образованиях сульфидного типа золото подвергается процессам растворения, миграции и осаждения. Происходит укрупнение золотин, 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 ($\text{pH } 4$, $\text{Au}(\text{HS})_2^- > 10^{-6}$ мг/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 10^{-3} мг/л при $\text{pH } 1.6$). Именно их распад приводит в обильному переосаждению Au^0 на окислительно-восстановительных барьерах в теле отвала.

3. Вне зависимости от типа складирования вещества, способа обогащения и размерности самородных частиц, в техногенно-минеральных образованиях золото 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.

Апробация результатов исследования. Основные результаты, а также отдельные ее разделы, обсуждались и докладывались на Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», МГУ, 2015, 2016 гг.; VI Российской молодежной научно-практической Школе

с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования», ИГЕМ РАН, 2016; на Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире», ПГНИУ, 2013, 2015-2017 гг.; на Международной научно-практической конференции «Технологическая платформа. Твердые полезные ископаемые: технологические и экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений», 2015 г.; на Всероссийской молодежной геологической конференции «Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий», ИГ УНЦ РАН, 2015-2016 гг.; на Международном совещании по геологии россыпей и месторождений кор выветривания (РКВ-2015), ПГНИУ, 2015; на IX Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле, ИГМ СО РАН, Новосибирск, 2018; на III Всероссийской научной конференции «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами», БНЦ СО РАН, Чита, 2018; на VIII Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России», СВФО им. М.К. Аммосова, Якутск, 2018; на Международной научно-студенческой конференции МНСК-2019, Новосибирск, НГУ, 2019; в научной школе «Металлогения древних и современных океанов: месторождения океанических структур: геология, минералогия, геохимия и условия образования», ИМин УрО РАН, 2015-2017, 2019; на Международной конференции «Mine Water: Technological and Environmental Challenges (IMWA)», ПГНИУ, 2019; на Международном симпозиуме 16th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference), Томск, 2019; на Международной конференции 15th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits (SGA), Scotland, Glasgow, 2019.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 2 статьях в рецензируемых журналах по перечню ВАК, в 15 публикациях, включенных в материалы научных мероприятий.

Личный вклад соискателя. Автор принимала непосредственное участие на всех этапах работы: отбор и обогащение проб, пробоподготовка исходного вещества для аналитических исследований, подготовка материала и его изучение на СЭМ (более 500 частиц) и МРСА (более 100 частиц), обобщение полученных результатов. Помимо этого, автором проведен анализ 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 объектах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 203 наименований, приложений. Объем диссертации составляет 169 страниц, в том числе 52 рисунка и 15 таблиц.

Благодарности. Работа выполнена в лаборатории прогнозно-металлогенических исследований (№ 217) ИГМ СО РАН под руководством д.г.-м.н. Калинина Ю.А., которому автор выражает глубокую признательность.

Автор благодарит за неоценимую помощь в проведении полевых и аналитических исследований, подготовке и обсуждении работы сотрудников ИГМ СО РАН и ИНГГ СО РАН: д.г.-м.н. Борисенко А.С., к.г.-м.н. Наумова Е.А., к.г.-м.н. Сухорукова В.П., д.г.-м.н. Ковалева К.Р., д.г.-м.н. Пальянову Г.А., к.г.-м.н. Неволько П.А., к.г.-м.н. Кирилова М.В., д.г.-м.н. Бортникову С.Б., аналитиков Ильину В.Н., Карманову Н.Г., Карманова Н.С., Хлестова М.В., Заякину С.Б., Хмельникову О.С., Цаплина В.Г., сотрудников Пермского государственного университета (ПГНИУ) – д.г.-м.н. Наумову О.Б. и д.г.-м.н. Осовецкого Б.М., а также других институтов и организаций – Сердюкова А.Н., Бакшеева Н.А., Васькова А.С. Автор благодарит за помощь своих младших коллег Бирюкова К.Э., Кузнецову Е.А., Павлова А.В., Старкова Р.И., Пугина Д.Г., Овдину Е.А., Картозия А.А.

Автор выражает особую благодарность д.г.-м.н. Наумову В.А., д.г.-м.н. Гаськовой О.Л., к.г.-м.н. Кужугету Р.В., к.г.-м.н. Лазаревой Е.В., к.г.-м.н. Житовой Л.М. и Бондаренко В.П. за консультации и помощь в выполнении данной работы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цели, задачи, объекты исследования и фактический материал по ним, выносимые на защиту положения диссертационной работы, отражена научная новизна, практическая значимость, личный вклад соискателя. В **главе 1** приведен литературный обзор отечественных и зарубежных работ по геохимии золота и его поведения в гипергенных условиях на примере россыпных месторождений, кор выветривания и ТМО. Представлены результаты опубликованных данных по работам предшественников по изученности объектов исследования. В **главе 2** описаны примененные методики для исследования золота и вмещающего его вещества для объектов исследования. В **главе 3** дается геологическое описание объектов исследования, история формирования и современный облик хвостохранилищ. В **главе 4** изложены результаты исследования типоморфных характеристик золота по данным СЭМ и МРСА. Выделены признаки, свидетельствующие о гипергенных преобразованиях Au в ТМО. В **главе 5** предложена обобщенная физико-химическая модель преобразования золота, на примере отвала Ново-Урского хвостохранилища. В **главе 6** представлены результаты по изучению и сравнению золотоносности ТМО намывного и насыпного типа золоторудных и россыпных месторождений России и Казахстана с природными объектами.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ново-Урское и Белоключевское месторождения расположены в Урском рудном поле (Салаирский кряж), которое сложено дацитовыми порфирами и их туфами, порфиритами, кварц-альбит-хлоритовыми сланцами печеркинской свиты (р ϵ ₁), залегающими среди известняков анчешевской свиты (ан ϵ ₁) [Болгов, 1937; Черепнин, 1953; Дистанов, 1977].

В эндогенных рудах золото находится в самородном и связанном виде в сульфидах [Болгов, 1937; Черепнин, 1953; Дистанов, 1977] и в маломощных кварцевых жилах. Размеры частиц Au не превышают 0.015 мм. Оно 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 галенита, халькопирита, борнита, арсенопирита, сфалерита, теннантита, алтаита, геффройта и теллурида ртути [Дистанов, 1977; Муагкауа et al., 2020], а также золота (910 ‰) с примесями Cu (28,6 ‰) и Ag (61,4 ‰). В барите установлены включения науманнита и селенида Hg со значительными примесями Ag и S [Муагкауа et al., 2020]. Сформированная зона окисления, по первичным рудам, обогащена Au в 7-20 раз, Ag в 5-7 раз и As в 2-3 раза [Болгов, 1937; Дербииков, 1937]. Помимо этого, зона окисления характеризуется высоким содержанием Hg, проявленной как в самородном виде, так и в виде киновари, источником которой является блеклая руда и сфалерит [Ковалев, 1969].

Месторождения обрабатывались в начале 1930-х гг. по методике выщелачивания цианидными растворами и, в настоящее время, представлены насыпными отвалами по 10-12 м в высоту (рис. 1, 2, прил.). На хвостохранилищах протекают кислые дренажные воды (КДР) – соленые (TDS до 4,8 г/л), сильнокислые (pH 1.8-2.7, Eh 665–760 мВ), сульфатные, Al-Fe-Ca 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; Муагкауа et al, 2016a], состав которых приближен к составу поровых растворов в отвалах.

Минеральный состав концентрата из отвалов варьирует от типа насыпи и, преимущественно, состоит из пирита, барита и кварца, также присутствуют ярозит, гипс, гетит, меньше мусковит, альбит, хлорит и микроклин [Муагкауа et al, 2016a]. По данным ААС, содержание золота варьирует 0.13 до 1.2 г/т, Ag – 0.72-31.0 г/т.

На Ново-Урском хвостохранилище (рис. 1а, прил.) сформированы: 1) *отвал кварц-баритового состава* (рис. 1б, прил.), на котором была вскрыта нижняя часть разреза (~2 м от выхода коренных пород), состоящая из трех макроскопически различимых горизонтов: 1) серо-синеватый кварц-барит-пиритовый (h = 40 см) с жемами кремнезема; 2) бурожелезняковый (h = 40 см); 3) сланцевый (h = 50 см), лежащий непосредственно на почве; 2) *отвал кварц-пиритового состава* (рис. 1в, прил.), однородный по минералогическому составу; 3) *намывные отложения* (рис. 1г, прил.)

снесенного вещества. Последние направлены в сторону долины р. Ур и в плане выглядят как своеобразный конус выноса, образовавшийся вследствие механического сноса вещества с основных двух отвалов и захороненный на природном органическом веществе.

Хвостохранилище Белоключевского месторождения по минеральному составу и строению является аналогом Ново-Урского объекта. Для изучения была вскрыта насыпь (с разрезом мощностью 5 м), которую можно разделить на следующие горизонты (сверху вниз, рис. 2в, прил.): 1) верхняя часть представлена рыжим веществом кварц-баритовой сыпучки (0-220 см); 2) средняя – кварц-пиритовая сыпучка серого цвета (220-350 см); 3) нижняя – рыжее окисленное вещество до гл. 500 см. По данным ААС средние содержания в верхней и нижней частях горизонтов составляет – 0.45 г/т.

Змеиногорское месторождение, расположенное на Рудном Алтае, генетически связано со средне-верхнедевонской базальт-риолитовой формацией и локализовано на трех стратиграфических уровнях – в нижнеэфельских, живетских и нижнефранских отложениях [Ворошилов, Понитевский, 2001; Гасков, 2002].

ТМО Змеиногорской золото-извлекательной фабрики (ЗИФ) расположены в своеобразном котловане, в аллювиальных отложениях первой надпойменной террасы р. Корбалиха (рис. 3, прил.). На месторождении обрабатывались золотосодержащие роговики, первичные сульфидные и окисленные руды, в поздний период – переработанные руды хвостохранилища. Отвалы Змеиногорской (ЗИФ) накапливались преимущественно в два этапа: с 1904 по 1917 гг. и с 1936 по 1956 гг. Извлечение на фабрике осуществлялось двумя способами: выделением гравитационного концентрата с последующей амальгамацией, в поздний период – цианированием.

В результате многократных обработок ТМО Змеиногорского месторождения, в котловане остались небольшие пологие насыпи (высотой до 2 м), покрытые растительностью (рис. 3б, в, прил.). Среднее содержание золота в ТМО составляет 0.87 г/т. Материал отвала состоит, преимущественно, из кварца (50%), слюды, плагиоклаза, барита, каолинита, иногда встречается гематит, малахит. Из рудных минералов отмечаются пирит, халькопирит, борнит, блеклая руда, золото.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Типоморфные характеристики золота из ТМО колчеданно-полиметаллических месторождений. Основные результаты по изучению золотонности ТМО Ново-Урского и Белоключевского месторождений представлены в табл. 1 (прил.). Поскольку золотины из разных типов ТМО Ново-Урского месторождения имеют схожие типоморфные данные, то в табл. 1 (прил.) представлена общая характеристика частиц золота для хвостохранилища в целом.

В ТМО Ново-Урского месторождения преобладает золото мелкое, класс <0.25 мм, в то время, как в отвалах Белоключевского месторождения – >0.25 мм. По форме частиц встречаются золотины изометрического (49 %) и вытянутого (40 %) облика, реже уплощенные (8 %).

Среди микроскульптур поверхностей золота можно выделить: 1) наросты новообразованных золотоносных фаз нано- и микронного размера округлых, неправильных и чешуйчатых форм на поверхности самородных частиц золота и в ассоциации с гипергенными минералами; 2) скульптуры растворения в виде выщелоченного рельефа; 3) присутствие на поверхности частиц различных гипергенных новообразований: пленки и налеты (корочки), по составу близкие к Au-Ag-S-Se-Hg-фазам. Для золота из Белоключевского хвостохранилища была обнаружена микростлоистость.

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 (табл. 1, прил.). У части золотин этих двух объектов пробность 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.

Для **Змеиногорского месторождения** получилось восстановить полную цепочку эволюции золота: от коренных руд к гипергенным. Основные типоморфные характеристики представлены в таблице 2 (прил.). В ТМО присутствует новообразованное золото и многообразие остаточного из природных руд, которое подверглось значительным гипергенным преобразованиям.

По сравнению с первичными рудами, в окисленных и техногенных отложениях среднее содержание серебра уменьшилось в 3 и 14 раз соответственно. Это можно объяснить тем, что колчеданно-полиметаллические руды характеризуются обилием собственных серебряносодержащих минералов и минералов ряда кюстелит – самородное золото. Известно, что в гипергенных условиях Ag имеет более высокую миграционную способность, чем золото. Подобные тенденции отражаются в химическом составе частиц. Например, в ТМО в золотилах с блоковым строением Ag около 30%, в первичных рудах более 50%, в окисленных менее 50%.

В ТМО происходит значительное увеличение количества тонкого и мелкого золота за счет его преимущественного осаждения, постепенного роста и укрупнения, преобладающими классами являются 0.5-0.25 мм и <0.1 мм (табл. 2, прил.). Среди особенностей золота из ТМО Змеиногорского

месторождения можно выделить обилие нано- и микрочастиц золота как на поверхности самородных частиц, так и в ассоциации с гипергенными минералами, которые могут формировать как простые формы (в виде округлых частиц), так и сложные близкие к «губчатым» образованиям.

На основе детального изучения золота с помощью СЭМ и МРСА, были выделены внешние и внутренние признаки, которые свидетельствуют о том, что в ТМО золото, недоизвлеченное при промышленной добыче, подвергается гипергенным преобразованиям.

1) *Наличие микро- и наночастиц золота* чешуйчатых, таблитчатых и округлых форм как на поверхности самородных частиц, так и в ассоциации с гипергенными минералами (рис. 4, прил.). При этом состав матричного металла и новообразованных фаз может не совпадать.

2) *Наличие зерен «агрегатного» и зернистого строения* (рис. 5, прил.), образование которых происходит как за счет механического слипания Au, так и химического осаждения и нарастания «нового» золота на более «массивные» золотины.

3) *Слоистость и кристаллический облик частиц* (рис. 6, прил.).

4) *Структуры растворения* (рис. 7, прил.), которые представлены в виде изъеденной поверхности золотин с мелкоячеистым и натечным рельефом, образующимся при взаимодействии минерализованных (поровых) растворов и поверхностного слоя золота.

5) *Гипергенные новообразования* (рис. 8, прил.) Au-Ag-S-Se-Hg состава на поверхности золота в виде пленок, налетов, корочек. Их образование происходит в результате взаимодействия поверхностного слоя золота и поровых растворов (рис. 9, прил.) и способствует осаждению микроэмульсионных частиц золота, которые в последующем играют существенную роль в мобильности Au в системе ТМО. Присутствие Cl, Br, I соединений в составе этих минеральных парагенезисов доказывает роль гипергенных процессов [Кужугет, 2014; Кужугет и др., 2018].

6) Среди внутренних изменений (рис. 10, прил.) чаще всего выделяют *образование высокопробных кайм и прожилков* [Петровская, 1973; Нестеренко, 1991]. Кроме того, обнаружены ажурные края, включения минералов, сростки микрочастиц Au с золотинами и «губчатые» образования.

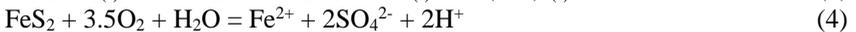
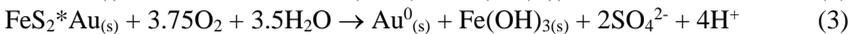
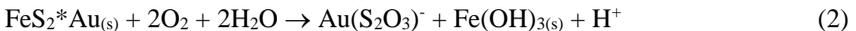
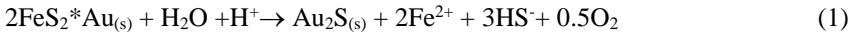
Вышеизложенное служит доказательством первого защищаемого положения: ***В техногенно-минеральных образованиях сульфидного типа золото подвергается процессам растворения, миграции и осаждения. Происходит укрупнение золотин, формирование наростов Au разных форм и размеров на поверхности самородных частиц и образование сростков Au с гипергенными минералами.***

2. Обобщенная физико-химическая модель преобразования золота.

Термодинамическое моделирование поведения Au и Ag проведено для хвостохранилища переработанных руд Ново-Урского месторождения (см. рис. 1б, прил.).

Главной целью моделирования было установить ведущие формы нахождения золота в растворе и содержание в твердой фазе в профиле выщелачивания ТМО. Для этого учитывались его ионы и комплексы в растворе – гидросульфидные-, тиосульфатные-, гидроксо- и хлорокомплексы. Модельной твердой фазой было только золото элементарное. Значащими принимались количества (в растворе и твердой фазе) 10^{-10} моль/кг H_2O .

Обобщенная схема приведена на рисунке 11 (прил.). Выщелачивание Au из сульфидных минералов действует как непрерывный источник его поступления в систему отложений ТМО (1-3), а растворение сульфидов способствует образованию кислых сульфатных дренажных вод (4) (поровых растворов).



Благодаря перколяции кислых сульфатных растворов (от лат. percolatio – процеживание, фильтрация в отличие от поверхностного смыва), подзона верхней части разреза (*верхняя часть горизонта 1*) представляет собой горизонт выщелачивания с повышенной влажностью. Водные сульфаты и кристаллогидраты сульфатов, органика скапливаются над плотным бурожелезняковым горизонтом (*нижняя часть горизонта 1*).

При растворении золото будет высвобождаться и переходить в раствор в виде комплексов $AuHS^0$, $Au(HS)_2^-$, $Au_2(HS)_2S^{2-}$ вплоть до pH 3.7 и Eh 0.016 V (табл. 3).

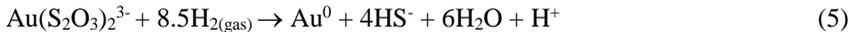
Таблица 3. Результаты моделирования растворения ступенчатого окисления минеральной ассоциации с пиритом, золотом и элементарной серой при 25°C. Концентрации железа и серы указаны в моль/л, золото в мг/л (логарифмы).

pH	4,3	4,25	3,76	2,73	1,60
Eh, В	-0,06	-0,03	0,02	0,11	0,20
$AuHS^0$	-9,53	-10,03	-10,28	-10,78	-11,28
$Au(HS)_2^-$	-5,81	-7,38	-8,62	-	-
$Au_2(HS)_2S^{2-}$	-7,78	-9,90	-	-	-
$Au(S_2O_3)_2^{3-}$	-11,22	-6,89	-6,10	-4,55	-2,96
$Au(S_2O_3)SO_3^{3-}$	-	-	-	-9,75	-8,17
$AuS_2O_3(SO_3)_2^{5-}$	-	-	-9,71	-7,96	-5,80
H_2S	-1,65	-2,65	-3,15	-4,15	-5,15
SO_4^{2-}	-7,46	-4,58	-4,05	-2,99	-1,74
Fe^{++}	-	-	-	-8,22	-4,76

Прочерки («-») в таблице означают концентрации менее принятых значащими 10^{-10} моль/кг.

Концентрации данных комплексов незначительны и максимальные значения составляют 10^{-6} мг/л (*горизонт 1*). Идет осаждение на поверхности сульфидов за счет электрохимического процесса и собственно самородного золота (найдено 68 золотин).

В средней части разреза образуется плотный железо-кремнистый песчаник (*hardpan, горизонт 2*), в котором выявлено в 7.5 раз меньше знаков золота. Эта зона отмечена ограниченным доступом кислорода, и Au осаждается на своеобразном **окислительно-восстановительном барьере**. В кислых условиях и Eh близких к нулевым значениям ($\text{pH} < 2.73$, $E_h < 0.1$ В, табл. 3) растворы способны переносить золото в количестве более 10^{-3} мг/л преимущественно в тиосульфатных комплексах $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ (5).



Дестабилизация золотосодержащих комплексов будет происходить 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) в присутствии таких восстановителей как органическое вещество и ионы Fe^{2+} ; 3) при повышении pH, когда золото восстанавливается с осаждением на уже существующей поверхности самородных частиц [Hyland, Bancroft, 1989; Mycroft et al., 1995].

В *горизонте сланцев и почвенном слое* содержание золота достигает величин 0.42-0.35 г/т. Самородного видимого золота нами здесь не найдено.

Вышеизложенное является доказательством второго защищаемого положения: ***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 ($\text{pH} < 4$, $\text{Au}(\text{HS})_2^- > 10^{-6}$ мг/л). При развитии процесса, в условиях образования $\text{S}_{(эл)}$, происходит резкое увеличение миграционной способности золота за счет образования прочных тиосульфатных комплексов $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ (до 10^{-3} мг/л при $\text{pH} < 1.6$). Именно их распад приводит в обильному переосаждению Au^0 на окислительно-восстановительных барьерах в теле отвала.***

3. Критерии сходства и различия золота техногенно-минеральных образований и экзогенных месторождений. Изученные ТМО различались по типу складирования вещества (намывные и насыпные), способу извлечения золота и рудно-формационной принадлежности исходной минерализации. При исследовании оценивались такие параметры, как: содержание Au, размер частиц, морфология, химический состав золота и степень его преобразования по сравнению с первичными рудами.

Намывной тип ТМО образуется в результате гравитационного обогащения, в плане выглядит как конус выноса вещества или руды, в который сливают

«хвосты» обогащения. Осаждение вещества зависит от смены динамики потока и подчинено процессу механической дифференциации. В вершине конуса отвалов расположены грубообломочные, а по мере продвижения к периферии – более мелкообломочные осадки [Наумов, 2010]. *Насыпной тип* характеризуются наиболее беспорядочным распределением литологических разностей осадков и представлен в виде отвалов (насыпей), формирование которых проходит путем постоянного наслоения новых порций грубообломочного материала и выравнивания прежних. Здесь вещество подвергается процессам механической и физико-химической интеграции и дифференциации вещества [Наумов, 2010].

Среди экзогенных месторождений Au аналогами техногенно-минеральных образований являются месторождения кор выветривания, зоны окисления и россыпи. Ниже представлен комплекс отличительных признаков, характерных для золота природных объектов:

1) В россыпях золота *распределяется по крупности, уплотненности, «массивности» и «уплотненности»* на путях своей миграции. В устьевой зоне россыпей, в участках близких к выходам коренных источников Au и промежуточных коллекторов – золото крупное, среднее, в сростках, на периферии, дальше от источника поступления материала – Au тонкое, мелкое. Месторождения кор выветривания и зон окисления сульфидных руд характеризуются дифференциацией золота по разрезу и *формированием горизонта вторичного золотого обогащения.*

2) В россыпях в результате транспортировки на поверхности золотин можно выделить следующие *механические преобразования*: пустоты, отпечатки, образованные в результате высвобождения Au от сростков первичных минералов, окатывание частиц, истирание, сковывание.

3) *Диспергация видимых самородных частиц* в россыпях происходит за счет механических процессов, в то время как в корах выветривания и зонах окисления главенствующими являются процессы химического растворения. В результате на поверхности золотин образуются скульптуры растворения в виде «шагреновой» поверхности, «притупленных» или сглаженных вершин и ребер и др.

4) *Укрупнение отдельных золотин и формирование более крупных агрегатов* характерно преимущественно для месторождений кор выветривания и зон окисления. Это происходит как за счет механического слипания частиц Au, так и химического осаждения, и нарастания «нового» золота на более «массивные» золотины. Новообразованное золото представлено нано- и микрочастицами округлых, неправильных и чешуйчатых форм на поверхности собственно самородных частиц, в ассоциации с гипергенными минералами, а также в виде частиц более крупных кристаллов и их сростков. Иногда наросты нано- и микрочастиц «нового» Au обнаруживаются и на поверхности золотин из россыпных месторождений.

5) *Изменение цвета золотин и образование пленок, корочек, налетов и сростков золота с гипергенными минералами* (гидроксидами Fe, Mn, глинистыми минералами и др.).

6) *Изменение химического состава золотин и формирование высокопробных кайм и прожилков* характерны для всех экзогенных месторождения золота.

Все вышеперечисленные признаки установлены для золота из ТМО изученных месторождений (табл. 4, прил.) Обнаружено, что вне зависимости от типа складирования вещества, способа обогащения и размерности самородных частиц, золото активно подвергается поверхностным процессам преобразования. Чаще всего они выражены в виде различных нано- и микроаростов золота разных форм на поверхности золотин и в ассоциации с гипергенными минералами. Однако, наиболее яркие преобразования выражены в объектах: а) где присутствует обилие сульфидных минералов; б) где применялось амальгамирование. При наличии большого количества сульфидов в ТМО образуются минерализованные растворы, близкие к кислым дренажным водам, которые растворяют самородные частицы из сульфидов. Растворенное золото, мигрируя, осаждается на геохимических барьерах, образуя самородные выделения и формируя горизонт вторичного обогащения. Наличие амальгам способствует укрупнению, реже диспергированию золотоносных фаз.

В целом, объекты насыпного типа являются аналогами кор выветривания или зон окисления, где главенствующими являются химические процессы преобразования золота. Для таких объектов обнаружено образование горизонта вторичного золотого обогащения, образование «нового» золота. В объектах намывного типа преобразование золота подчиняется процессам, аналогичным протекающим в россыпных объектах, где определяющим являются механические процессы с незначительной трансформацией поверхности золотин при высоких отношениях в системе вода-порода. Подтверждением этому является гранулометрическое распределение золота вдоль профиля выноса вещества и образование высокопробных кайм и прожилков в золотилах.

Таким образом, вышеизложенное является доказательством третьего защищаемого положения: ***Вне зависимости от типа складирования вещества, способа обогащения и размерности самородных частиц, в ТМО золото 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.***

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере ТМО колчеданно-полиметаллических месторождений, определены основные минералого-геохимические характеристики, условия миграции и концентрирования золота.

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

В результате анализа выделены внешние и внутренние типоморфные признаки, доказывающие, что золото 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.

Вне зависимости от типа складирования вещества, способа обогащения и размерности самородных частиц, в ТМО золото активно подвергается поверхностным процессам преобразования. Чаще всего они выражены в виде различных нано- и микронаростов золота разных форм. Однако, наиболее яркие преобразования выражены в объектах: а) где присутствует обилие сульфидных минералов; б) где применялось амальгамирование.

Результаты проведенных исследований позволяют расширить представление об условиях его миграции и формах переотложения и предложить физико-химические механизмы этого процесса. Они по своей сути подобны тем, которые проявляются в природных объектах, однако приводят к более широкому разнообразию минеральных видов и морфологии выделений, причем в узких интервалах разреза складированных насыпных отходов обогащения.

Список научных трудов по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах

1. **Хусаинова А.Ш.**, Наумов В.А., Наумова О.Б. Дифференциация частиц золота из отвалов гравитационного обогащения руд Гарданского месторождения // Вестник Пермского государственного университета. Геология, 2019, т. 18, № 3, с. 276-285.
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.

Публикации в материалах научных мероприятий

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.** Золотоносность скарново-метасоматического месторождения Гардан и сопряженной с ним россыпи р. Бай-Сют (Тыва) // Металлогения древних и современных океанов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2015, с. 181-185.
3. **Хусаинова А.Ш.** Типоморфизм золота из техногенных отвалов бассейна рр. Тура, Ис (Урал) // Металлогения древних и современных океанов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2016, с. 176-178.
4. **Хусаинова А.Ш.** Типоморфизм золота из техногенно-минеральных образований россыпей Краснотурьинского района (Северный Урал) // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам IX Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молодых ученых): в 2 т. Пермь, 2016, с. 47-48.
5. **Хусаинова А.Ш.** Некоторые факты и следствия техногеогенного рудообразования золота // Материалы Шестой Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования». М.: ИГЕМ РАН, 2016, с. 377-380.
6. Наумов В.А., **Хусаинова А.Ш.** Влияние сезонного промораживания и прогревания сульфидов на частицы золота в техногенно-минеральных образованиях // Сборник докладов Девятого международного конгресса «Цветные металлы и минералы», 2017, с. 942-951.
7. **Хусаинова А.Ш.** Самородное золото в отвалах Ново-Урского месторождения (Салаир) // VIII Всероссийская научно-практическая конференция «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России»: материалы конференции. Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, 2018, с. 172-175.
8. **Хусаинова А.Ш.** Трансформация самородного золота в техногенных отвалах Урского рудного поля // Всеросс. науч. конференции с междунар. уч.

«Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами»: сборник конференции. БНЦ СО РАН, Чита, 2018, с. 383-386.

9. **Хусаинова А.Ш.** Признаки гипергенных преобразований в отвалах золоторудных и россышных месторождений // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле: материалы конференции. ИГМ СО РАН, ИНГГ СО РАН. Новосибирск, 2018, с. 665-667.

10. **Хусаинова А.Ш.** Трансформация золота в отвалах колчеданно-барит-полиметаллических руд // 57 Международная научная студенческая конференции МНСК-2019: материалы конференции. Новосибирск: НГУ, 2019.

11. **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.

12. **Alfia Khusainova**, Vladimir Naumov, Oksana Naumova Supergene gold transformation in technogenic mineral formations // E3S Web Conf. 16th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-16) and 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference), V. 98, 2019. DOI: 10.1051/e3sconf.20199801028.

13. **Alfia Khusainova** Supergene Gold In The Gold-Bearing Wastes Of Sulfide Deposits // Mine Water: Technological and Environmental Challenges. Proceedings of International Mine Water Association Conference, 2019, Perm, Russia, pp. 504-508.

14. **Alfia 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.

15. **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.

ПРИЛОЖЕНИЕ

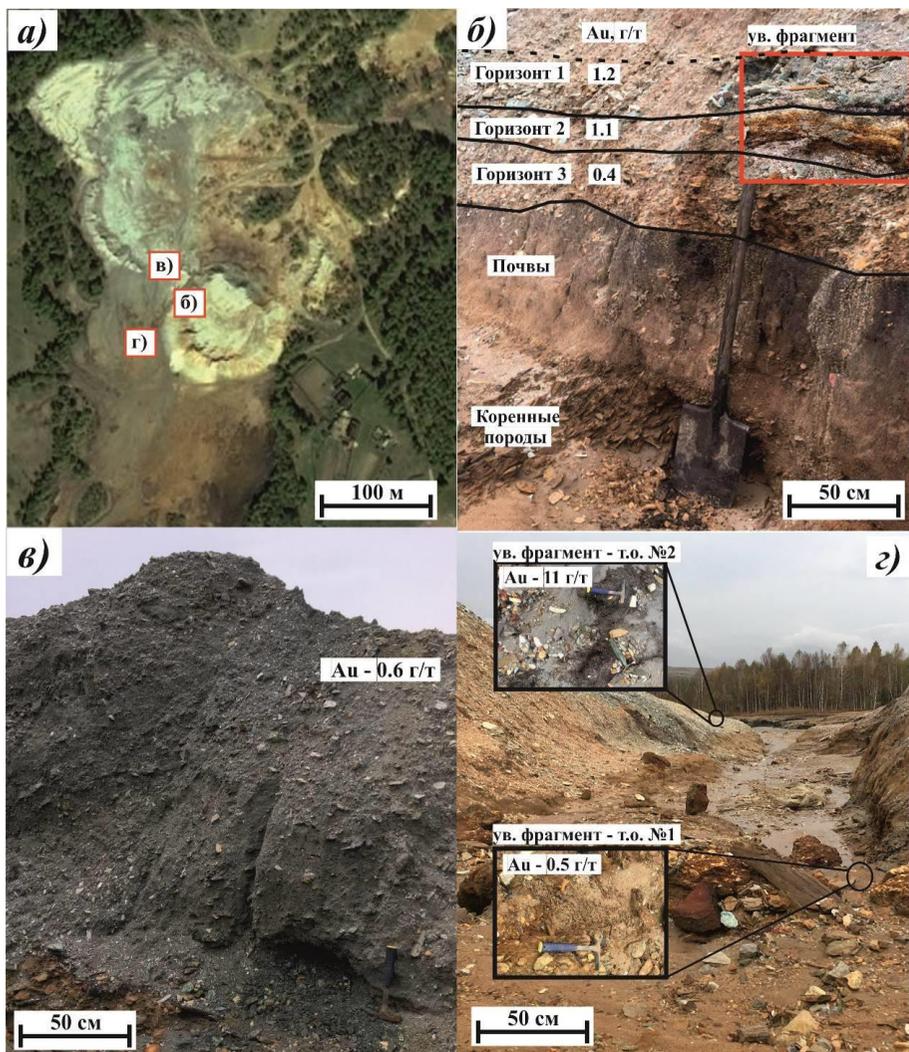


Рисунок 1. Объекты исследования Ново-Урского хвостохранилища: а) космоснимок с отмеченными объектами исследования; б) разрез отвала кварц-баритового состава; в) разрез отвала кварц-пиритового состава; г) намывные отложения.

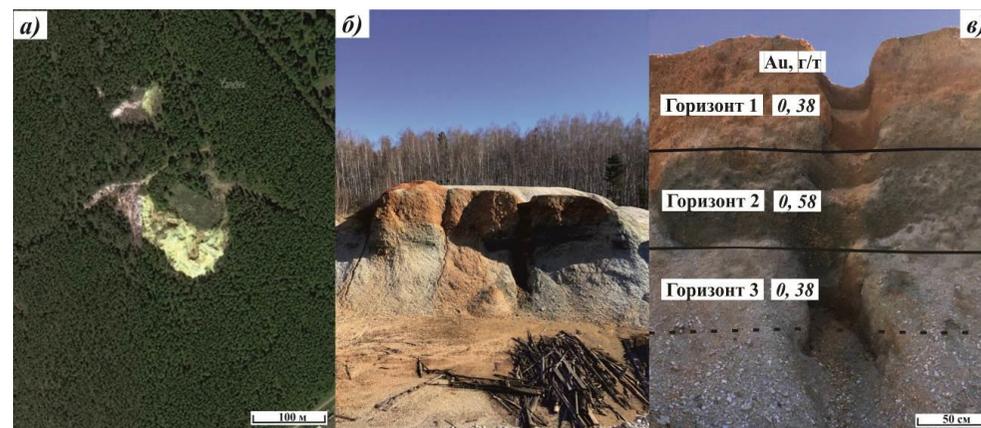


Рисунок 2. Хвостохранилище Белоключевского месторождения: а) космоснимок; б) общий вид насыпи; в) разрез с горизонтами.



Рисунок 3. Змеиногорское хвостохранилище: а) космоснимок; б) общий вид; в) насыпь ТМО.

Таблица 1. Типоморфные характеристики золота из ТМО Ново-Урского и Белоключевского месторождений.

Объекты		Ново-Урское				Белоключевское			
Параметры		1,1				0,60			
Содержание, г/т (среднее)									
Гранулометрия	Класс, мм	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1
	Кол-во, %	3	10	56	31	35	41	18	6
Морфология		1. Интерстициального и кристаллического облика; 2. Изометричной формы уплощенного облика; 3. Вытянутые таблитчатые формы.							
Микроскульптуры поверхностей 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 петровскому, тиманниту, колорадоиту и др.; 5. Включения зерен и минеральные парагенезисы с баритом, халькопиритом, кальцитом, кварцем.				1. Ступенчатые формы и микрослоистость; 2. Скульптуры растворения; 3. Ячеистый рельеф (скульптуры растворения), которые заполнены новообразованными частицами. 4. Включения зерен барита.			
Химический состав (микронзондовый 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.			

Таблица 2. Типоморфные характеристики золота Змеиногорского месторождения.

Объекты		Техногенные отложения (ТМО)				Первичные руды				Окисленные руды			
Параметры		Au – 0,87 г/т; Ag – 21 г/т				Au – 0,7 г/т; Ag – 290 г/т				Au – 15 г/т; Ag – 100 г/т			
Гранулометрия	Класс, мм	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	<0,1
	Кол-во, %	9	24	14	53	2	10	32	56	21	17	38	24
Морфология		1. Идиоморфные комковидного облика и неправильной формы с элементами кристалличности; 2. Изометричной формы уплощенного облика; 3. Уплощенного облика, состоящие из микронной толщины пластинчатых кристаллов; 4. Агрегатного строения («конгломераты»).				1. Идиоморфной формы уплощенного облика, иногда с элементами кристалличности. 2. Кристаллического облика (кристаллы, сростки, интерстиционные выделения); 3. Неправильной формы комковидного облика.				1. Идиоморфной и неправильной формы комковидного облика.			
Микроскульптуры поверхностей Au		1. Наросты Au «губчатых» форм на поверхности золотин; 2. Наросты Au нано- и микронного размера чешуйчатых, неправильных и округлых форм на поверхности самородных частиц и в ассоциации с гипергенными минералами; 3. Мозаичное золото (в виде отдельных блоков с ярко выраженными трещинами); 4. Скульптуры растворения; 5. Микрослоистость (ступенчатость); 6. Пленки различных составов (гидроксиды Fe, Mn), сростки с баритом, мусковитом, каолинитом.				1. Наросты Au нано- и микронного размера округлой и «губчатых» форм на поверхности самородных частиц и в ассоциации с гипергенными минералами; 2. Гладкая ровная поверхность; 3. Микрослоистость (ступенчатость); 3. Сростки с гидроксидами Fe, Mn, кварцем, баритом.				1. Наросты Au «губчатых», округлых, неправильных форм на поверхности золотин; 2. Сростки с малахитом, баритом.			
Химический состав (микронзондовый анализ)		1. Частицы с блоковым строением (2 фазы): 1 (более темная) – Ag до 42 мас. %, Au до 58 мас. %; 2 (более светлая) – Ag до 25 мас. %, Au до 75 мас. %. 2. Частицы с однородным составом: 1 – Ag до 56 мас. %, Au до 44 мас. %; 2 – Ag до 34 мас. %, Au до 66 мас. %; 3 – Ag до 28 мас. %, Au до 74 мас. %. Каемки – Ag до 13 мас. %, Au до 98 мас. %.				1. Частицы с блоковым строением (2 фазы): 1 (более темная) – Ag до 66 мас. %, Au до 31 мас. %, Hg до 5 мас. %; 2 (более светлая) – Ag до 44 мас. %, Au до 50 мас. %, Hg до 6 мас. %; с прожилками Ag до 16 мас. %, Au до 84 мас. %. 2. Частицы с однородным составом – Ag до 41,12 мас. %, Au до 71,99 мас. %, с каемками – Ag до 24,3 мас. %, Au до 90,28 мас. %. 3. В гидроксидных пленках – включения золота до 100 мас. %.				1. Частицы с блоковым строением (2 фазы): 1 (более темная) – Ag до 56 мас. %, Au до 39 мас. %, Hg до 2 мас. %; 2 (более светлая) – Ag до 42 мас. %, Au до 58 мас. %. 2. Частицы с однородным составом – Ag до 44 мас. %, Au до 55 мас. %.			
Внутреннее строение (микроструктуры Au)		1. Блоковое (мозаичное) строение (12%); 2. Однородный состав (88%); 3. Каемки и прожилки мощностью до 10 мкм; 4. Сростки гидроксидами Mn, Fe, баритом, мусковитом, включения кварца.				1. Блоковое (мозаичное) строение (40 %); 2. Однородный состав (60 %). 3. Включения барита, кварца, бромаргентина, акантина, фенакита, аргриродита, титанита, сростки со сфалеритом, гидроксидами Mn, Fe.				1. Блоковое (мозаичное) строение (90 %), где между частями есть прожилки более высокопробного золота (~ 80-90 мас. %). 2. Однородный состав (10 %). 3. Включения галенита, кальцита, сростки и включения в золоте с платтнеритом.			

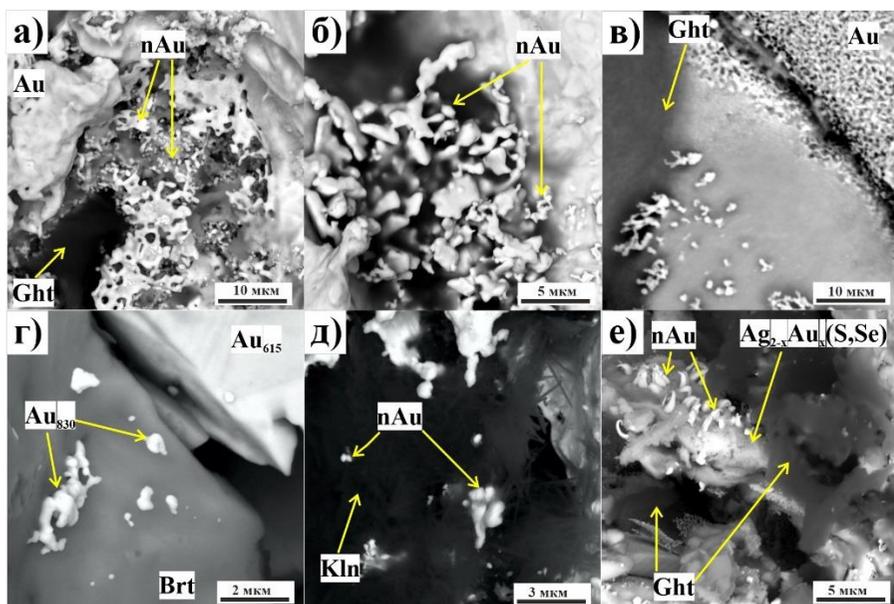


Рисунок 4. Новообразованные фазы Au на различных поверхностях: а) скопления нано- и микрочастиц Au «амебообразных» форм на поверхности золотины; б) скопления нано- и микрочастиц Au пластинчатых, чешуйчатых и сферолитовых форм на поверхности золотины; в) единичные зерна и скопления микрокристаллитов золота вытянутых форм; г) единичные зерна и скопления нано- и микрочастиц Au на поверхности зерна барита (Brt); д) ассоциация нано- и микрочастицы Au в каолините (Kln); е) вытянутые (дендритные) наночастицы в рыхлой пленке петровскита (Pet) и гидроксидов Fe (Gh). Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

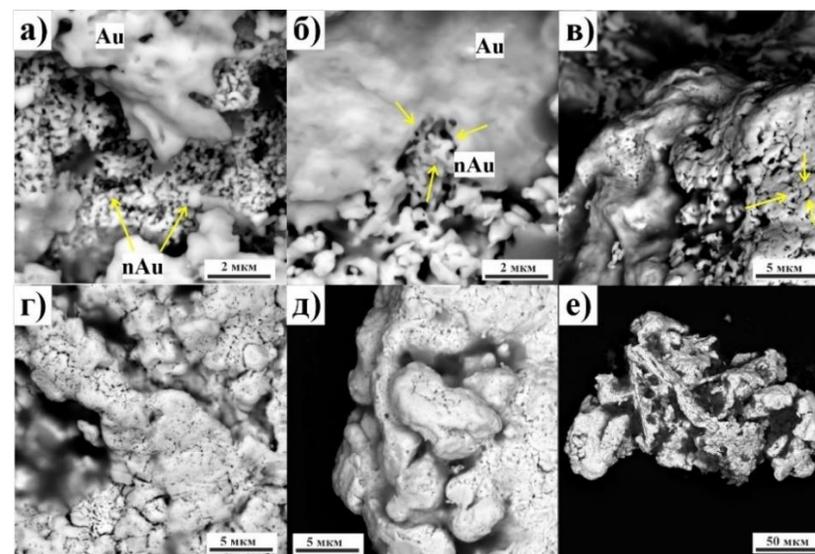


Рисунок 5. Механизм роста частиц агрегатного (глобулярного) строения золота из хвостохранилища Змеиногорской ЗИФ: а) скопление наночастиц Au, которые при укрупнении и соединении формируют губчатые формы; б-в) объединение массивного однородного золота и губчатых скоплений; г) пористая поверхность на золоте, образуемая в результате объединения нано- и микрочастиц; д) фрагменты отдельных глобул на поверхности основной золотины; е) общий вид частицы агрегатного строения, в углублениях которой расположены гидроксидные пленки. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

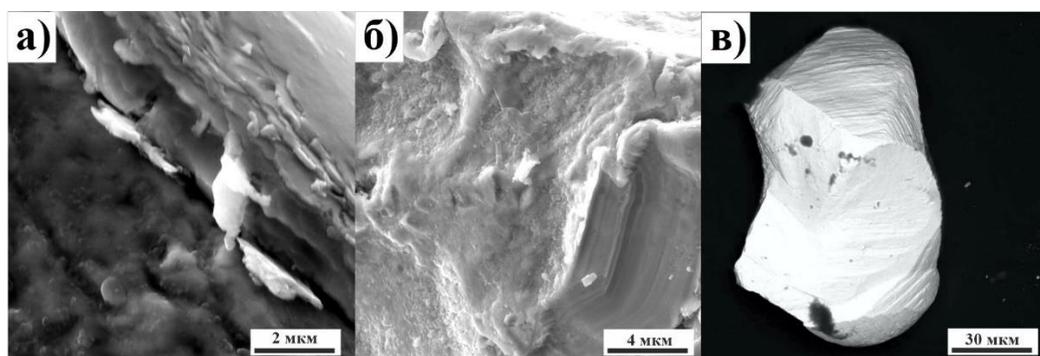


Рисунок 6. Скульптуры послынного роста на поверхности самородных частиц: а, б) нанослоистость; в) элементы слоистости на кристалле золота. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

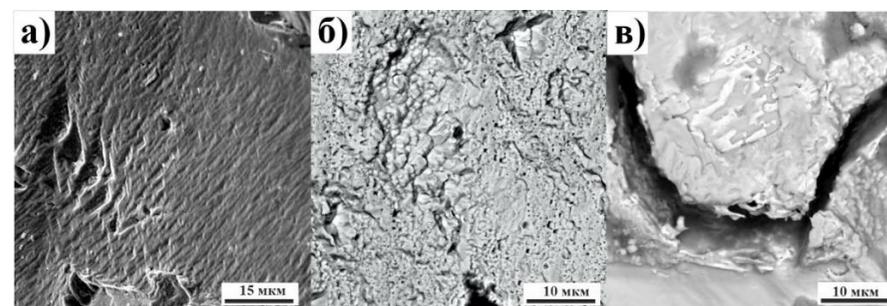


Рисунок 7. Микроскульптуры растворения: а) натечный рельеф, показано направление протекания растворов по поверхности золотины; б) выщелоченный рельеф с микроямками; в) изъеденная поверхность с своеобразными желобками. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

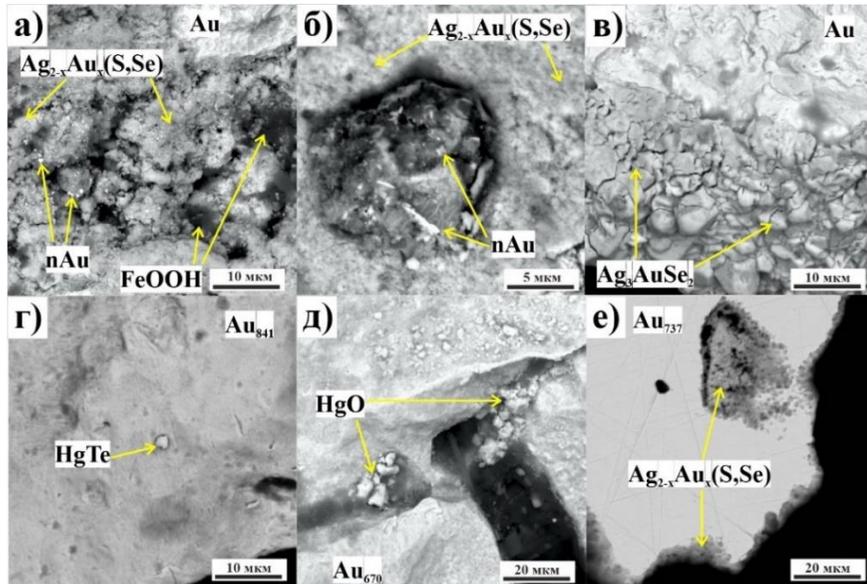


Рисунок 8. Гипергенные новообразования на поверхности золота из отвала ТМО Ново-Урского месторождения: а) петровскитовая пленка с нано-частицами золота; б) сростки нанозолота чешуйчатой формы в петровскитовой пленке; в) наросты фишессерита на поверхности золотины; г) сросток золота с колорадоитом (HgTe); д) наросты округлой формы, близкие по составу к монтроидиту (HgO); е) полированный срез золотины с петровскитовой пленкой в углублении и по краям частицы. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

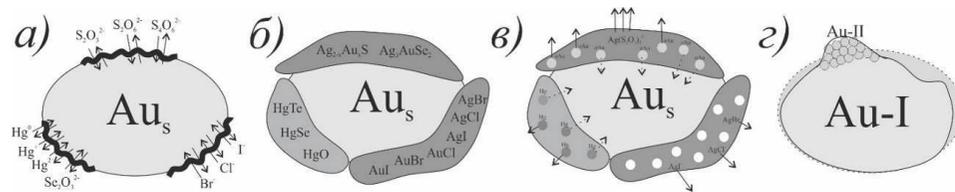


Рис. 9. Механизм преобразования гипергенных новообразований и рост самородного Au: а) взаимодействие Au и поровых растворов – растворение верхнего поверхностного слоя, диффузионный обмен; б) образование вторичных минеральных парагенезисов (пленки, наросты); в) расположение микроэмульсионных включений Au, Ag, Hg; стрелочками обозначены разрушение вторичных парагенезисов с выносом более подвижных комплексов и осаждение наночастиц; г) результат взаимодействия самородной частицы с поровыми растворами – рост гипергенного Au второй генерации (Au-II).

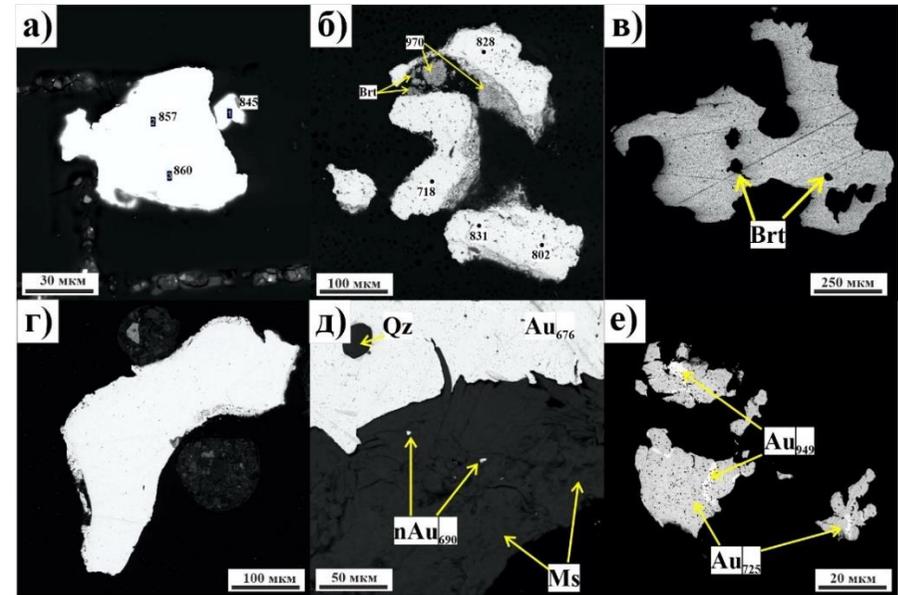


Рисунок 10. Микроструктуры Au: из ТМО Ново-Урского месторождения: а) микронаросты золота на границе с поверхностью основной частицы Au; б) золотины, состоящая из нескольких частей, с наростами «губчатого» золота на контакте с основной золотиной; из ТМО Белоключевского месторождения: в) включение зерен барита внутри золотины; г) ажурные края; из ТМО Змеиногорского месторождения: д) сростки золота с кварцем и микро-частицы Au в мусковите; е) прожилки высокопробного золота внутри частицы.

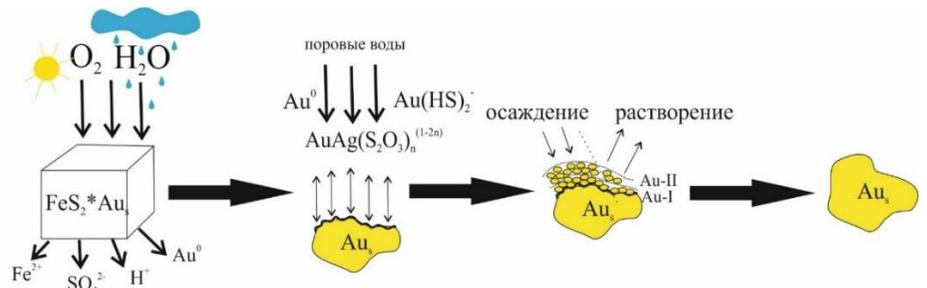


Рис. 11. Схематическая физико-химическая модель преобразования золота в отвалах колчеданно-полиметаллических месторождений.

Таблица 4. Сравнение основных признаков преобразования Au в природных и техногенных объектах.

Признаки преобразования Au в экзогенных месторождений (коры выветривания - KB, зоны окисления - ZO, россыпи - P)	Намывные отвалы	Насыпные отвалы
1. Разделение золотин по крупности, уплощенности, «массивности» и «уплотненности» на путях их миграции (P).	ТМО Тарданского месторождения; ТМО Чернореченской россыпи;	-
2. Образование горизонтов вторичного золотого обогащения (KB, ZO).	-	ТМО Ново-Урского и Белоключевского месторождений.
3. Механические преобразования частиц: высвобождение от сростков (KB, ZO, P), окаывание, истирание, скрывание (P).	ТМО Тарданского месторождения;	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногогорского месторождений
4. Образование скульптур роста в виде мелких наростов Au на поверхности золотин (KB, ZO, P).	ТМО Чернореченской россыпи, россыпей рр. Ис и Тура, месторождений Акжал, Яковлевское и Президент	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногогорского и Даубайского месторождений
5. Образование скульптур растворения («шагреневая» поверхность и др.) и образование гладкой ровной поверхности частиц (KB, ZO).	-	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногогорского месторождений
6. Изменение химического состава золотин и образование высокопробных кайм и прожилков, (KB, ZO, P).	ТМО Тарданского месторождения;	ТМО Змеиногогорского месторождения
7. Укрупнение частиц (преобладает в KB, ZO, меньше в P).	ТМО Чернореченской россыпи, россыпей рр. Ис и Тура	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногогорского месторождений
8. Диспергация частиц (KB, ZO, P).	ТМО Чернореченской россыпи, россыпей рр. Ис и Тура	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногогорского месторождений
9. Образование частиц «нового» Au в виде кристаллов и их сростков (KB, ZO).	-	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногогорского месторождений
10. Изменение цвета золотин и образование пленок, корочек, налетов и сростков золота с гипергенными минералами (гидроксидами Fe, Mn, глинистыми минералами, и др.) (KB, ZO, P).	ТМО Чернореченской россыпи, россыпей рр. Ис и Тура	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногогорского месторождений