

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
д.г.-м.н. Калинин Юрий Александрович

Новосибирск, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	11
1.1. ГЕОХИМИЯ ЗОЛОТА	11
1.2. ПОВЕДЕНИЕ ЗОЛОТА В ГИПЕРГЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....	12
1.3. ПОВЕДЕНИЕ ЗОЛОТА В ТЕХНОГЕННО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ.....	16
1.4. ИЗУЧЕННОСТЬ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	19
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ	24
2.1. ОПРОБОВАНИЕ И ОБОГАЩЕНИЕ ПРОБ	24
2.2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ.....	25
2.3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	28
ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	29
3.1. ТМО НОВО-УРСКОГО И БЕЛОКЛЮЧЕВСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩ	30
3.1.1. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА.....	30
3.1.2. ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТМО МЕСТОРОЖДЕНИЙ	32
3.1.3. НОВО-УРСКОЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ.....	32
3.1.4. БЕЛОКЛЮЧЕВСКОЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ	35
3.2. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ ЗМЕИНОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ	36
3.2.1. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА.....	36
3.2.2. ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТМО МЕСТОРОЖДЕНИЯ	38
ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. ТИПОМОРФНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОЛОТА	40
4.1. НОВО-УРСКОЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ.....	40
4.1.1. ТМО КВАРЦ-БАРИТОВОГО СОСТАВА	40
4.1.2. ТМО КВАРЦ-ПИРИТОВОГО СОСТАВА.....	44
4.1.3. ТМО НАМЫВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ	45
4.2. БЕЛОКЛЮЧЕВСКОЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ.....	51
4.3. ЗМЕИНОГОРСКОЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ	57
4.3.1. ЗОЛОТО ИЗ ПЕРВИЧНЫХ РУД.....	57
4.3.2. ЗОЛОТО ИЗ ОКИСЛЕННЫХ РУД	60

4.3.3. ЗОЛОТО ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ.....	62
4.4. КОМПЛЕКС ПРИЗНАКОВ ГИПЕРГЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОТА	66
ГЛАВА 5. ОБОБЩЕННАЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОТА.....	74
5.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ.....	75
5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЗОЛОТА В СИСТЕМЕ ТМО	82
5.3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗОЛОТА	91
ГЛАВА 6. СРАВНЕНИЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩ НАСЫПНОГО И НАМЫВНОГО ТИПА	93
6.1. ХВОСТЫ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ КОРЕННЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТАРДАН	94
6.2. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ ЧЕРНОРЕЧЕНСКОЙ РОССЫПИ.....	101
6.3. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКЖАЛ	106
6.4. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАУБАЙ	110
6.4.1. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЯКОВЛЕВСКОЕ И ПРЕЗИДЕНТ	110
6.4.2. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАУБАЙ.....	112
6.5. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ ОТЛОЖЕНИЙ РР. ИС И ТУРА	116
6.6. КРИТЕРИИ СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ ТЕХНОГЕННО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ЭКЗОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ АВТОРА	125
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ	128
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	130
ПРИЛОЖЕНИЯ	150

ВВЕДЕНИЕ

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; Wierchowiec 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; Wierchowiec 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) россыпей Чернореченская и бассейна рр. Ис и Тура (Урал).

Фактический материал. Первичный материал с Ново-Урского хвостохранилища был отобран в ходе полевых работ сотрудниками лаборатории Прогнозно-металлогенических исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева (ИГМ СО РАН) Калининым Ю.А. и Кирилловым М.В. в 2015-2016 гг. Дополнительные пробы из ТМО Ново-Урского и Белоключевского месторождений получены автором за период 2017-2019 гг.

Пробы из ТМО Змеиногорского хвостохранилища представлены опытно-производственным участком пробоподготовки ИГМ СО РАН (Бондаренко В.П.), первичные и окисленные руды, а также отдельные образцы, отобраны автором непосредственно на хвостохранилище месторождения в ходе полевых работ в 2019 г. В этот же период был отобран вещественный материал с ТМО золоторудных месторождений Акжал, Даубай, Яковлевское и Президент, расположенных в Восточном Казахстане.

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 (под руководством д.г.-м.н. Наумова В.А., д.г.-м.н. Наумовой О.Б.) в лаборатории осадочных полезных ископаемых (ЛОПИ). Кроме того, за этот период были изучены коллекции вещества ТМО и частиц золота, отобранные сотрудниками Естественно-научного института (ЕНИ ПГНИУ), из техногенных отложений Чернореченской россыпи и бассейна рр. Ис и Тура.

Научная новизна.

1. Впервые изучены типоморфные характеристики золота (размер частиц, морфология, химический состав и внутреннее строение золота) из продуктов переработки руд Ново-Урского, Белоключевского и Змеиногорского месторождений.

2. Выделены внешние и внутренние признаки, доказывающие, что золото, недоизвлеченное при промышленной добыче, подверглось существенным преобразованиям в техногенных отвалах.

3. 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.

1. Показана и доказана перспективность ТМО месторождений золото-сульфидного типа на примере Ново-Урского, Белоключевского и Змеиногорского хвостохранилищ.

2. 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.

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

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

Основные защищаемые положения:

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

2. Специфика минеральных парагенезисов техногенно-минеральных образований (обилие пирита и выделений самородной серы) определяет условия миграции золота. В области метастабильной устойчивости FeS_2 , Au неизбежно осаждается на его поверхности при достижении пересыщения поровых вод ($\text{pH } 4$, $\text{Au}(\text{HS})_2^- > 10^{-6}$ 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 золотинок.

Апробация работы. 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 обработки 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, и в 15 публикациях, включенных в материалы научных мероприятий.

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., Путина 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.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. ГЕОХИМИЯ ЗОЛОТА

Золото (Au) – элемент с атомным номером 79, d-металл из группы благородных, кларк – $(4-5) \cdot 10^{-7} \%$ (по А.П. Виноградову). Золото образует мягкий, ковкий металл золотисто-желтого цвета. Твердость по шкале Мооса – 2-3. Удельный вес варьирует в зависимости от состава – $12.0-19.3 \text{ г/см}^3$. Оттенки цвета определяются его пробностью. Золото кристаллизуется в кубической сингонии. Температура плавления – $1065-1421^\circ\text{C}$. Общее количество установленных минеральных видов и разновидностей золота – 46 [Спиридонов, 2010].

В твердой фазе золото может присутствовать в собственно самородной форме, в сростках с минералами, в виде пленок на поверхности частиц, в сорбированном виде в ассоциации с глинистыми минералами, в химически связанном состоянии, входя в кристаллическую решетку минералов. В истинных растворах золото находится в виде комплексных соединений, а также в виде коллоидных растворов. При повышении температур золото и его сплавы способны переходить в газовое агрегатное состояние и улетучиваться (мигрировать). По происхождению выделяют: хемо-, био-, пневматолито- и гидротермальное золото [Спиридонов, 2010].

Растворение самородного Au происходит в результате поверхностных реакций (процесса солубилизации), с помощью ряда окислителей в присутствии ряда лигандов (L), формирующие соединения типа Au(I)L_2 и/или Au(III)L_4 , в то время как Ag растворяется в диффузионном режиме. Золото может переходить в Au^{1+} , Au^{3+} и Au^0 формы. В гипергенных условиях с золотом образуются хлоридные, гидроксильные, тиосульфатные комплексы и высокомолекулярные органические гуминовые и фульвовые кислоты [Puddephatt, 1978; Boyle, 1979; Росляков, 1981; Mann, 1984; Королева и др., 1984; Бакулина, Минова, 1997; Hough et al., 2007, 2008; Williams-Jones et al., 2009; Shuster, Reith, 2018].

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 хуже подвергаются растворению, так как обладают повышенной устойчивостью [Росляков, 1981].

В результате перехода золота в раствор, происходит его 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.

1.2. ПОВЕДЕНИЕ ЗОЛОТА В ГИПЕРГЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Основы минералогии, геохимии и типоморфизма золота из коренных и россыпных месторождений, кор выветривания и зон окисления активно развивались и изучались с начала XX века [Liversidge, 1897; Жемчужный, 1922; Dunn, 1929; Friese, 1931; Звягинцев, 1941; Билибин, 1955; Смирнов, 1955; Альбов, 1960; Моисеенко, 1965; Петровская, 1973; Петровская и др., 1980; Росляков, 1981; Мурзин, Малюгин, 1987; Амосов, Васин, 1995; Шило, 2002; Никифорова и др., 2005, 2013; Николаева, Яблокова, 2007; Николаева и др., 2015 и др.]. Многие положения из этих работ не потеряли значения и до настоящего времени.

Среди исследователей сформировались две крайние точки зрения на поведение золота в экзогенной среде. Первая группа исследователей полагала, что миграция существует, но роль ее настолько мала, что ее можно не учитывать [Смирнов, 1955; Крейтер и др., 1958]. Другая – наоборот, считает ремобилизацию металла крайне важной, объясняя формирование повышенных концентраций золота в верхних горизонтах месторождений [Dunn, 1929; Freiese, 1931; Emmons, 1935; Альбов, 1960; Нестеров, 1973; Петровская, 1973; Росляков, 1981; Mann, 1984; Калинин и др., 2006; Наумов, 2010; Shuster, Reith, 2018; Dunn et al., 2019; Kalinin et al., 2019 и др.].

Условия подвижности золота и других элементов в различных экзогенных обстановках изучаются с помощью экспериментальных исследований, термодинамических расчетов и непосредственными наблюдениями форм нахождения золота в поверхностных и рудничных водах в пределах золоторудных полей и месторождений [Гаррелс, Крайст, 1968; Плюснин, Погребняк, 1979; Росляков, 1981; Черепнин, Бернатонис, 1981; Mann, 1984; Vlassopoulos, Wood, 1990; Гаськова и др., 2000; Шварцев, Дутова, 2001; Xia, 2008; Kirillov et al., 2018; Журавкова и др., 2019; Dunn et al., 2019].

Значительное число публикаций посвящено изучению и выделению типоморфных признаков золота и сопутствующих минеральных ассоциаций зон гипергенеза на различных месторождениях [Mann, 1984; Нестеренко и др., 1985; Неронский и др., 1988; Калинин и др., 2006; Николаева, Яблокова, 2007; Хазов, Петровский, 2007; Осовецкий, 2012, 2013; Fairbrother et al., 2012; Reith et al., 2012; Никифорова и др., 2013, 2018; Николаева и др., 2015; Литвинцев и др., 2016; Lalomov et al., 2017; Kirillov et al., 2018; Shuster, Reith, 2018; Кузнецова и др., 2019; Хусаинова и др., 2019; Dunn et al., 2019; Kalinin et al., 2019].

Традиционно, в гипергенных объектах золото разделяют на остаточное (аллотигенное) и новообразованное (аутигенное). Независимо от его происхождения, Au подвергается процессам укрупнения и разрушения, которое проявляется, соответственно, в структурах роста и растворения. При этом, установить истинную природу этих преобразований зачастую трудно [Петровская,

1973; Николаева, Яблокова, 2007; Хазов и др., 2010; Kirillov et al., 2018; Wierchowies et al., 2018]. Различие между 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].

По литературным данным можно выделить ряд признаков, доказывающих преобразование золота в гипергенных условиях [Петровская, 1993]. Это, например, наличие острых углов и ребер, гладких граней у новообразованных частиц, тогда как у остаточного золота они сильно сглажены. Также присутствие на поверхности первичных золотинок мелких кристаллов, преимущественно октаэдрических форм, «горчичного» золота и почковидных пленок. Характерной особенностью частиц, длительное время подвергавшихся воздействиям гипергенных факторов, является «шагреновая» поверхность, которая обычно имеет пористый рельеф, возникающий при изменении состава и структуры периферических частей. Однако, главным доказательством генетической связи является ассоциация «нового» золота с гипергенными минералами, а именно, с гидроксидами железа и марганца, глинистыми минералами.

В последнее время наночастицы золота все больше и больше признаются как критический компонент в процессе выветривания, биоминерализации и в образовании геохимических аномалий. Частицы нанозолота обнаружены как компонент коллоидных и ионных растворов во многих геологических средах. Они обычно представлены изолированными дисперсионными частицами на глинистых минералах и гетите [Hong, Tie, 2005; Осовецкий, 2016; Shuster et al., 2017; Shuster, Reith, 2018 и др.]. Кроме того, наночастицы могут сливаться друг с другом и образовывать простые или сложные агрегаты аутигенного золота [Моисеенко, 2007; Hough et al., 2007, 2008; Осовецкий, 2016; Shuster et al., 2017 и др.]. Наночастицы золота осаждаются из коллоидных и минерализованных растворов на геохимических барьерах в связи с изменениями физико-химических условий среды (Eh и pH). Чаще всего отмечается, что нанозолото – высокопробное [Reith et al.,

2012; Wierchowiec et al., 2018]. Однако, показано [Ким, 1975; Кузнецова, 2011; Осовецкий, 2013; Николаева и др., 2015], что нанофазы 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 не совпадать.

Среди внутренних изменений чаще всего выделяют образование высокопробных кайм и прожилков [Петровская, 1973, 1993; Нестеренко, 1991], которые характерны для золотин россыпей и кор выветривания. Их образование объясняют электрохимическим процессом очищения золота от элементов-примесей.

Помимо значимой роли электрохимических процессов в преобразовании золота в гипергенных условиях, появляется всё больше доказательств, подтверждающих участие микроорганизмов в образовании твердых фаз золота [Hallbauer, 1975; Mossman, Dyer, 1985; Моисеенко, Маракушев, 1987; Амосов, Васин, 1993; Reith et al., 2006; Куимова, 2004; Куимова, Моисеенко, 2006; Rea et al., 2016; Reith et al., 2018; Shuster, Reith, 2018]. Экспериментальные работы показали возможность перекристаллизации золота бактериями *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Pseudomonas alcaligenes* и *Micrococcus luteus* и др. [Southam, Beveridge, 1994; Beveridge, 1989; Маракушев и др., 1989; Reith et al., 2006; Shuster, Southam, 2015], внутриклеточного зарождения «нового» золота бактериями и дрожжами [Коробушкина, Коробушкин, 1986; Коробушкина и др., 1989; Овчаренко и др., 1985], аккумуляцию и кристаллизацию золота микромицетами [Куимова, Жилин, 2002; Куимова, 2004]. Микроорганизмы могут проявлять свою жизнедеятельность не только в теплом и влажном климате [Fairbrother et al., 2012; Reith et al., 2012; Калинин и др., 2017; Shuster et al., 2017; Melchiorre et al., 2018], но и в арктических условиях [Reith et al., 2018]. Одна из форм минерализации биогенного золота – сфероиды или шарики, которые часто обнаруживают в месторождениях кор выветривания и россыпях [Watterson, 1992; Блюман и др., 2013; Калинин и др., 2017]. Размер подобных образований от микронных и субмикронных до несколько миллиметров. При этом, шарики Au имеют весьма разнообразную сложную форму

строения поверхности, в том числе губчатую, пористую, мозаичную, нарастание более мелких нано-шариков на поверхность Au [Блюман и др., 2013; Калинин и др., 2017]. Доказательством причастности к их образованию микроорганизмов служат не только биогенные формы (микрофосилии), но и химические элементы, характерные для живых организмов: Ca, Si, Fe, Mg, P, Mn, Al, K. Однако, многие исследователи указывают на то, что присутствие четких морфологических форм не может быть доказательством биогенной природы. И до сих пор данный вопрос остается дискуссионным.

1.3. ПОВЕДЕНИЕ ЗОЛОТА В ТЕХНОГЕННО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ

В настоящее время актуальным объектом исследования, образованным в зоне гипергенеза, являются хвостохранилища, представленные продуктами переработки колчеданных, полиметаллических, золоторудных и россыпных месторождений. Явления активного перераспределения золота в гипергенных условиях подтверждаются наблюдениями исследователей, старателей и практикой отработки россыпей [Freise, 1931; Кожевников, 1935; Ивенсен, 1938; Парий, Амосов, 1998; Беневольский, Иванов, 1999; Макаров, 2001 а, б; Ковлеков, 2002; Моисеенко, Палажченко, 2003; Банщикова и др., 2010; Наумов, 2010; Литвинцев и др., 2016; Макаров, Самородский, 2018; Kirillov et al., 2018; Wierchowicz et al., 2018; Кузнецова и др., 2019; Хусаинова и др., 2019, 2020]. В то же время, на целом ряде эксплуатируемых месторождений значимого золотого гипергенного обогащения не наблюдается, хотя локальное концентрирование отмечается практически повсюду.

Хвостохранилище – это горно-геологический объект, представляющий собой комплекс специальных сооружений и оборудования, предназначенный для хранения или захоронения отходов обогащения полезных ископаемых [Википедия, 17.03.2019], именуемых в специализированной литературе «хвостами» или техногенно-минеральными образованиями [Макаров, 2001; Наумов, 2010].

Под *техногенно-минеральными образованиями* (ТМО) понимают скопления минеральных веществ на поверхности Земли или в горных выработках, образовавшиеся в результате их отделения от массива и складирования в виде отходов горного, обогатительного, металлургического и другого производства [Макаров, 2001].

Среди отходов хвостохранилищ (ТМО) наибольший интерес представляют отходы обогащения высокосульфидных руд, изучение которых является актуальной задачей современной науки. Специфика исследований связана, прежде всего, с тем, что складированные отходы содержат значительные концентрации токсичных элементов и недоизвлеченных полезных компонентов, способных к активной миграции в окружающую среду [Смирнов, 1955; Brown, Jurinak, 1989; Blowes, Jambor, 1990; Blowes et al., 2014; Çelebi, Öncel, 2016; Оленченко и др., 2016; Рихванов и др., 2017; Lazareva et al., 2019 и др.]. Поэтому, проблеме окисления сульфидных минералов уделяется особое внимание [Buckley, Woods, 1987; Blowes et al., 2014; Marescotti et al., 2012; Wei et al., 2014 и др.]. Геохимические, минералогические, микробиологические аспекты трансформации вещества в условиях хвостохранилища активно изучаются во всём мире [Reith, McPhail, 2006; Бортникова и др., 2006; Рихванов и др., 2017; Kirillov et al., 2018; Wierchowicz et al., 2018 и др.].

Первые упоминания о формах переотложенного золота в отвалах древних разработок золоторудных месторождений и термин «новое» золото относятся к работе Ф.В. Фрейзе (1931), который обратил внимание на роль процессов вторичного обогащения отработанных россыпей, что в последующем способствовало их изучению и обнаружению в россыпях [Николаева, 1958; Яблокова, 1965; Попенко, 1982], корях выветривания и зонах окисления [Ким, 1975; Росляков, 1981; Нестеренко, 1991; Новгородова, 1995; Калинин и др., 2006, 2009; Савельева, Баранников, 2006].

Поведение золота в ТМО зависит от его форм нахождения, способа извлечения и складирования вещества [Ковлеков, 2002; Наумов, 1994, 2010; Литвинцев и др., 2016; Макаров, Самородский, 2018; Kirillov et al., 2018;

Wierchowicz et al., 2018; Брагин и др., 2019; Кузнецова и др., 2019]. Биологические и химические процессы в комбинации с климатом и геологической обстановкой определяют физико-химические условия среды и управляют процессами растворения, миграции и роста золота [Reith et al., 2012; Shuster, Reith, 2018; Dunn et al., 2019]. Реальным отличием ТМО от природных объектов является скорость протекания реакций и локализация на ограниченном пространстве. То, на что природа тратит миллионы лет, в техногенных объектах протекает за годы – десятки-сотни лет, образуя горизонты вторичного обогащения, не уступающие по перспективности рудным объектам.

Это подтверждается все большим количеством работ, посвященных изучению ТМО золоторудных и россыпных месторождений России и Мира [Макаров, 2001; Ковлеков, 2002; Наумов, 2010; Литвинцев и др., 2016; Макаров, Самородский, 2018; Kirillov et al., 2018; Wierchowicz et al., 2018; Брагин и др., 2019; Кузнецова и др., 2019]. Согласно [Наумов, 2010; Осовецкий, 2013; Кузнецова и др., 2019], в ТМО самородное золото может присутствовать как в самородном состоянии, так и в виде твердых растворов с серебром и амальгамами на основе двух-, трех- и четырехкомпонентных систем элементов Au, Ag, Hg, Pb.

В зависимости от типа складирования переработанных руд выделяют разные типы техногенных фракций ТМО: намывные, насыпные (отвальные) и отвально-насыпные [Макаров, 2001; Шило, 2002; Наумов, 2010], которые, в свою очередь, определяют закономерности преобразования вещества, в частности золота, в гипергенных условиях. *Намывной тип* образуется в результате гравитационного обогащения. В плане выглядит в виде конуса-выноса вещества или пруда, 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* характеризуется 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. *Отвально-насыпной тип* образуется в результате переработки руд дражным способом.

Изучение золотоносности ТМО золотосодержащих сульфидных, золоторудных и россыпных месторождений активно развивается и имеет не только научную, но и практическую значимость. В практику входит повторная отработка ТМО месторождений Красноярского и Хабаровского края, Свердловской и Магаданской области и других регионов России. Так, например, анализ форм нахождения золота в шламохранилище золоторудного объекта Урала и куче выщелачивания месторождения Мурунтау (Узбекистан) позволил подготовить рекомендации для повышения степени извлечения золота в масштабах предприятий [Наумов и др., 2011]. Аналогичные работы позволили предприятиям осуществить повторную эксплуатацию отработанные россыпей Пр. Дарья, Белая и Лев. Дюсмакит в Аяно-Майском районе Хабаровского края, Иликан и Васильевский в Селемджинском районе Амурской области [Мирзеханов, 2005]. Активные работы по оценке запасов техногенных отвалов ведутся на ряде месторождений Казахстана (Жолымбет).

Таким образом, геологическая уникальность месторождений, разнообразие техногенных образований и специфические физико-химические условия в них, обуславливают актуальность поставленных задач для уточнения и выяснения общих закономерностей и механизмов преобразования золота на примере ТМО золото-сульфидного типа.

1.4. ИЗУЧЕННОСТЬ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

ТМО Ново-Урского и Белоключевского хвостохранилищ являются эталонными объектами для исследования различных аспектов геохимического поведения элементов в гипергенных условиях, им традиционно уделяется много внимания [Мягкая и др., 2013; Оленченко и др., 2016; Myagkaya et al., 2016 a, b;

2020; Saryg-ool et al., 2017; Рихванов и др., 2017; Gustaytis et al., 2018; Yurkevich et al., 2019; Lazareva et al., 2019; Bortnikova et al., 2019].

Первые работы по оценке золотоносности ТМО Ново-Урского и Белоключевского хвостохранилищ проведены в 1969 г. Салаирским прииском. Отвалы хвостохранилищ разбуривались по профилям, опробовались и оценивались как «техногенные россыпи» золота и барита (рис. 1).

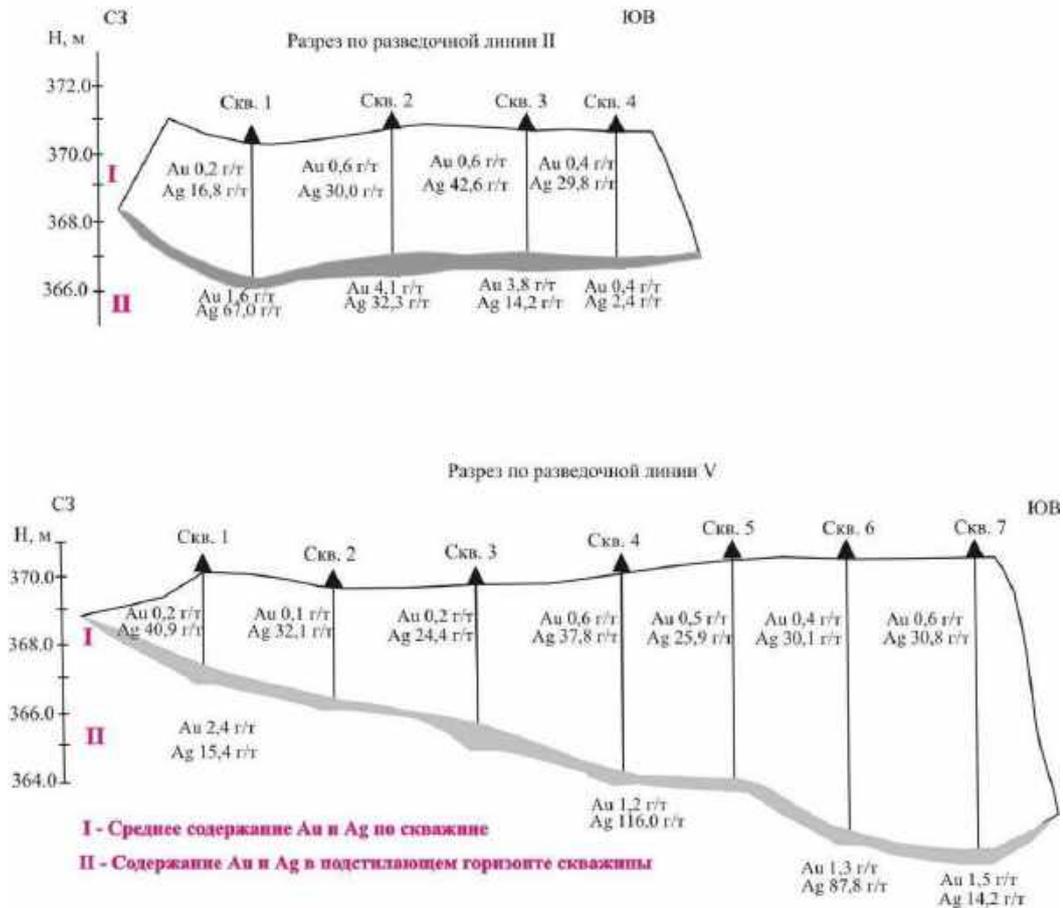


Рисунок 1. Разрезы отвалов Ново-Урского хвостохранилища с выделенными горизонтами вторичного обогащения.

В результате было определено, что суммарные запасы двух хвостохранилищ по категориям В+С₁ составили: Au – 641 кг (средние содержания варьировали в диапазоне 0.4-0.7 г/т); Ag – 37.8 т (среднее содержание 26.5 г/т). Зафиксированы значительно более высокие концентрации золота (до 11.9 г/т) и серебра (до 350.7 г/т) в подстилающем почвенном горизонте и, вероятно, в самых нижних частях отвалов (рис. 1). Коэффициент концентрирования по отдельным профилям для Au

составил 10.8, варьируя от 2 до 24. Для Ag вариации коэффициента концентрирования были более широкими – от 0.5 до 12.6 (среднее 3.5).

С 2010 г. по настоящее время коллектив авторов в составе И.Н. Мягкой, Е.В. Лазаревой, М.А. Густайтис, С.М. Жмодик, Б.Ю. Сарыг-оол и др. (ИГМ СО РАН), активно занимаются изучением поведения благородных металлов (и др. элементов) в системе «сульфидные отвалы – торф» на примере Ново-Урского хвостохранилища [Мягкая и др., 2013; Myagkaya et al., 2016a, b; 2020; Saryg-ool et al., 2017; Gustaytis et al., 2018; Lazareva et al., 2019]. Обнаруженное авторами золото, в отложениях природного органического вещества (ПОВ – «торфы»), имеет размерность ≤ 4 мкм в виде тромбоцитов, агрегатов округлой формы, «пушистых» или дендритных форм вместе с соединениями Fe(III) и барита. Среди примесей в золоте выделены Cu (до 9,64 мас. %), Zn (0,39 мас. %), Ag (2,9 мас. %), Hg (5,35 мас. %) и Pb (0,92 мас. %). Некоторые агрегаты нанометровых частиц Au⁰ встречаются с коллоидными сульфидами Hg и Zn и иодаргирита [Myagkaya et al., 2016a, 2020]. Кроме этого, в сульфидных отвалах обнаружены субмикронные частицы сульфогалогенидов Hg и Ag (пеллурит – Hg₅Ag₄S₅(I,Br)₂Cl₂).

Содержание Hg в отходах кварц-пиритового и кварц-баритового состава составляло 75 и 36 мкг/г соответственно, а в торфяном веществе диапазон содержания составлял 43–14700 мкг/г. Высокое содержание объясняется минералогическими характеристиками вещества. В отвалах присутствуют следующие виды ртути (HgX₂ до 54 мкг/г, CH₃HgX до 83 мкг/г (где X – Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) и HgS + HgSe до 13 мкг/г [Gustaytis et al., 2018].

Помимо этого, на Ново-Урском и Белоключевском хвостохранилищах проведен комплекс геофизических и геохимических работ под руководством сотрудников ИНГГ и ИГМ СО РАН (Новосибирск) С.Б. Бортниковой, Н.В. Юркевич, В.В. Оленченко, О.Л. Гаськовой и др. [Оленченко и др., 2016; Юркевич и др., 2017; Yurkevich et al., 2019; Bortnikova et al., 2019]. Авторами определено, что в поровых растворах ТМО Ново-Урского и Белоключевского месторождений есть паровая (газовая) фаза, состоящая из органических, серо- и селен-содержащих газов [Bortnikova et al., 2019; Yurkevich et al., 2019], образованная в результате

окисления сульфидов в летний и метилирования в зимний период. Водно-паровая фаза переносит элементы в форме водных ионов $[\text{Me}(\text{H}_2\text{O})]^{2+}$, а комплексные частицы (такие как, $\text{MeSO}_4^-_{(\text{aq})}$, $\text{MeCl}_{(\text{aq})}$, $\text{Me}(\text{OH})^+$ и т.д.) мигрируют в солевом остатке. Основными источниками элементов в парогазовых потоках являются вторичные нестабильные соединения, связанные с кристаллогидратами, которые образуются при окислении сульфидных минералов. Механизм отрыва элементов паровой фазы от твердого тела объясняется повышением температуры и дегидратации кристаллогидратов, образующийся при этом водяной пар захватывает определенное количество элементов, которые затем конденсируются. В работе [Bortnikova et al., 2019] отмечено, что в конденсат поступает до 60% Na, 48% K, 28% Mg, 6.8% Sr, 15% Sb, 28% Te, 2.5% Ag, 6.4% Co, 1.9% Ni относительно общего содержания их в растворах.

Проведенный комплекс биологических исследований [Рихванов и др., 2017] показал, что на Ново-Урском хвостохранилище не менее 26% сульфатной серы образуется благодаря деятельности биоты, а именно, микроорганизмов рода *Bacillus* и *Micrococcaceae* sp.

По данным отчета [Половникова, 2009] ТМО Змеиногорского месторождения неоднократно изучалось в аспекте оценки запасов Au и Ag и их обогатимости. Апробированные в ЦНИГРИ прогнозные ресурсы по категории P₁ (золота – 923 кг, серебра – 16.2 т) позволили почти полностью переработать ТМО месторождения методом кучного выщелачивания.

Уральские объекты (ТМО Чернореченская россыпи, рр. Ис и Тура) активно изучались сотрудниками Пермского государственного университета под руководством В.А. Наумова, О.Б. Наумовой, Б.С. Лунева, Б.М. Осовецкого и др. Авторы провели детальные исследования минерального состава лежалых отложений, оценили их золотоносность и определили формы нахождения золотоносных фаз [Наумов, 2010; Осовецкий, 2012, 2013; Наумов и др., 2013; Наумов, Наумова, 2014, 2019].

Таким образом, техногенные образования объектов исследования активно исследовались на протяжении многих лет. Полученные данные свидетельствуют

об активной миграции и преобразовании вещества на хвостохранилищах. Однако, детального изучения типоморфных характеристик самородного золота и его поведения в отложениях переработанных руд (Ново-Урского, Белоключевского и Змеиногорского месторождений) не проводились.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной объем аналитических исследований проведен в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН (Новосибирск), а также в лаборатории «ЛОПИ» и секторе «Наноминералогия» ПГНИУ (Пермь).

Методы, использованные в работе, основаны, с одной стороны, на комплексном геологическом, геохимическом и минералогическом изучении типовых геологических объектов, а с другой – на детальном изучении собственно самородного золота в шлиховых пробах и шашках с помощью бинокулярного микроскопа, сканирующей электронной микроскопии и электронно-микронного анализа.

2.1. ОПРОБОВАНИЕ И ОБОГАЩЕНИЕ ПРОБ

Полевое опробование техногенных отложений для насыпных отвалов осуществлялось по разным литологическим слоям разреза, для намывных – вдоль профиля (конуса выноса) распространения техногенных отложений через определенный интервал. Объем – не менее 10 кг. каждая.

Пробы обогащались гравитационным методом с помощью лотка или на установке «Мелкие-ценные минералы (МЦМ)» Пермского университета и винтовом шлюзе. Чтобы не потерять мелкое и тонкое золото, которое легко сорбируется глинистыми частицами, первоначально проводилось отмучивание материала в крупной таре или в водоемах со стоячей водой. Затем, проба тщательно перемешивалась, убирались крупные обломки и смывалась глинистая фракция. Оставшаяся более грубая фракция далее промывалась до концентрата, который, в последующем, обогащался до состояния «черного шлиха».

В лабораторных условиях полученный концентрат («черный шлик») доводился до «суперконцентрата», с помощью его домывки в чашечке в

бромформе или воде. Для удобства просмотра пробы под бинокулярным микроскопом (ЛОМО ХС1422), у «суперконцентрата» 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.

Кроме того, из исходных пробы, методом квартования, создавался дубликат, который подготавливался для аналитических исследований – определения содержания Au и Ag.

Дробление и классификация проб проводились на дробильно-сократительном комплексе «Rocklabs», перемешивание крупной фракции – на шихтовочной площадке методом «кольца и конуса», перемешивание и деление мелких фракций – на делителе проб «Rocklabs», отбор частных навесок для анализов производился при помощи делителя Джонсона. Подготовка проб исходной руды и продуктов обогащения к химическому анализу осуществлена на вибрационном истирателе ИВ-4. Пробу дробили до класса -2 мм, измельчали (-1 мм) и истирали до размерности <0.0074 мм.

2.2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Содержание Au и Ag в исходных пробах (навеска 5-10 г.) определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) с использованием спектрометра 3030 В (фирма Perkin-Elmer) и фотометра Solar М6 (фирма Thermo Electron) (аналитик Ильина В.Н.).

Элементный состав исходных проб измерялся с помощью рентгено-флуоресцентного анализа (РФА) на спектрометре ARL-9900XP (Thermo Fisher Scientific Ltd) (аналитик Карманова Н.Г.).

Содержание благородных металлов в поровых растворах Белоключевского месторождения определялось методом масс-спектрометрического анализа с индуктивно-связанной плазмой (МС ИСП) ELAN DRC-E фирмы «PerkinElmer Instruments LLS» в ХАЦ «Плазма» (Томск).

Исследование типоморфные характеристик золота осуществлялось с помощью сканирующей электронной микроскопии и электронно-микронного анализа.

Под типоморфными характеристиками золота автор понимает совокупность параметров, которые описывают особенности золота в исследованном объекте, а именно: размер частиц, морфологию, внутреннее строение и химический состав Au (пробность, элементы примеси), золотоносные минеральные ассоциации [Петровская, 1973; Николаева, Яблокова, 2007; Николаева и др., 2015 и др.], которые служат показателями условий рудообразования золота. С помощью типоморфных параметров золота, полученных для ТМО, и сравнения их с золотом из коренных и россыпных месторождений, зоны окисления, автор оценивает степень преобразования золота в гипергенных условиях в ТМО.

При изучении самородного золота выявлялись их специфические морфологические особенности и количественно оценивались признаки преобразования: характер поверхности, наличие сростков и пленок. При описании золота автор опирался на такие труды, как [Григорьев, 1961; Петровская, 1973, 1993; Амосов, Васин, 1995; Сурков, 2000; Николаева, Яблокова, 2007; Осовецкий, 2012, 2013; Николаева и др., 2015].

Изучение микрорельефов поверхностей 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 (SE) и обратно-рассеянных электронов (BSE) при различных увеличениях (при ускоряющем напряжении электронного пучка 20 кВ) (аналитики Карманов Н.С., Хлестов М.В. (ИГМ СО РАН)). А также на ED-спектрометре INCA ENERGY 350 («Oxford Instruments») на установке JSM 6390LV фирмы JEOL (аналитик профессор Осовецкий Б.М., ПГНИУ). Для этого частицы золота помещались на предметное стекло с проводящим скотчем и напылялись углеродом. При исследовании частиц особое внимание уделялось разнообразным включениям в золоте, визуально наблюдаемым неоднородностям и т.п.

Для изучения внутреннего строения частиц (микроструктур), золото помещалось в шашку с эпоксидной смолой и приполировывалось на специальных алмазных пастах. Эпоксидная смола с отвердителем смешивалась по специальной технологии [Маликов, 1984]. Химический состав Au определялся методом локального микрорентгеноспектрального (микронзондового) анализа (МРСА) на установке Camebax micro (Камека, Франция), с ускоряющим напряжением 20Кв, током зонда 70на (аналитик О.С. Хмельникова). С помощью микронзондового анализа получены количественные соотношения между золотом и элементами примесями (Ag, Hg, Cu). С помощью МРСА изучено более 100 зерен (~ 300 анализов).

На заключительном этапе исследования золота было проведено структурное травление золота. В качестве образцов были взяты исследуемые шашки, с которых предварительно было удалено напыление после микронзондового анализа. Химическое травление поверхности золотин используется в практике минералогических исследований природных образцов и в металлографии при изучении сплавов на основе золота. Целью химического травления является выявление элементов неоднородности строения и состава золотин: характера зернистости, наличие двойников, фазовой неоднородности, зональности [Рамдор, 1962; Петровская и др., 1980; Николаева и др., 2015]. Это позволяет оценить степень преобразования Au в экзогенных условиях и предположить механизмы этих процессов [Петровская, 1973; Петровская и др., 1980; Николаева и др., 2015; Позднякова, 2015; Stewart et al., 2017].

Травление золота проводилось по методике Н.В. Петровской (1980). В качестве реактива была использована смесь $\text{HCl} + \text{NH}_3 + \text{FeCl}_3 + \text{CrO}_3 + \text{CH}_4\text{N}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}$. Реактив наносился на поверхность золотин с помощью тонкой стеклянной трубки. Окончание травления определялось визуально по изменению цвета (появления слабого потемнения) золотины, после чего реактив смывался под струей холодной воды. Обычное время травления составляет для высокопробного золота – 15-20 мин, а для низкопробного – 2-3 мин, что привело к необходимости травления золотин по одной или малыми группами. Для снятия тонкой радужной пленки с

поверхности золотины, появившейся в процессе травления, на поверхность наносился аммиак, который через 10 секунд смывался под струей холодной воды, а образец высушивался. Для предотвращения передерживания реактива, что ведет к сильному потемнению золота, интервалы травления составляли 2 минуты, после чего образец промывался и изучался под рудным микроскопом. Если структура не проявлялась, то процедура травления повторялась. После изучения на бинокулярном микроскопе препарат был исследован под СЭМ, с помощью которого были сделаны снимки.

2.3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование проведено с помощью пакета программ «HCh» 6.0 [Шваров, 2008], включающего базу термодинамических данных “UNITHERM”, при 25°C и общем давлении 1 атм. Это самая современная версия базы данных, которая включает все возможные комплексы золота, для которых на сегодняшний день имеются данные.

Для расчета равновесного фазового состава систем используется принцип минимизации свободной энергии Гиббса. Расчеты проводились в 19-компонентной системе $\text{H}_2\text{O}-\text{Na}-\text{Ca}-\text{Mg}-\text{K}-\text{Sr}-\text{Ba}-\text{Si}-\text{Al}-\text{Cl}-\text{C}-\text{S}-\text{Fe}-\text{Mn}-\text{Ag}-\text{Au}-\text{Cu}-\text{Zn}$, включающей частицы в растворе, минералы и газы (O_2 , CO_2 , CH_4 , SO_2).

Исходной информацией служили аналитические данные по минеральному и химическому составу вещества, которые использовались для раскрытия закономерностей процесса растворения и осаждения золота и верификации модели. 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 $\text{CO}_{2(\text{газ})}$, соответствующим атмосферному, т.е. $10^{-3.5}$ атм.

ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются ТМО хвостохранилищ переработанных руд колчеданно-полиметаллических месторождений (рис. 2): 1) Ново-Урское и Белоключевское (Северо-Восточный Салаир, АССО, Кемеровская обл., пос. Урск, Россия); 2) Змеиногорское (Рудный Алтай, АССО, Алтайский край, г. Змеиногорск, Россия).

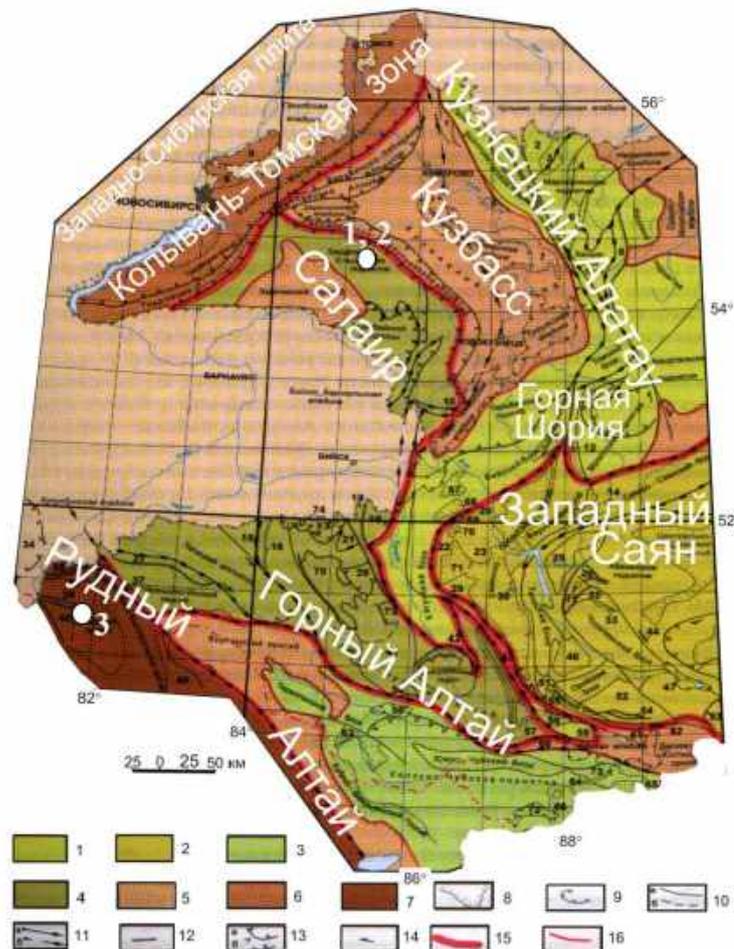


Рисунок 2. Геолого-структурная карта западной части Алтае-Саянской складчатой области [по Шокальскому и др., 2000]: месторождения 1, 2 – Ново-Урское и Белоключевское; 3 – Змеиногорское. Условные обозначения: 1-5 – складчатые системы Алтае-Саянской складчатой области: 1 - Кузнецко-Алтайская, 2 – Саяно-Тувинская, 3 – Монголо-Алтайская, 4 – Салаиро-Горноалтайская, 5 – крупные наложенные средне-позднепалеозойские каменноугольные структуры в пределах каледонских складчатых систем; 6-7 – складчатые системы Обь-Зайсанской складчатой области: 6 – Рудноалтайская, 7 – Колывань-Томская; 8 – границы палеозойских впадин, прогибов и вулканотектонических депрессий (ВТД); 9 – границы мезозойских и кайнозойских впадин; 10 – границы структур: а) тектонические прослеженные, б) предполагаемые; 11 – сутурные швы: а) прослеженные, б) предполагаемые; 12 – сбросы; 13 – надвиги: а) прослеженные, б) предполагаемые; 14 – направления сдвига; 15 – границы складчатых систем; 16 – границы наложенных прогибов.

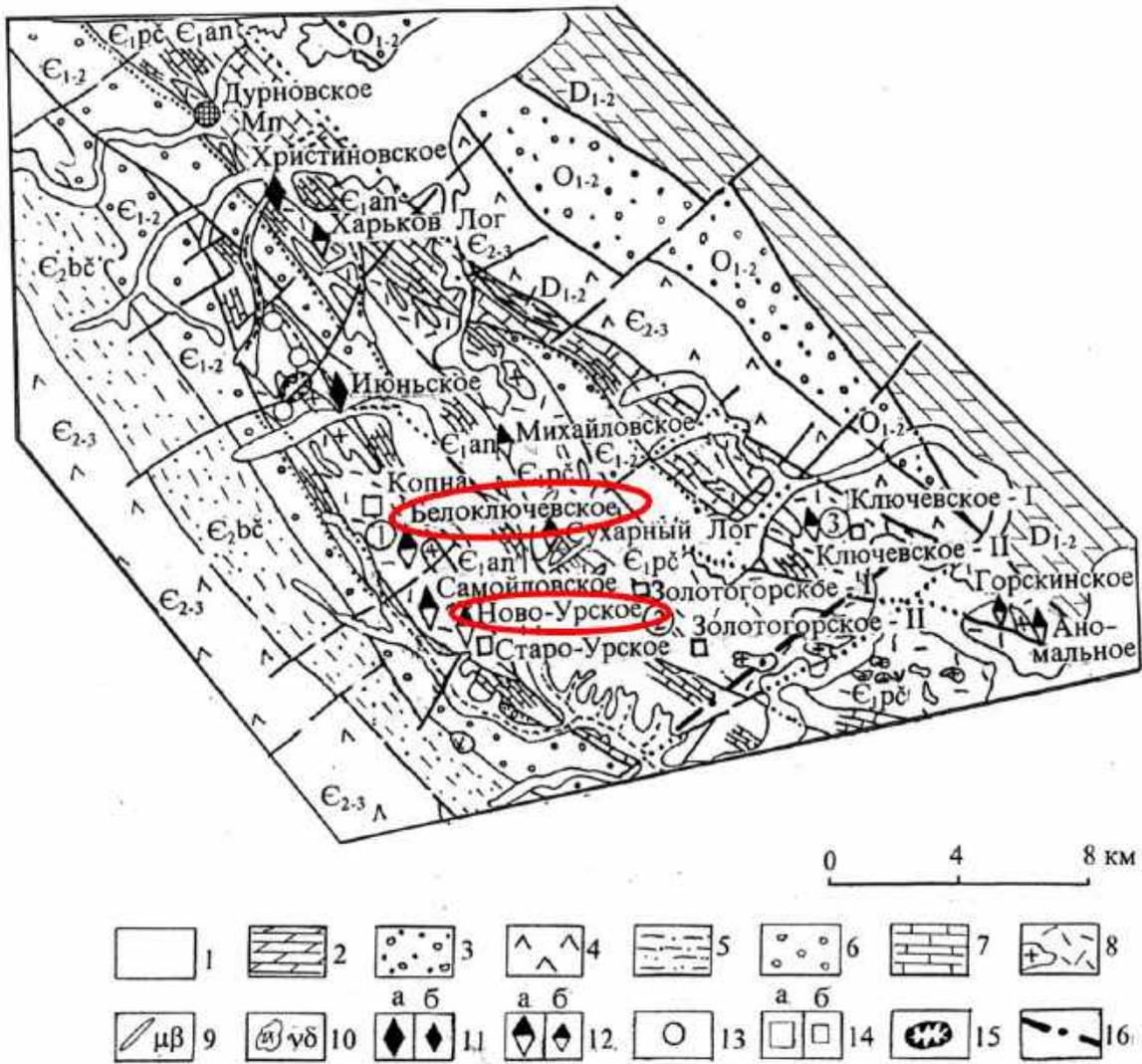
3.1. ТМО НОВО-УРСКОГО И БЕЛОКЛЮЧЕВСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩ

3.1.1. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Ново-Урское и Белоключевское месторождения относятся к Урскому рудному полю (Салаирский кряж) (рис. 3), которое сложено дацитовыми порфирами и их туфами, порфиритами, кварц-альбит-хлоритовыми сланцами печеркинской свиты ($r\epsilon_1$), залегающими среди известняков анчешевской свиты ($an\epsilon_1$). Падение слоистости пород юго-западное, под углом 60-70°. Рудные тела представлены массивными серно-колчеданными и колчеданно-полиметаллическими рудами, прожилково-вкрапленными преимущественно медно-цинковыми. Форма рудных тел в большинстве случаев линзообразная [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. Au 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, геффроита и теллурида ртути [Дистанов, 1977; Myagkaya et al., 2020], а также золота (910 ‰) с примесями Cu (28.6 мас. %) и Ag (61.4 мас. %). В барите установлены включения науманнита и селенида Hg со значительными примесями Ag и S [Myagkaya 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; Дербиков, 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].



1 — четвертичные отложения: суглинки, глины, пески, галечники; 2 — нижний-средний девон: карбонатно-терригенные отложения; 3 — ордовик: конгломераты, песчаники; 4 — средний-верхний кембрий: средние и основные эффузивы и их туфы; 5 — средний кембрий: песчаники, алевролиты, гравелиты, линзы известняков и порфиритов (бачатская свита, E_{2bc}); 6 — нижнесредний кембрий: конгломераты, гравелиты, песчаники, сланцы, линзы известняков (прямушкинская толща); 7 — нижний кембрий: известняки с прослоями терригенных пород (анчешевская свита, E_{1ap}); 8 — нижний кембрий: средние и кислые эффузивы, их туфы, линзы черных сланцев и известняков (печеркинская свита, E_{1pb}); 9 — дайки диабазов, габбро-диабазов и диабазовых порфиритов ($\mu\beta$); 10 — малые интрузии габбро-диабазов, габбро-диоритов и диоритов ($\nu\delta$); 11—16 — месторождения (а) и рудопроявления (б): 11 — барит-полиметаллические, 12 — медно-цинковые, 13 — золото-кварцевые, 14 — золото-кварцевые в топазовых кварцитах, 15 — золотоносная кора выветривания Апрельского месторождения огнеупорных глин, 16 — Горскинский разрез. Цифры в кружках — золотоносные зоны: 1 — Урская, 2 — Золотогорская, 3 — Ключевская.

Рисунок 3. Схематическая геологическая карта и рудоносность Урского рудного поля [по Калинину и др., 2006].

3.1.2. ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТМО МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ново-Урское и Белоключевское месторождения известны с начала 30-х гг. XX в. и обрабатывались на золото и барит из зоны окисления. При обработке месторождений применялась следующая методика: окисленные руды дробились и измельчались (до <0.2 мм) и из них извлекалось свободное гравитационное золото. Из полученного концентрата (хвостов гравитационного обогащения), Au и Ag выщелачивали с помощью цианидов Na, а переработанные руды складировали в виде насыпных куч (отвалов). Поскольку не сохранилось задокументированной информации по обработке месторождений, то нельзя что-то однозначно утверждать о природе сформированной дифференциации и интеграции вещества по разрезам отвалов. А именно, это результат послышной обработки месторождения и соответствующие ему складирование переработанных руд или результат гипергенных преобразований техногенно-минеральных отложений.

3.1.3. НОВО-УРСКОЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ

Ново-Урское хвостохранилище (рис. 4а) представлено отвалами кварц-баритового и кварц-пиритового состава по 10-12 м в высоту (рис. 4б, в), между которыми протекает кислый дренажный ручей (КДР), формирующий намывные отложения (рис. 4г).

КДР имеет следующий состав: воды – 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, Au от 0.2 до 1.2 мкг/л; Ag — от 0.01 до 0.3 мкг/л [Оленченко и др., 2016; Муагкава et al, 2016а], который приближен к составу поровых растворов в отвалах.

На отвале кварц-баритового состава вскрыта нижняя часть разреза (~2 м от выхода коренных пород), в которой выделяется три макроскопически различимых горизонта (сверху вниз, см. рис. 4б): 1) *серо-синеватый* кварц-барит-пиритовый (h

= 40 см) с жеодами кремнезема; 2) *бурожелезняковый* (h = 40 см); 3) *сланцевый* (h = 50 см), лежащий непосредственно на почве. По данным ААС (14 проб) распределение золота в отвалах неравномерное (см. рис. 4). Концентрации Au распределяются от 0.13 до 1.2 г/т, Ag – 0.72-31.0 г/т. В концентратах преобладают пирит, барит и кварц, также присутствует ярозит, гипс, гетит, меньше мусковит, альбит, хлорит и микроклин [Муагкая et al, 2016a].

Отвал кварц-пиритового состава однородный по минералогическому составу (см. рис. 4в). Среднее содержание (по 4 пробам) Au – 0.6 г/т, Ag – 17.0 г/т. В тяжелой фракции преобладает пирит, барит и кварц.

Намывные отложения в плане выглядят как своеобразный конус выноса, который направлен в сторону долины р. Ур (см. рис. 4г) и образован вследствие механического и химического сноса вещества с основных двух отвалов и захороненный (осаждающийся) на природном органическом веществе (ПОВ). Отобраны две пробы: 1 – устье (Au – 0.5 г/т; Ag – 18.0 г/т); 2 – в 10 м (Au – 11.0 г/т; Ag – 2.9 г/т) от отвала кварц-баритового состава. По вещественному составу [Муагкая et al., 2020] выделены: соединения Fe(III) и Al(III), K-Na-ярозит, гипс, барит, октаэдрические микрокристаллы и фрамбоиды пирита, тиманнит, самородное золото.

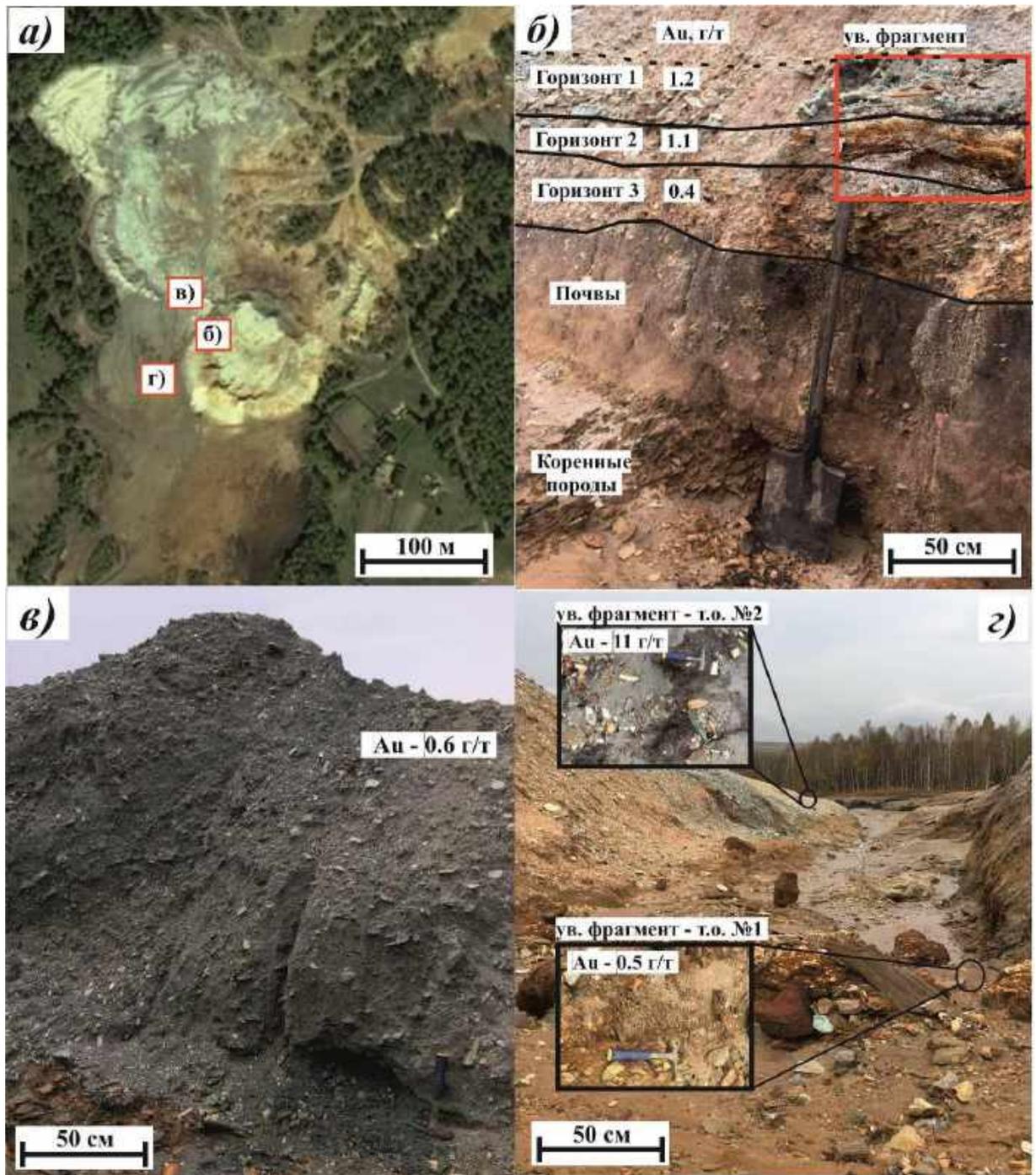


Рисунок 4. Объекты исследования Ново-Урского хвостохранилища: а) космоснимок с отмеченными объектами исследования; б) разрез ТМО кварц-баритового состава; в) разрез ТМО кварц-пиритового состава; г) намывные отложения.

3.1.4. БЕЛОКЛЮЧЕВСКОЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ

Хвостохранилище Белоключевского месторождения представлено отвалами насыпного типа высотой до 10 м, сложенное отходами цианирования окисленных руд. Значения рН растворов в отвале варьируют от 1.9 до 3.0, Eh 500-800 мВ [Юркевич и др., 2017]. По минеральному составу и строению хвостохранилище является аналогом Ново-Урского объекта.

Насыпь вскрыта разрезом мощностью 5 м, который можно разделить на следующие горизонты (сверху вниз, рис. 5): 1) *верхняя часть*, представленная 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. Большеобъемные пробы (8 проб) были взяты из каждого горизонта.

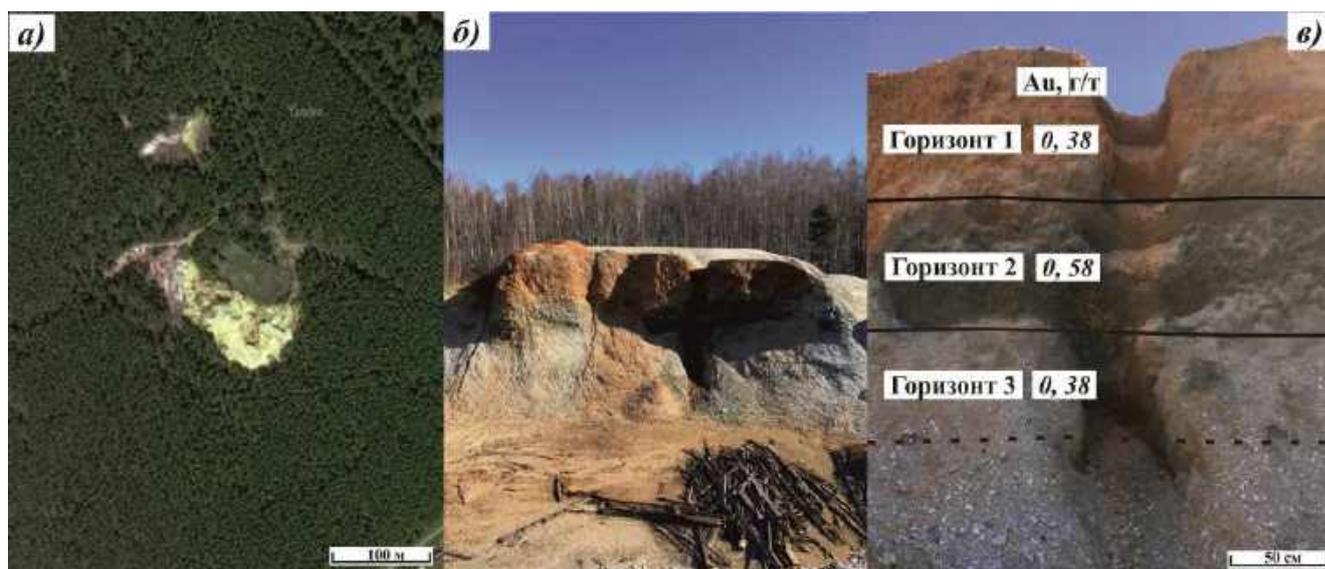


Рисунок 5. Хвостохранилище Белоключевского месторождения: а) космоснимок; б) общий вид насыпи; в) разрез с выделенными горизонтами.

Распределение золота и серебра по разрезу изображено на рис. 6. По данным ААС, средние содержание в верхней и нижней пачках горизонтов составляет – 0.38 г/т.

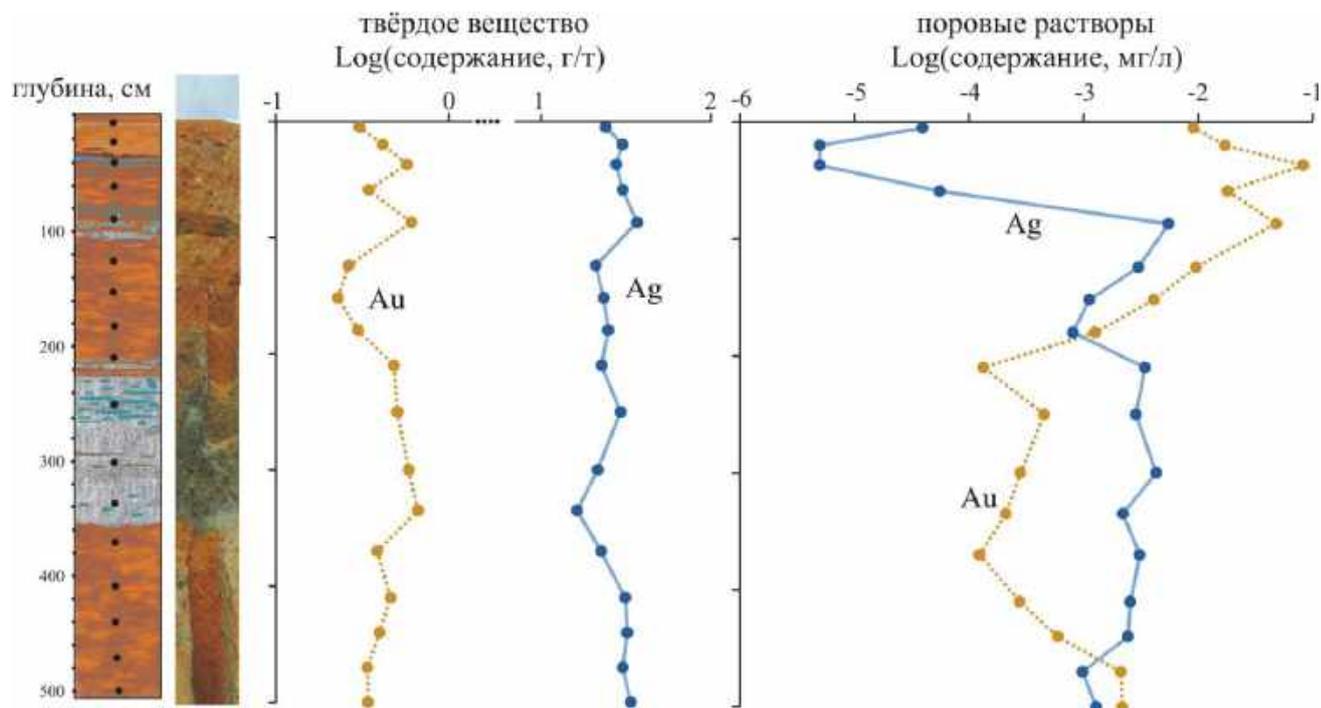


Рисунок 6. Распределение золота и серебра в твердом веществе (ААС) и поровых растворах (ИСП-МС) разреза.

В верхней пачке диапазон колебаний более широк – от 0.23 до 0.60 г/т, в то время как в нижней пачке содержание изменяется от 0.34 до 0.46 г/т. В слабоокисленном веществе кварц-пиритовой сыпучки, расположенном в средней части разреза, среднее содержание золота составляет 0.58 г/т, изменяясь в диапазоне 0.50-0.66 г/т. В поровых водах (по данным ИСП-МС) каждого слоя были обнаружены измеряемые концентрации золота, в некоторых слоях достигающие высоких значений: в среднем 0.024 мг/л при колебаниях от 0.0013 до 0.083 мг/л.

3.2. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ ЗМЕИНОГОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

3.2.1. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Змеиногорское месторождение расположено на Рудном Алтае (рис. 7) и генетически связано с средне-верхнедевонской базальт-риолитовой формацией и локализовано на трех стратиграфических уровнях – в нижнеэйфельских, живетских и нижнефранских отложениях. Его структура представляется в виде моноклинали

северо-западного простирания с падением на северо-восток под углом 40-50°. Осложнено Главным сбросо-сдвиговым разломом северо-северо-восточного простирания, ограничивающим с запада промышленное оруденение. На месторождении развиты пострудные круто падающие дайки долеритов субширотного и северо-восточного простираний [Ворошилов, Понитевский, 2001; Гаськов, 2002].

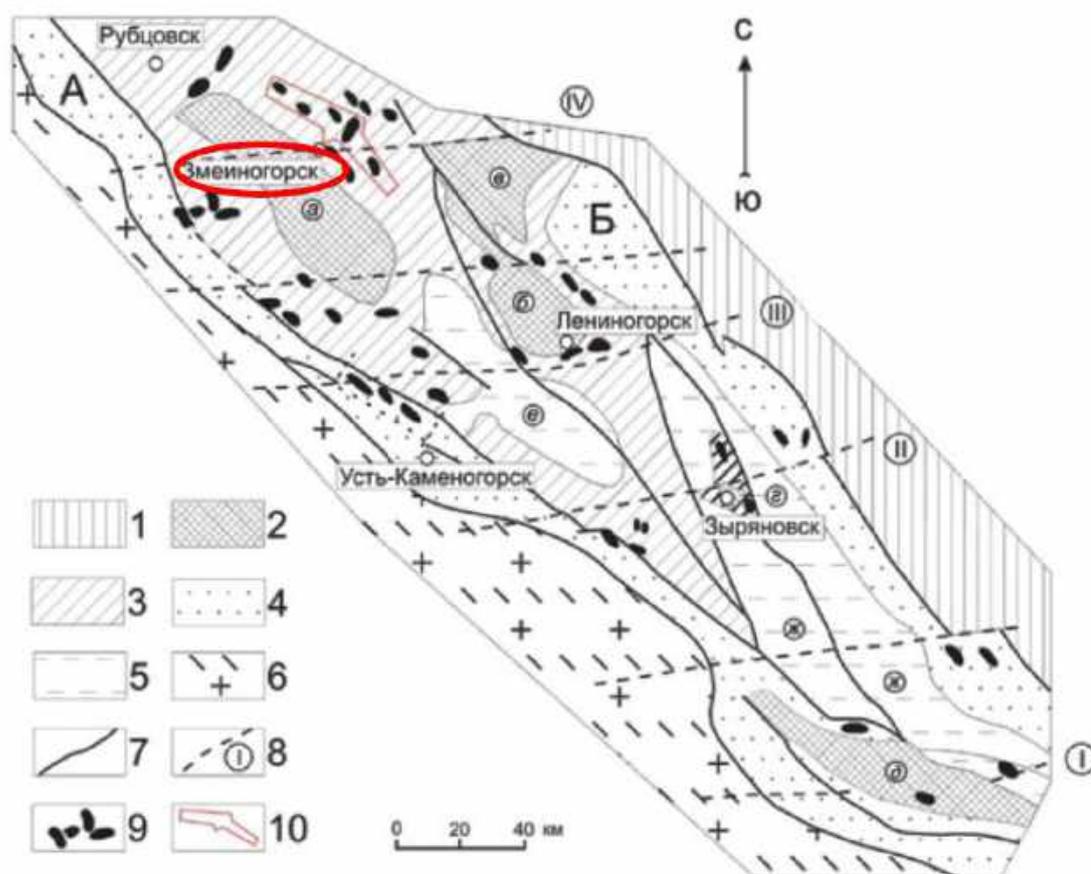


Рисунок 7. Схематическая геологическая карта северо-западной части Рудного Алтая с выделенным Змеиногорским месторождением [по Кашин и др., 2013]: 1 – каледониды Горного Алтая; 2 – каледонские ядра антиклинориев: *а* – Алейского, *б* – Синюшинского, *в* – Коргоно-Холзунского, *г* – Ревнюшинского, *д* – Курчумо-Кальджинского; 3 – основной ореол развития рудовмещающей базальт-риолитовой формации; 4 – региональные зоны расланцевания и зонального метаморфизма: *А* – Иртышская зона смятия, *Б* – Северо-Восточная зона смятия; 5 – нижнекарбоновые синклинии, выполненные карбонатно-терригенными отложениями: *е* – Быструшинский, *ж* – Белоубинско-Южно-Алтайский; 6 – комплексы Колба-Нарымской зоны; 7 – основные глубинные разломы северо-западного простирания; 8 – трансрегиональные субширотные разломы, развитые в глубинных слоях литосферы, установленные по геофизическим и геологическим данным: I – Северо-Тувинский, II – Саяно-Тувинский, III – Кандатский, IV – Абакан-Рубцовский; 9 – рудные поля наиболее крупных полиметаллических месторождений; 10 – площадь изученной части Змеиногорского рудного узла.

Первичные руды состоят из пирита, сфалерита, галенита, халькопирита, барита, блеклой руды, халькозина, борнита, самородных выделений золота и серебра, а окисленные – из азурита, малахита, церуссита, смитсонита, магнетита, лимонита, ярозита, гематита (рис. 8). Среди жильных минералов присутствуют кварц, кальцит, хлорит, альбит, эпидот, К-полевой шпат, гидросерицит, мусковит.

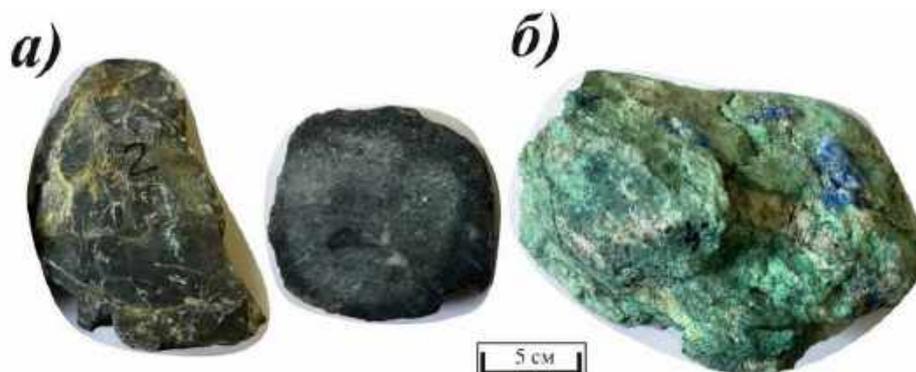


Рисунок 8. Руды Змеиногорского месторождения: а) первичные; б) окисленные.

3.2.2. ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТМО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

ТМО Змеиногорской золото-извлекательной фабрики (ЗИФ) расположены в своеобразном котловане, в аллювиальных отложениях первой надпойменной террасы р. Корбалиха. На месторождении обрабатывались золотосодержащие роговики, первичные сульфидные и окисленные руды, в поздний период – переработанные руды хвостохранилища. В первичных сульфидных рудах содержание золота достигалось до 2.25 г/т и в золотосодержащих роговиках – до 3 г/т, в окисленных рудах – 3.2 г/т [Половникова, 2009].

«Отходы» 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. 9). Среднее содержание золота в ТМО достигает 0.87 г/т.



Рисунок 9. Змеиногорское хвостохранилище: а) космоснимок; б) общий вид; в) насыпь ТМО.

Минеральный концентрат отвала состоит, преимущественно, из кварца (50%), слюды, плагиоклаза, барита, каолинита. Иногда встречается гематит, часто в виде псевдоморфоз по пириту. В шлихах, в небольшом количестве отмечается малахит, а также оксиды и гидроксиды Mn и Fe. Из рудных минералов отмечаются пирит, халькопирит, борнит, блеклая руда, золото.

ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. ТИПОМОРФНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОЛОТА

4.1. НОВО-УРСКОЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ

Видимое самородное золото было обнаружено во всех трех типах ТМО Ново-Урского хвостохранилища.

4.1.1. ТМО КВАРЦ-БАРИТОВОГО СОСТАВА

В разрезе отвала ТМО кварц-баритового состава видимое золото было обнаружено в горизонте 1 и 2 (см. рис. 4б).

В горизонте 1 золото обладает размерностью 0.25-0.1 мм (60 %), <0.1 мм (25 %), 0.5-0.25 мм (10 %), 1-0.5 мм (5 %). Общее количество знаков – 68. По данным морфологического анализа присутствуют золотины изометричных (53 %), удлиненных (40 %) и уплощенных (7 %) форм (рис. 10), представленные кристаллами, частицами интерстициального и уплощенного облика.

Поверхность золотин сильно преобразована. К скульптурам роста можно отнести скопления нано- и микрочастиц Au округлых, неправильных и чешуйчатых форм, которые образуют хрупкие «губчатые» образования («горчичное» золото), осаждаясь на неровностях поверхности частиц Au (рис. 11 б-г). Скульптуры растворения представлены в виде коррозионных поверхностей (рис. 11 в-е), которые выражены в виде граней октаэдров, кубов и микроямок (рис. 11д).

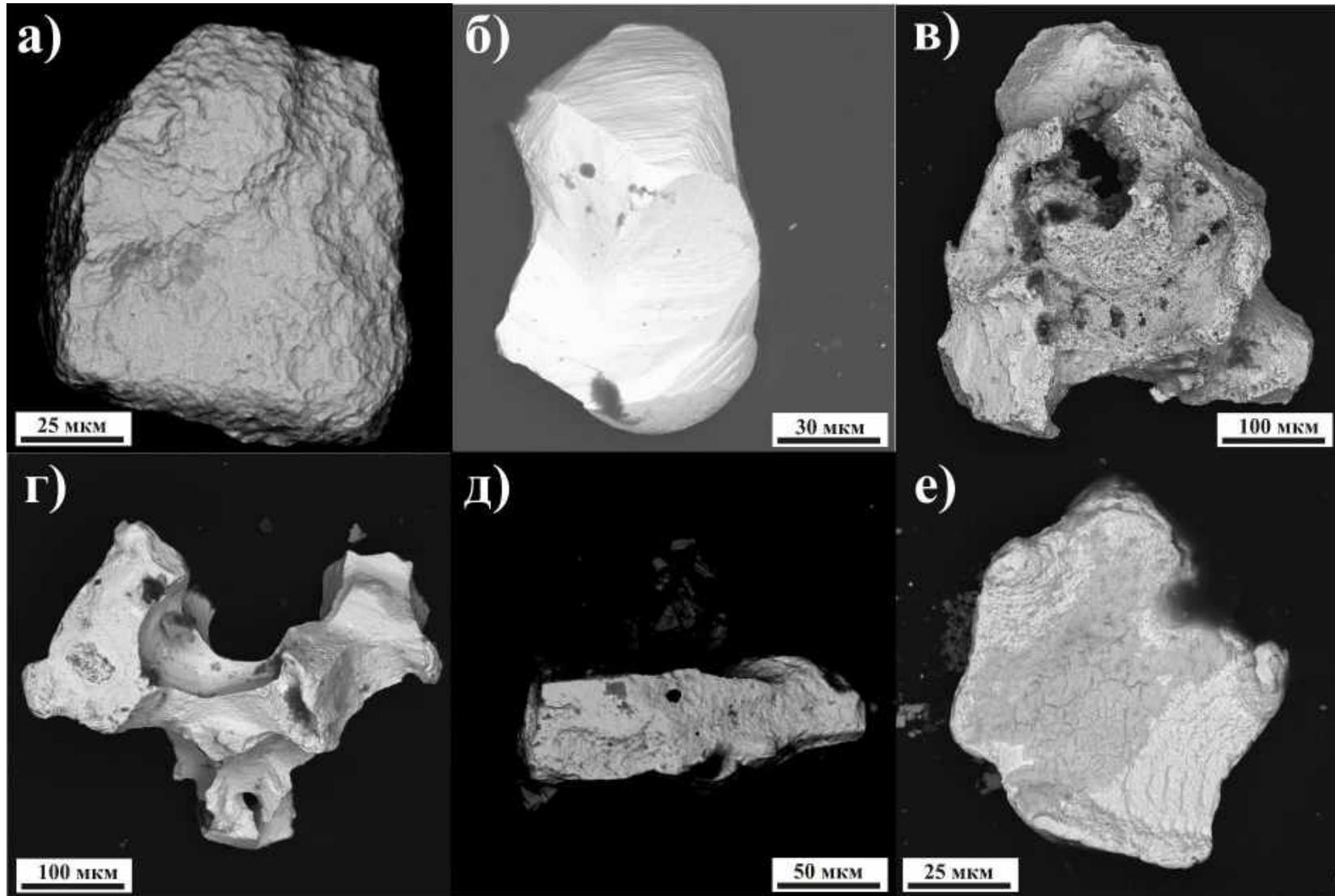


Рисунок 10. Морфология индивидов золота из отвала ТМО кварц-баритового состава (горизонт 1): а) массивная изометричная частица; б) кристалл октаэдрического облика; в, г) частицы неправильной формы интерстициального облика; д) кристалл удлиненной формы; е) уплощенная частица изометричной формы. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

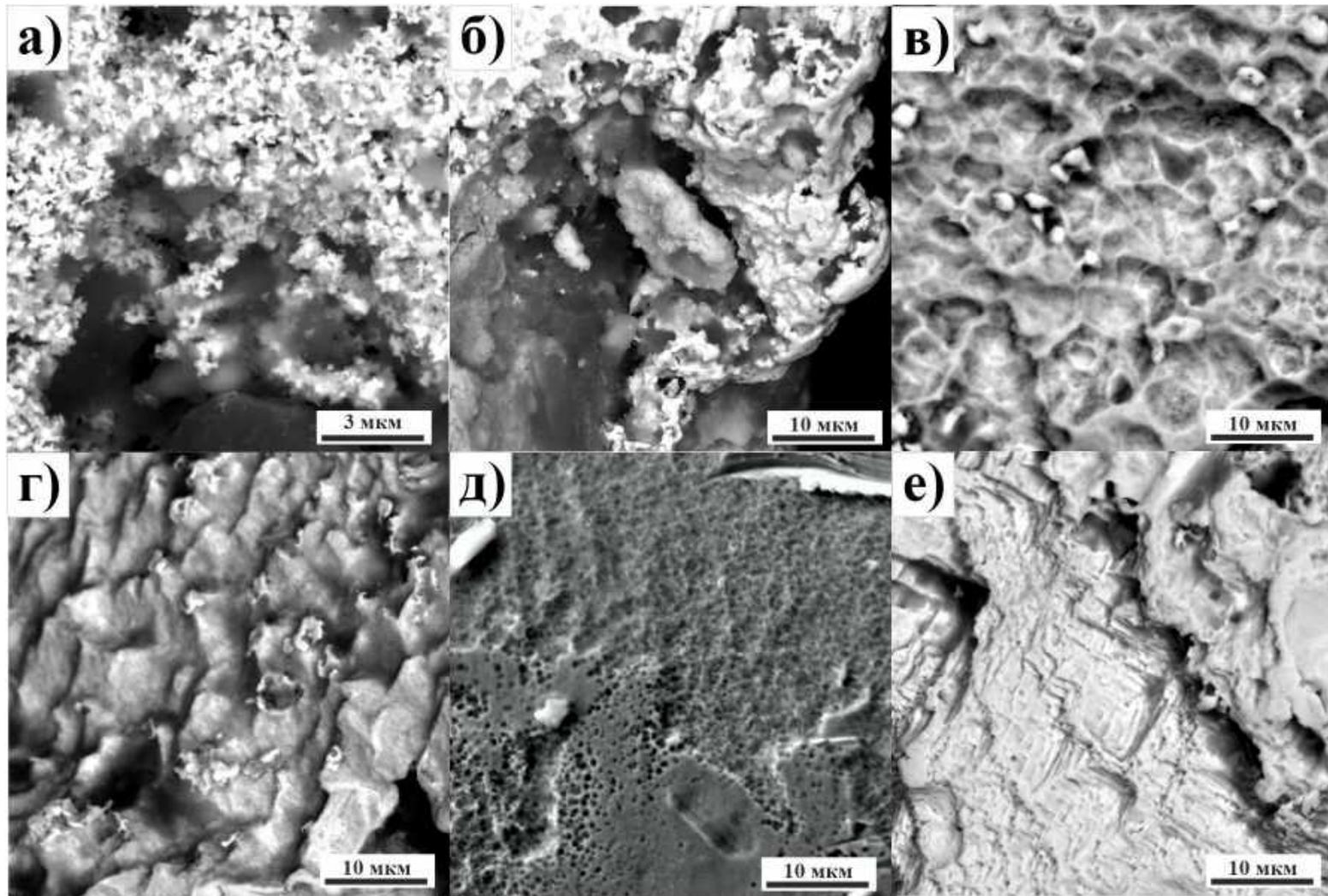


Рисунок 11. Микроскульптуры поверхностей золотин из ТМО кварц-баритового состава (горизонт 1): а) скопления «губчатого» золота; б) слипание (укрупнение) новообразованных микрочастиц золота на поверхности массивной частицы; в-г) выщелоченная поверхность золотин (в виде октаэдрических форм) с новообразованными микрочастицами золота на их гранях; д) микроямчатый рельеф; е) растворение поверхности по граням куба. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

По данным микронзондового анализа (табл. 1, приложение), в горизонте 1 золото двух групп: средней пробности (~840 ‰) с примесью Hg (1.2-3.0 мас. %), Ag – 13.3-16.7 мас. %, и низкой пробности (~730 ‰) с примесью Hg (3.4-5.0 мас. %), Ag – 19.8-27.1 мас. %. Обнаруженные «губчатые» образования имеют пробность 970 ‰. При этом пробность новообразованных фаз может отличаться от первичного золота.

В горизонте 2 было обнаружено 9 знаков размерностью <0.25 мм. Здесь преобладают золотины уплощенной (60%) и удлиненной (40%) форм (рис. 12).

Поверхность золота также сильно преобразована, наблюдаются аналогичные морфологические особенности, как и у золотинок из горизонта 1. Пробность Au варьируется от 727 до 973 ‰, т.е. в том же диапазоне, с условным обособлением тех же двух групп. Кроме того, было обнаружено зерно весьма высокопробного состава (973 ‰). Золото однородное по внутреннему строению, для некоторых частиц отмечается уменьшение пробности к краям, остаточных ядер не обнаружено.

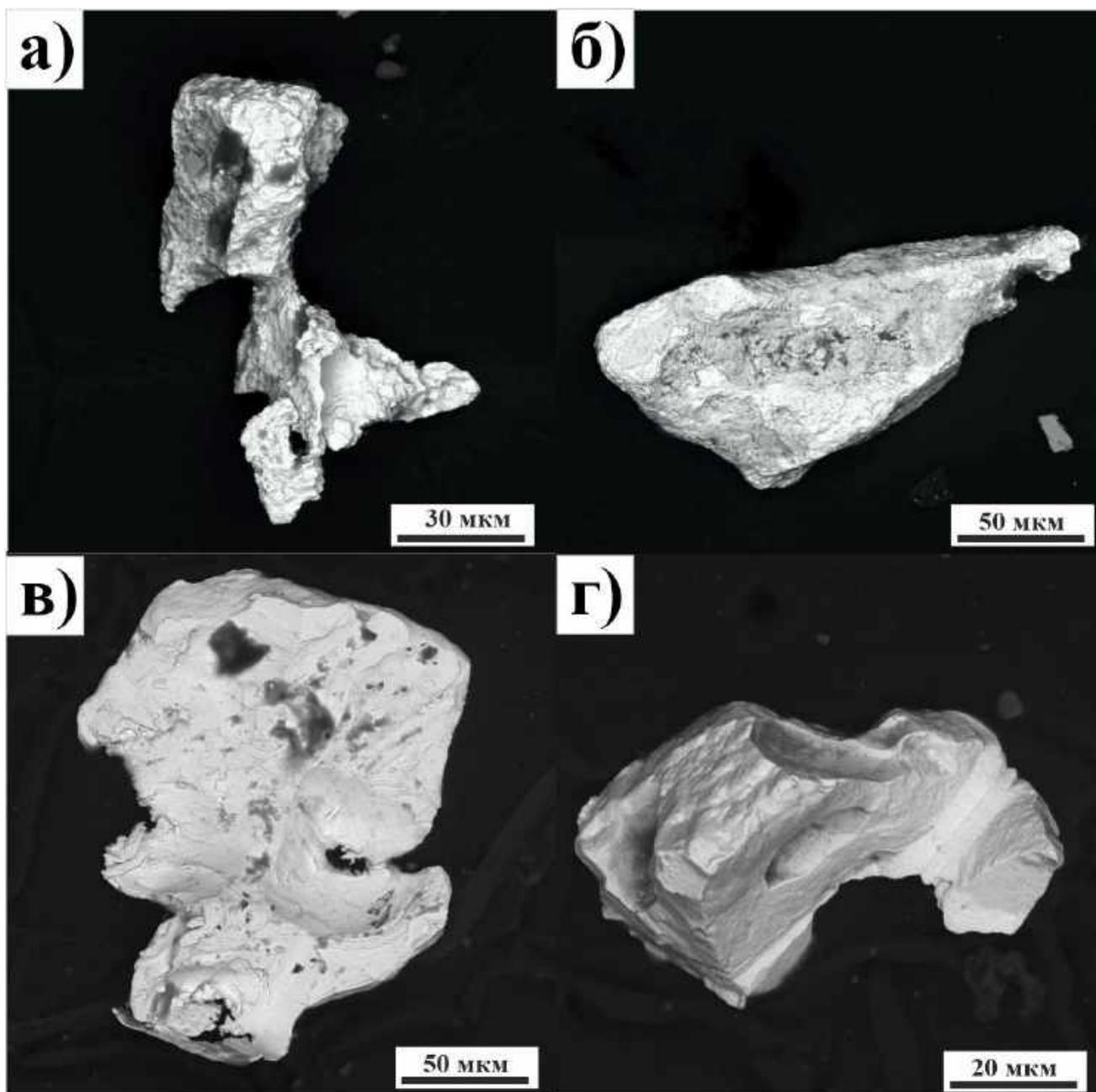


Рисунок 12. Морфология индивидов золота из отвала ТМО кварц-баритового состава (горизонт 2): а) вытянутая частица дендритного облика; б) удлиненная частица уплощенного облика, покрытая пленкой Au-Ag-S-Se состава; в) частица уплощенного облика с рваными, загнутыми краями; г) частица кристаллического облика. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

4.1.2. ТМО КВАРЦ-ПИРИТОВОГО СОСТАВА

В ТМО кварц-пиритового состава было обнаружено 5 золотинок (класс <0.1 мм), преимущественно, изометричной формы (рис. 13). На поверхности частиц наблюдаются чешуйчатые наросты Au нано- и микронного размера, и ямки,

образованные в результате растворения поверхностного слоя золота. По данным составов с СЭМ в ТМО присутствуют зерна разной пробыности. Встречаются частицы от низкопробного (707 ‰) до весьма высокопробного (979 ‰) состава, среди примесей обнаружены Hg (до 4.73 мас. %) и Ag (до 21 мас. %).

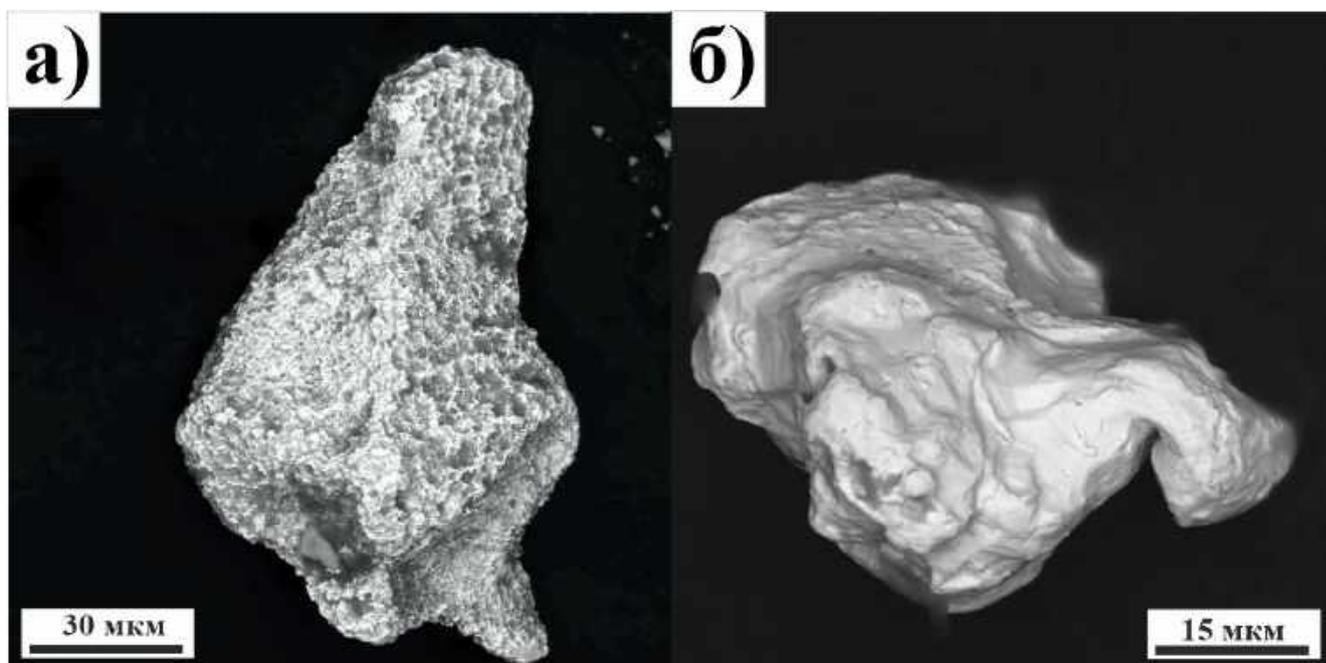


Рисунок 13. Морфология индивидов золота из отвала ТМО кварц-пиритового состава: а) вытянутая частица кристаллического облика; б) частица изометричной формы, плохоограненная, с загнутым краем. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

4.1.3. ТМО НАМЫВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

В ТМО намывного типа было обнаружено 10 знаков в точке опробования № 2 (см. рис. 4г). Гранулометрическое распределение самородных частиц: 0.5-0.25 мм (30 %), 0.25-0.1 мм (30 %), <0.1 мм (40 %). Золото, преимущественно, удлиненной (60 %) и изометричной (40 %) формы (рис. 14).

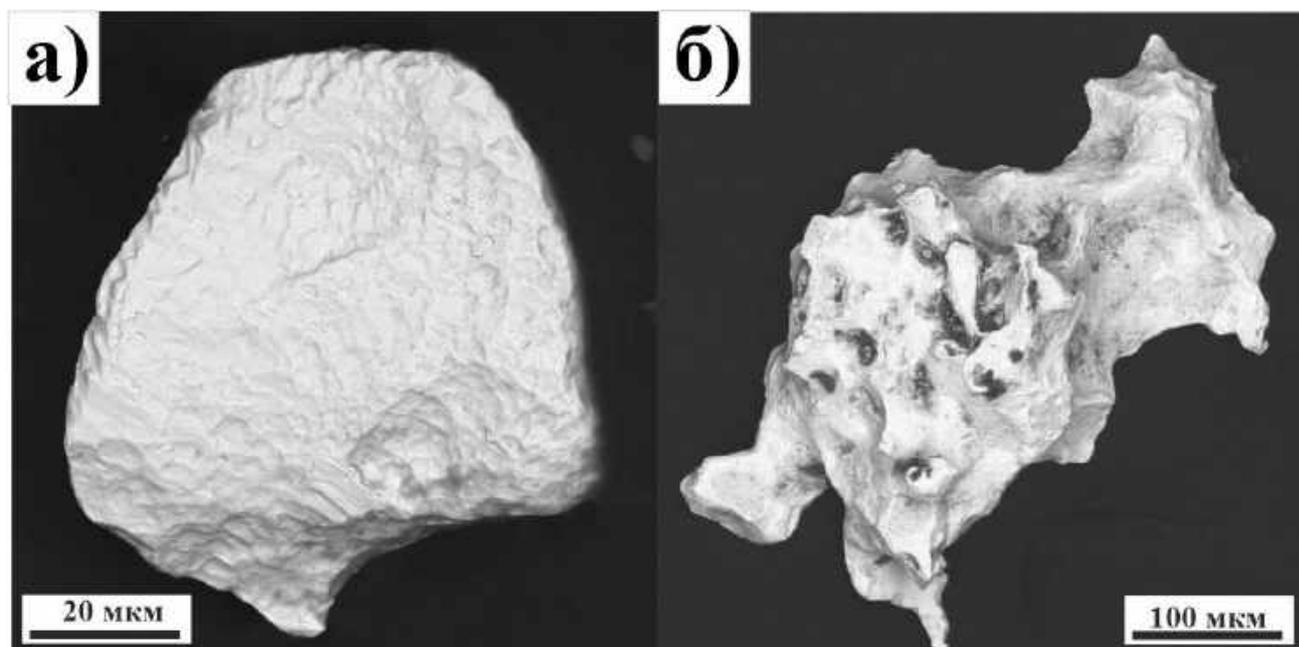


Рисунок 14. Морфология индивидов золота из отвала ТМО намывного типа: а) изометричная частица уплощенного облика; б) вытянутая частица интерстициального облика. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

На частицах золота наблюдаются как скульптуры роста, так и растворения, аналогичные изображенным на рисунке 11.

По данным определения химического состава с поверхности золотин с помощью СЭМ, в отложениях присутствуют зерна разной пробыности. Встречаются частицы Au от низкопробного (743 ‰) до высокопробного (915 ‰), среди примесей обнаружены Hg (до 4 мас. %) и Ag (до 26 мас. %).

Обнаруженные в намывных отложениях золотины, вероятнее всего, попали в отвал в результате сноса вещества с основных двух отвалов, благодаря переносу их дренажными водами ручья, а отложились под действием гравитационных сил на механическом барьере. Однако, последующие морфологические изменения и образования вторичных новообразований происходили именно в отложениях ПОВ.

Помимо этого, на всех изученных частицах из отвалов Ново-Урского хвостохранилища были обнаружены сростки Au с зернами барита, кальцита, халькопирита, кварца, а также гидроксидами железа (рис. 15).

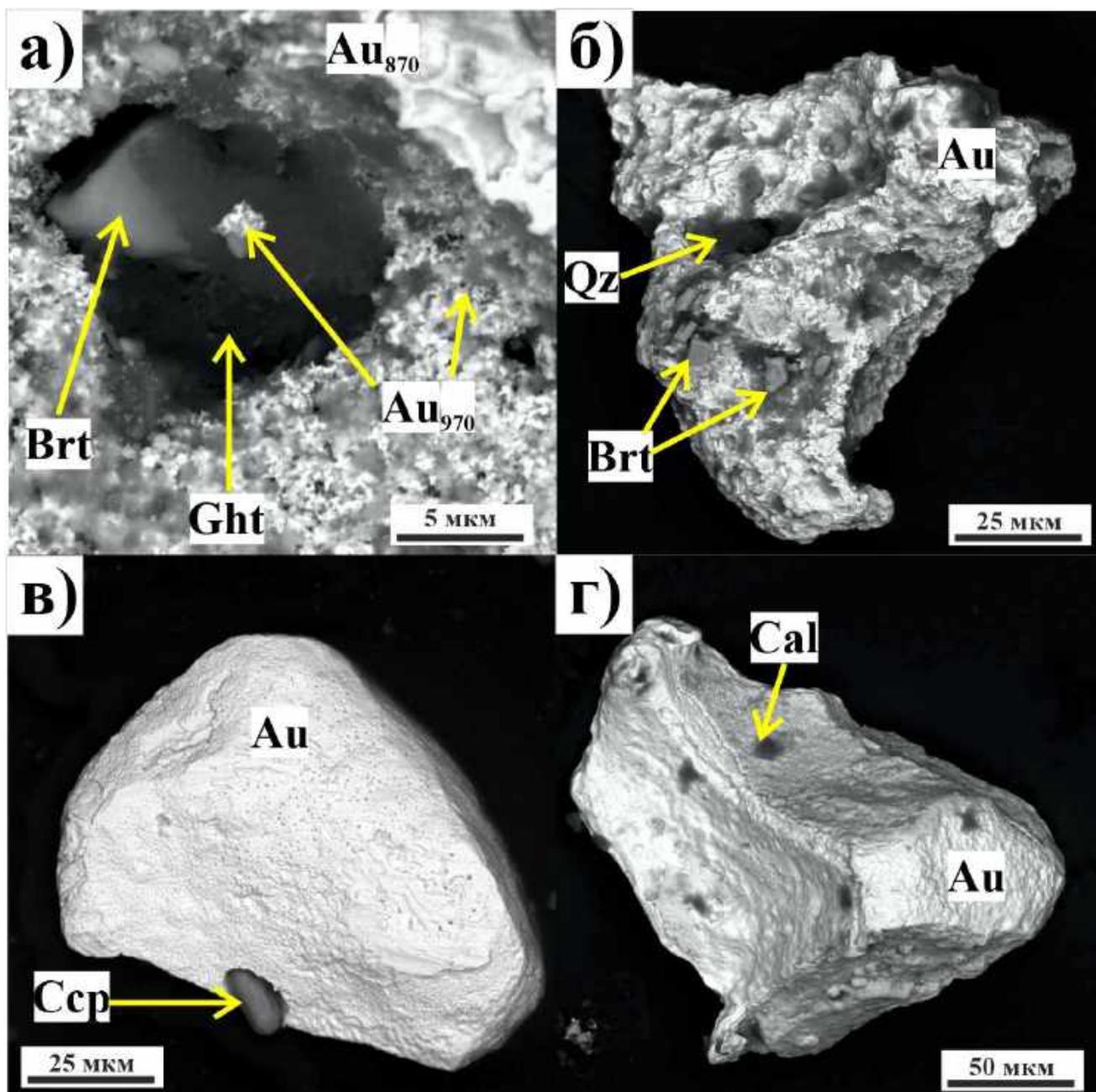


Рисунок 15. Сrostки золота с: а) гидроксидом железа (Ght) и баритом (Brt); б) баритом (Brt) и кварцем (Qz); в) халькопиритом (Сср); г) кальцитом (Cal). Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

Во внутреннем строении золотин из ТМО Ново-Урского хвостохранилища отмечено: а) присутствие наростов микрочастиц золота на границе с поверхностью массивного золота (рис. 16а); б) уменьшение пробыности золота к краям (периферии), реже частица полностью однородна в составе; в) агрегатность в строении частицы. На рис. 16б видно, что золотина состоит из трех разных отдельных индивидов. Таким образом подтверждается, что одним из механизмов

образования новых частиц является механическое слипание остаточного золота, и последующего «объединения» их с помощью новообразованного золота (исходный вид частицы изображен на рис. 10в). Этот же механизм объясняет и укрупнение зерен Au, по крайней мере, его части.

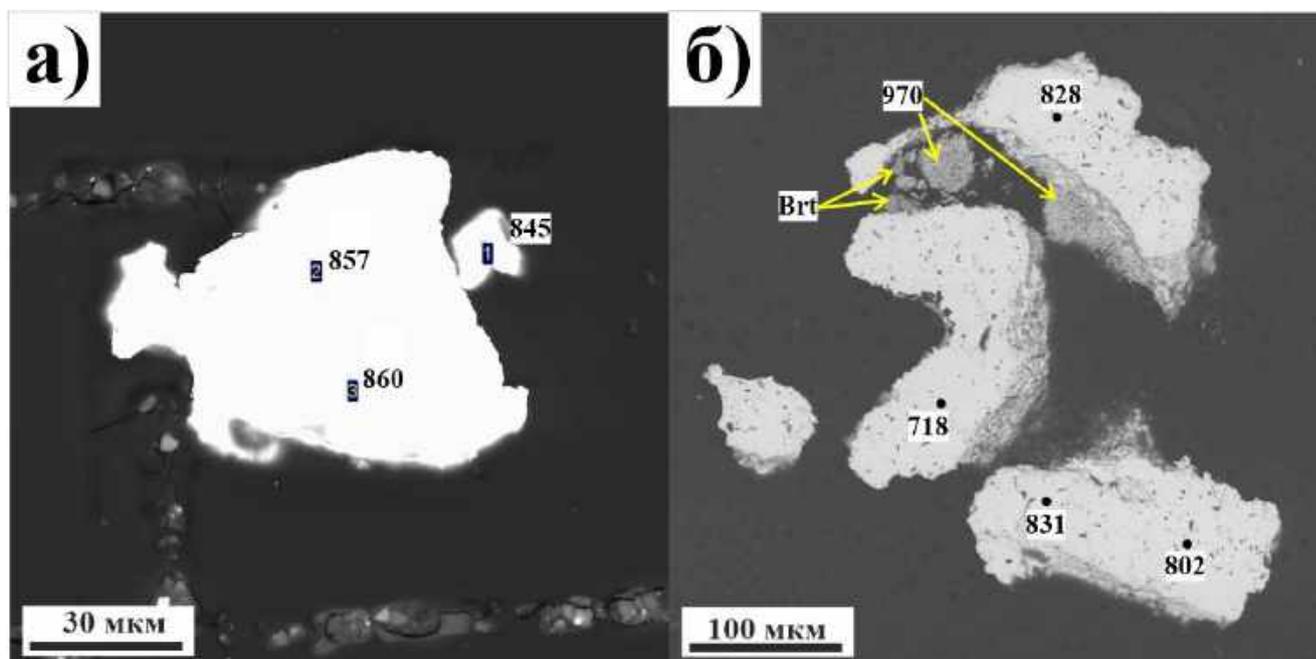


Рисунок 16. Микроструктуры частиц золота из ТМО Ново-Урского месторождения: а) микронаросты золота на границе с поверхностью основной частицы; б) золотины, состоящая из нескольких частей, с наростами «губчатого» золота на контакте с основной золотиной (исх. вид рис. 10в).

Помимо этого, на большинстве золотин из ТМО Ново-Урского месторождения установлены пленки Au-Ag-S-Se-Hg состава (рис. 17, приложение – рис. 17 с дополнениями, табл. 2). Обнаруженные образования разного химического состава, для удобства терминологии объединили под общим названием *гипергенные новообразования*. Чаще всего они плохо диагностируются, вызывая трудности определения стехиометрии минералов. Такую сложность объясняют наличием фазовых смесей (например, для минералов ряда $\text{Ag}_2\text{S} + \text{Ag}_3\text{AuS}_2$, $\text{AgAuS} + \text{Ag}_3\text{AuS}_2$) или существованием твердых растворов $\text{Ag}_2\text{-xAu}_x\text{S}$ [Пальянова и др., 2011; Таусон и др., 2018]. Кроме этого, занижение суммы при анализах связано с микропористостью данных минеральных фаз и появлением дополнительных минеральных фаз и продуктов их последующих преобразований [Нестеренко и др., 1984].

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. 15г, 17б-в) визуально отличаются от тонкозернистых микропористых агрегатов (пленок, рыхлых масс) (рис. 12б, 17а, е). Они приурочены к дефектам (углублениям, ямкам) поверхностей золотин (рис. 15г), а также на гранях зерен (рис. 12б). По составу они близки к минералам: петровскаиту ($\text{AgAu}(\text{S},\text{Se})$), науманниту (Ag_2Se), тиманниту (HgSe).

В рыхлых массах можно наблюдать микрочастицы золота (светлые частицы) (рис. 17 а-б). 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 ютенбогаардита (Ag_3AuS_2) (рис. 17б) в петровскаитовой пленке и фишессерита (Ag_3AuSe_2) (рис. 17г) на поверхности зерна 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. 17г), монтроидиту (HgO) (рис. 17д).

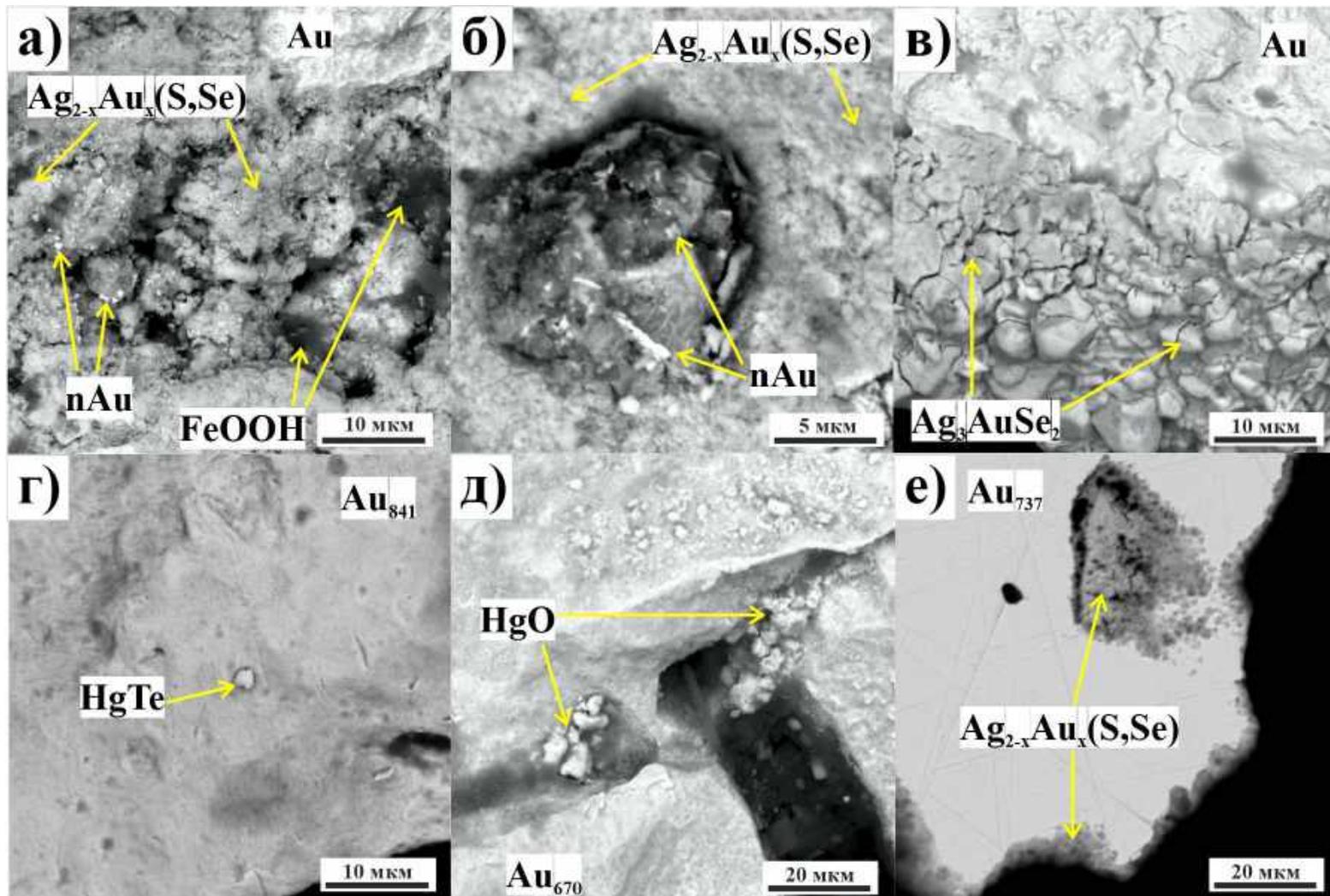


Рисунок 17. Гипергенные новообразования на поверхности золота из отвала ТМО Ново-Урского месторождения: а) петровскитовая пленка с наночастицами золота; б) сростки нанозолота чешуйчатой формы в петровскитовой пленке (ув. фрагмент изображения рис. 15г); в) наросты фишессерита на поверхности золотины; 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.

4.2. БЕЛОКЛЮЧЕВСКОЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ

Золото (17 знаков) было обнаружено в нижней части разреза (горизонт 3) (см. рис. 5в). Золото обладает размерностью 0.5-0.25 мм (39 %), 1-0.5 мм (33 %), 0.25-0.1 мм (22 %), <0.1 мм (6 %). Представлено зернами изометричных и удлинённых форм (рис. 18), вершины граней сглажены, края частиц – загнуты.

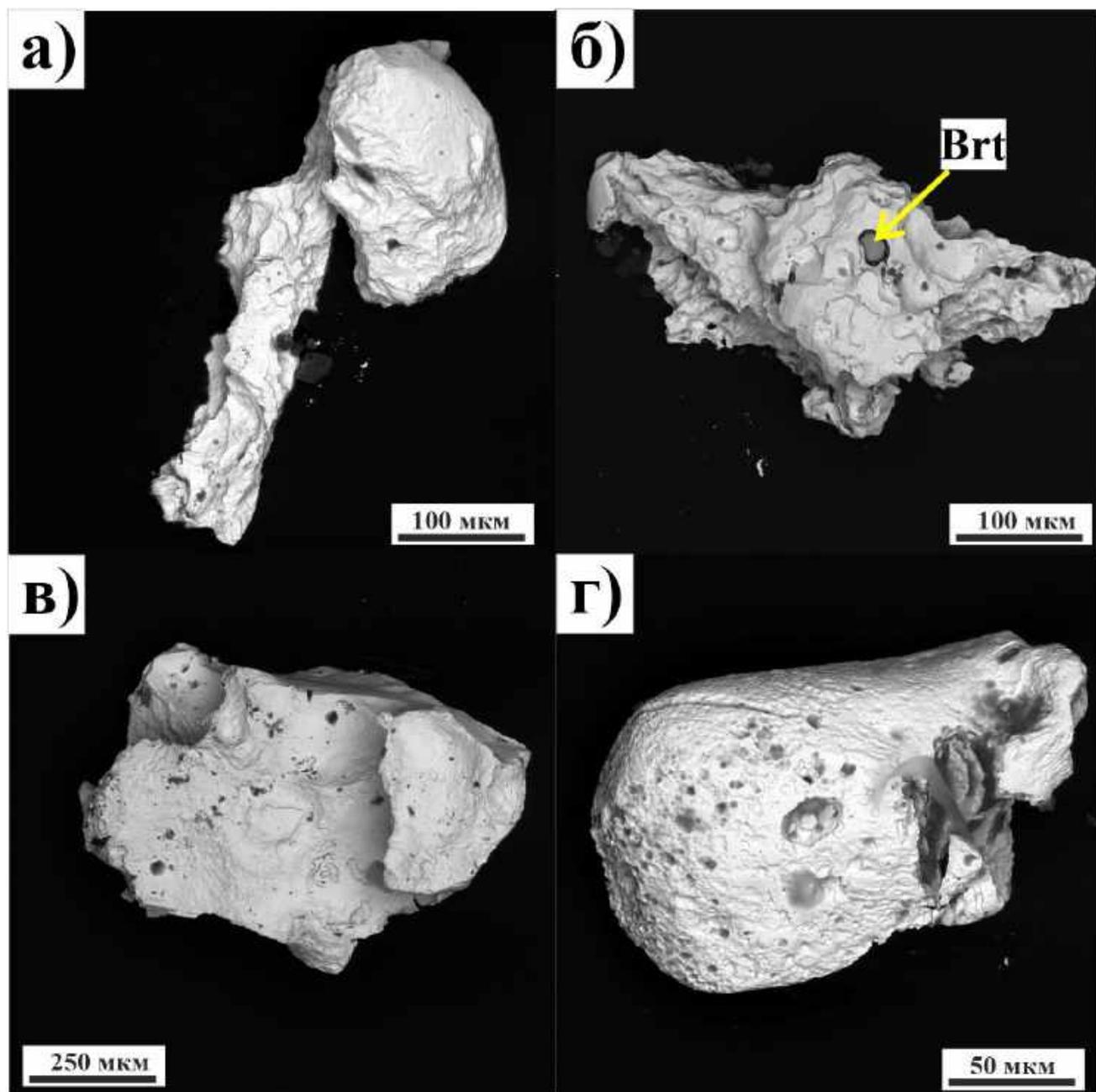


Рисунок 18. Морфология индивидов золота из ТМО Белоключевского месторождения: а) агрегат, состоящий из двух индивидов вытянутой и округлой формы; б) частица интерстициального облика с загнутыми краями; в, г) частицы изометричной формы. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

Скульптуры поверхностей частиц очень разнообразны, присутствуют как элементы роста, так и растворения, часто в сочетании друг с другом. Среди скульптур роста можно отметить наросты на поверхности золотинок микронного размера, натечный и бугорчатый рельеф (рис. 19), микрослоистость (рис. 20 а-б). Помимо этого, на золотишках встречаются скульптуры растворения в форме граней куба и октаэдров (рис. 20 в, д-е), которые часто заполняются новообразованными фазами золота (рис. 20в), и в виде ямчатого рельефа (рис. 18г, 19 д-е).

Изображение 20 г-е подтверждает доказательство укрупнения частиц золота в гипергенных условиях за счет механического слипания более мелких индивидов. На поверхности золотишки, в разных её частях, наблюдаются различные скульптуры растворения простых форм, а именно, на рис. 20д они представлены в виде кубов, а на рис. 20е – октаэдров. Однозначно утверждать, что обнаруженные скульптуры соответствуют только структурам растворения или только роста весьма затруднительно, поскольку эти процессы взаимосвязаны и цикличны.

По данным микронного анализа (табл. 1, приложение), пробность Au варьирует от 847 до 899 ‰, Ag – 9.6-15.7 мас. %; Hg до 0.4 мас. %, Cu – до 0.3 мас. %. Центральная часть золотинок имеет преимущественно пробность выше, к периферии она плавно снижается.

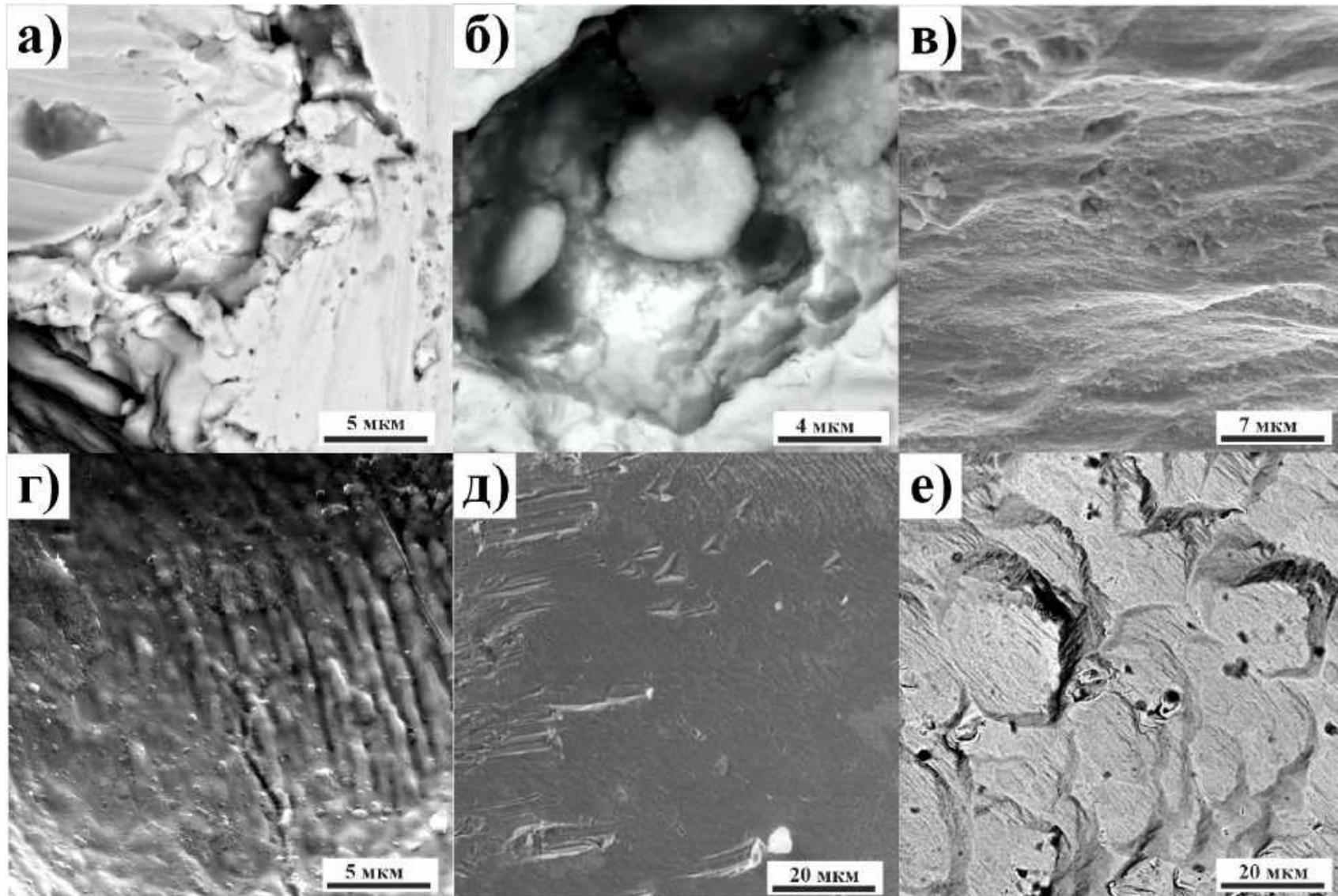


Рисунок 19. Микроскульптуры поверхностей золотин из ТМО Белоключевского месторождения: а) наросты новообразованного золота чешуйчатых форм; б) новообразованная частица в ямке (ув. фрагмент рис. 18г); в) натечный рельеф с новообразованным золотом; г) бугорчатый рельеф; д, е) сткультуры растворения. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

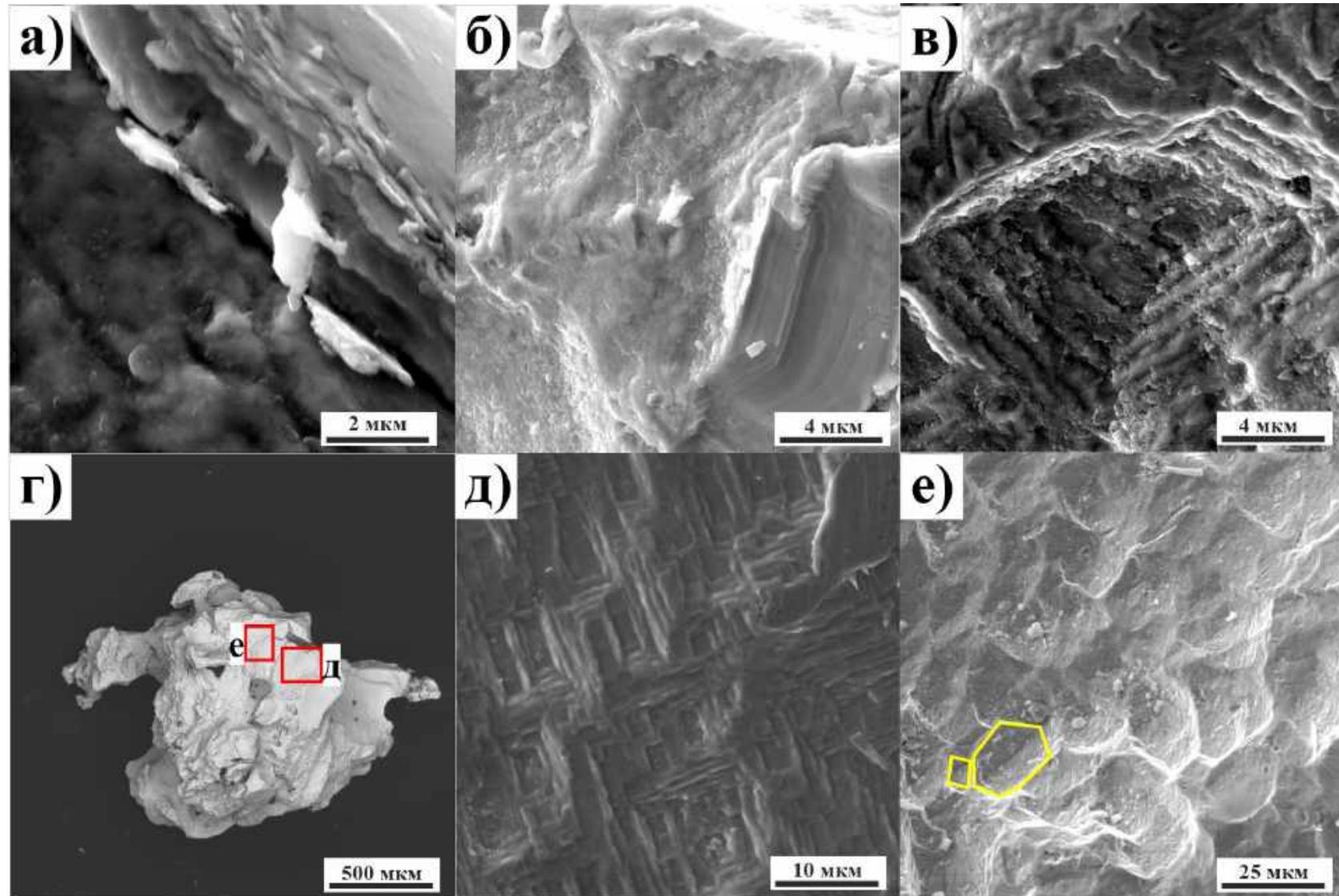


Рисунок 20. Микроскульптуры поверхности золота из ТМО Белоключевского месторождения: а, б) микрослоистость; в) грани октаэдра, которые заполненные новообразованными фазами золота; г) общий вид частицы агрегатного строения; д) скульптуры растворения по граням куба; е) скульптуры растворения по граням октаэдра. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

В изученных частицах обнаружены сростки золота с баритом как на поверхности (рис. 18б), так и внутри (рис. 21а). Помимо этого, в золотиных более мелких классов (<0.25 мм) обнаружены ажурные края (рис. 21б).

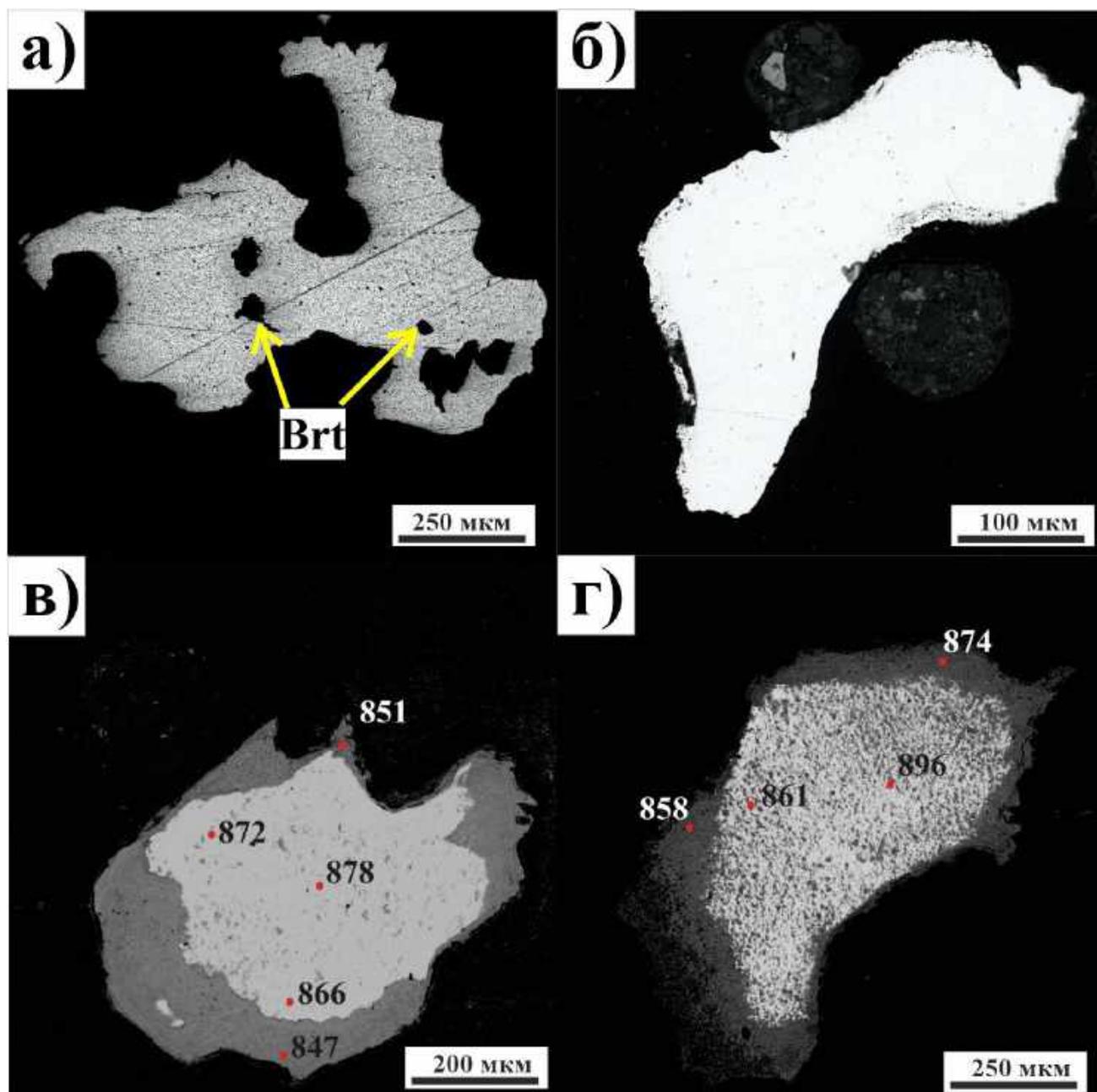


Рисунок 21. Микроструктуры частиц золота из ТМО Белоключевского месторождения: а) зональное распределение пробности по частице, сросток золота с зерном барита; б) ажурные края; в, г) золото после травления – распределение пробности золота по разным участкам.

Таким образом, основные результаты по изучению золотоносности ТМО Ново-Урского и Белоключевского месторождений представлены в табл. 3 (приложение). Поскольку золотины из разных типов ТМО Ново-Урского

месторождения имеют схожие типоморфные данные, то в таблице 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 или в ассоциации с гипергенными минералами в виде единичных или множественных скоплений (рис. 11 а-г, 15а, 19 а-б); 2) присутствие на поверхности частиц различных гипергенных новообразований: пленки и налеты (корочки) по составу близкие к Au-Ag-S-Se-Hg-фазам (рис. 10е, 12б, 5г, 17); 3) сростки золота с зернами барита, гидроксидов железа, халькопирита, кальцита и кварца (рис. 15); 4) скульптуры растворения в виде выщелоченного рельефа (рис. 11д, 18г, 19 д-е), граней октаэдров и кубов (рис. 11е, 20в, д-е), которые сочетают механизм как растворения, так и роста. Для золота из Белоключевского хвостохранилища была обнаружена микрослоистость (рис. 20 а-б).

Обнаруженные гипергенные новообразования (рис. 17) являются показателем активности преобразования вещества в ТМО. Найденные в ТМО Ново-Урского месторождения, они могут образовываться повсеместно в ТМО высокосульфидных месторождений.

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 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.

4.3. ЗМЕИНОГОРСКОЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ

4.3.1. ЗОЛОТО ИЗ ПЕРВИЧНЫХ РУД

В первичных рудах преобладает тонкое и мелкое золото, преимущественно класс <math><0.1\text{ мм}</math> (56 %) и $0.25-0.1\text{ мм}$ (32 %), меньше $0.5-0.25$ (10 %), $1.0-0.5\text{ мм}$ (2 %). Встречаются чаще изометричные и вытянутые формы индивидов, реже уплощенные (рис. 22).

На поверхности частиц наблюдаются скульптуры роста в виде «губчатых» наростов (рис. 22 в-г), часты сростки золота с кварцем и баритом (рис. 22б).

По данным микронзондового анализа (табл. 1, приложение), можно выделить 2 типа частиц золота. 1. Блокового строения (40 % от общего количества), где четко выделяются две фазы (рис. 23 б-в, д): 1 (более темная) состава: 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. %; причем в прожилках пробность золота повышается до 84 мас. %, Ag до 16 мас. %. 2. Однородного внутреннего строения (60 % от общего количества) (рис. 23 а, г, е) – Ag до 41 мас. %, Au до 72 мас. %, в каемках пробность золота достигает 90 мас. %, Ag до 24 мас. %.

В золотилах отмечены сростки и включения золота с баритом, кварцем, бромаргиритом, акантинном, фенакитом, аргиродитом, сфалеритом, оксидами и гидроксидами Mn, Fe (рис. 23).

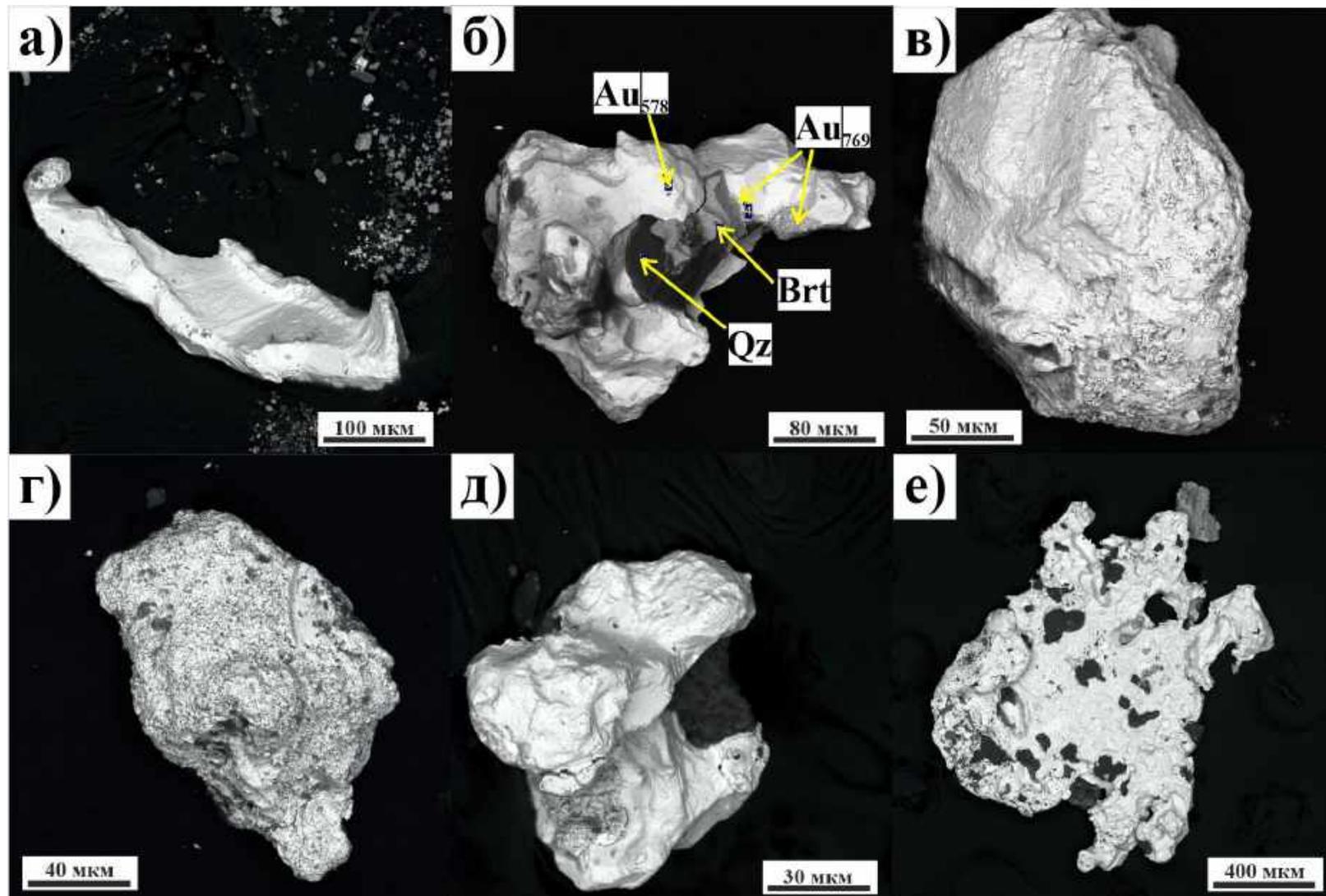


Рисунок 22. Морфология индивидов золота из первичных руд Змеиногорского месторождения: а) вытянутая частица таблитчатой формы уплощенного облика; б) частица изометричной формы с сростками барита и кварца; в-г) изометричные частицы кристаллического облика, покрытые «губчатым» золотом на поверхности; д) угловатая изометричная частица; е) уплощенная частица изометричной формы, поверхность которой покрыта «губчатым» золотом. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

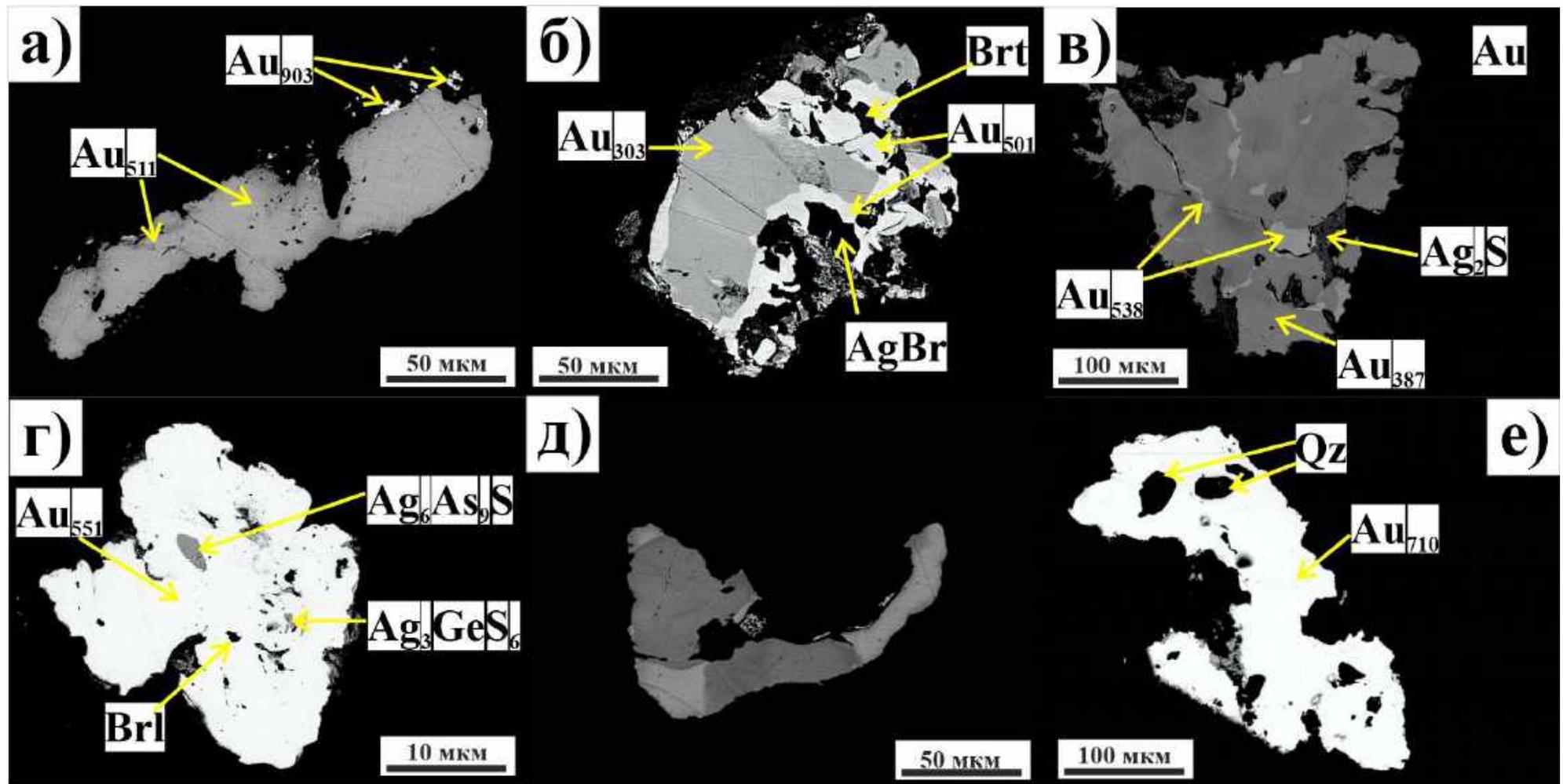


Рисунок 23. Микроструктуры золота из первичных руд Змеиногорского месторождения: а) золотины с однородным строением и каемками высокопробного золота; б) золотины с зональным строением и включениям бромаргирита (AgBr) и барита (Brt); в) зональное строение частицы, сростки золота с акантитом (Ag_2S); г) золото с однородным внутренним строением и включениям берила (Brl), аргиродита (Ag_8GeS_6) и пирреита $\text{Ag}_6\text{As}_9\text{S}$); д) зональное строение золотины с «губчатым» образованием; е) золотины с однородным строением и включениями кварца (Qz).

4.3.2. ЗОЛОТО ИЗ ОКИСЛЕННЫХ РУД

В окисленных «змеиногорских» рудах преобладает тонкое и мелкое золото, а именно, класс 0.25-0.1 мм (38 %) и <0.1 мм (24 %), меньше 0.5-0.25 (17 %), 1.0-0.5 мм (21 %). Это, преимущественно, частицы вытянутых, изометричных форм (рис. 24), поверхность которых покрыта губчатым золотом (рис. 25 д-е) в ассоциации с малахитом, баритом (рис. 24).

Внутреннее строение частиц Au аналогично строению таковых из первичных руд. Однако, в окисленных рудах на частицы с блоковым (зональным) строением приходится около 90 % от общего числа всех исследуемых зерен, тогда как на однородные – только 10 %.

По данным микрозондового анализа, частицы с блоковым строением имеют две 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. %. Золотины с однородным составом – Ag до 44 мас. %, Au до 55 мас. %. Кроме того, обнаружены включения и сростки золота с галенитом и платтеритом (рис. 25).

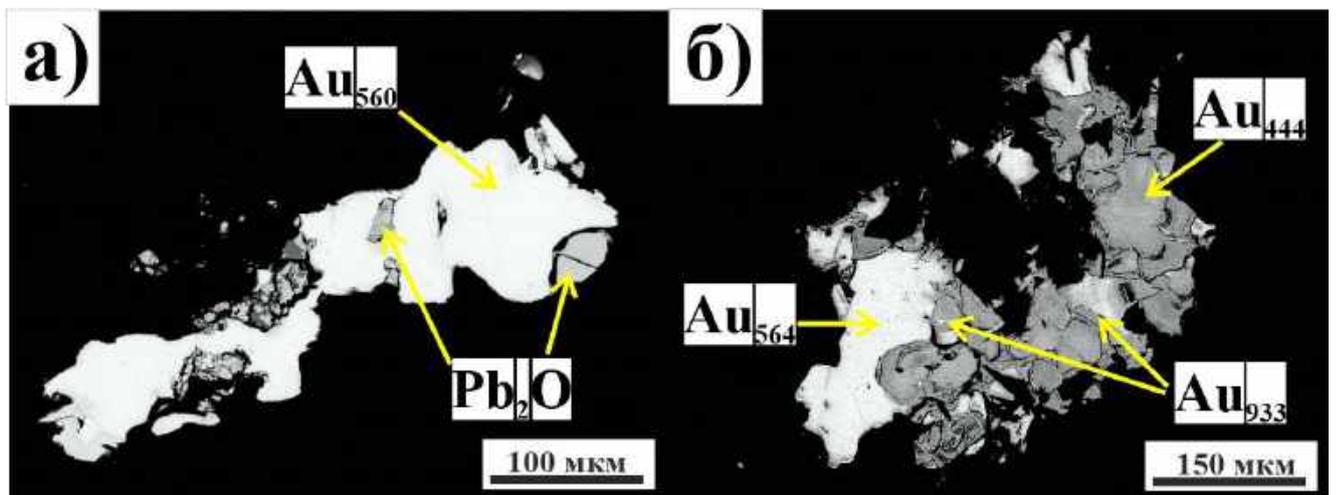


Рисунок 25. Микроструктуры золота из зоны окисления Змеиногорского месторождения: а) золото с однородным внутренним строением и включениями платтерита (PbO₂) внутри и снаружи частицы; б) зональное строение внутри частицы.

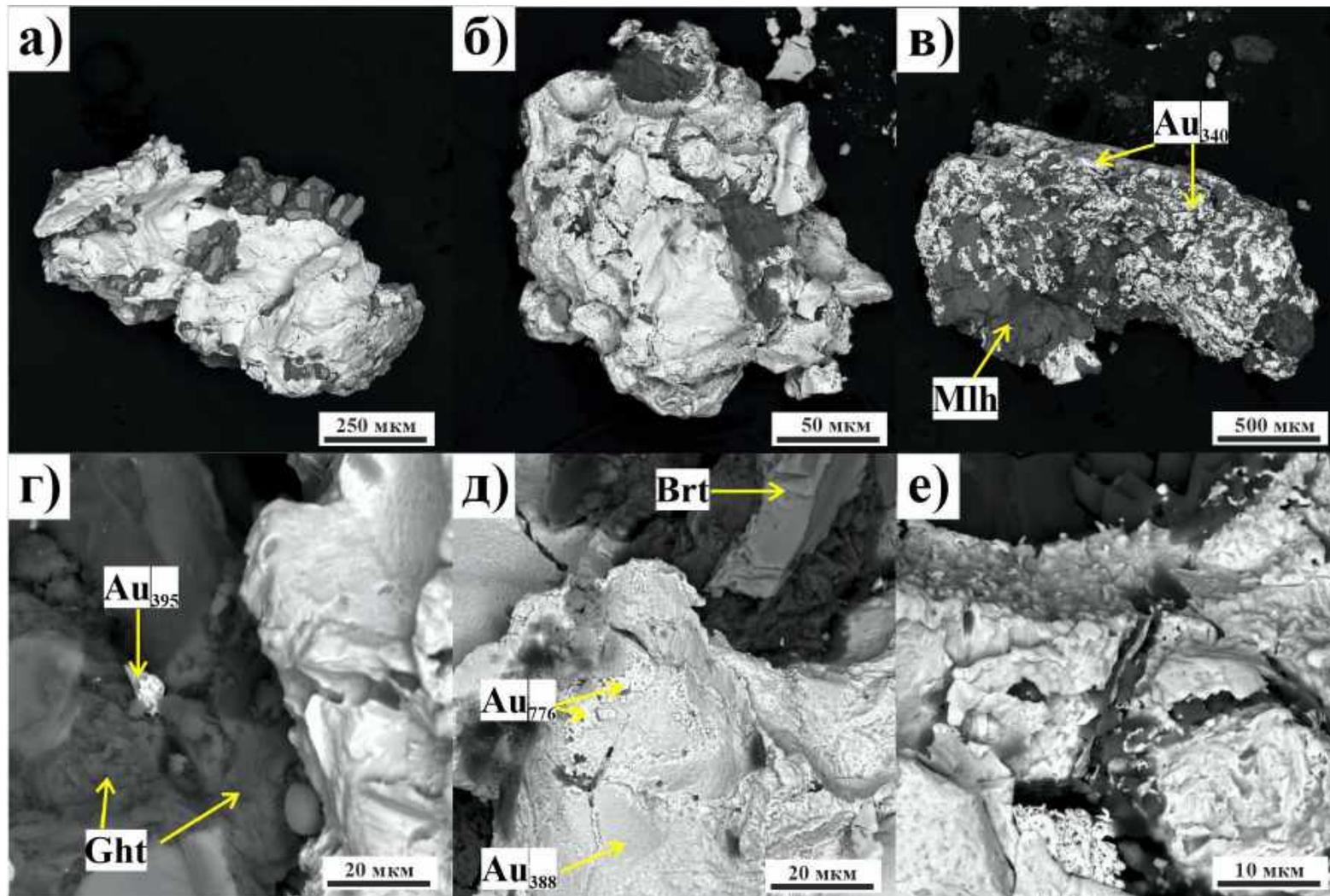


Рисунок 24. Морфология индивидов и микроскульптуры поверхностей золота из зоны окисления Змеиногорского месторождения: а) вытянутая частица золота с сростками малахита; б) изометричная частица с сростами малахита, поверхность золотины покрыта «губчатыми» образованиями золота; в) вытянутая частица с сростками малахита, покрытая на поверхности золотом «губчатых» форм; г) микрочастицы золота в плотной гидроксидной пленке; д-е) ув. фрагменты поверхности частиц – «губчатое» золото в ассоциации с гипергенными минералами, расположенное по трещинам и неровностям поверхности золотины. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

4.3.3. ЗОЛОТО ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

«Змеиногорское» золото в техногенных отложениях распределяется следующим образом: преобладает тонкое и мелкое – класс 0.5-0.25 мм (24 %) и <0.1 мм (53 %), меньше 0.25-0.1 мм (14 %), 1.0-0.5 мм (9 %). По морфологии это вытянутые и изометричные частицы, реже уплощенного облика (рис. 26). Визуально зерна близки к остаточным из первичных и окисленных руд. Кроме того, присутствуют зерна агрегатного строения (рис. 26б) и уплощенного облика (рис. 26е), состоящие из пластинчатых кристаллов, которые отсутствуют в исходных рудах, благодаря чему их можно отнести к новообразованным частицам.

Микроскульптуры поверхностей золота из техногенных отложений Змеиногорского месторождения очень разнообразны (рис. 27). На золотилах присутствуют причудливые новообразованные формы нано- и микрочастиц Au, натечные формы, также золото находится в сростках с гипергенными минералами. К скульптурам растворения можно отнести ямчатый рельеф и элементы граней октаэдра (рис. 27 д-е).

Внутреннее строение и химический состав золота из ТМО частично унаследовано от первичных и окисленных руд (табл. 1, табл. 4, приложение). Однако, заметно значительное увеличение мощности каемок и прожилков (до 10 мкм), изменение их состава с 900 до 980 ‰ Au.

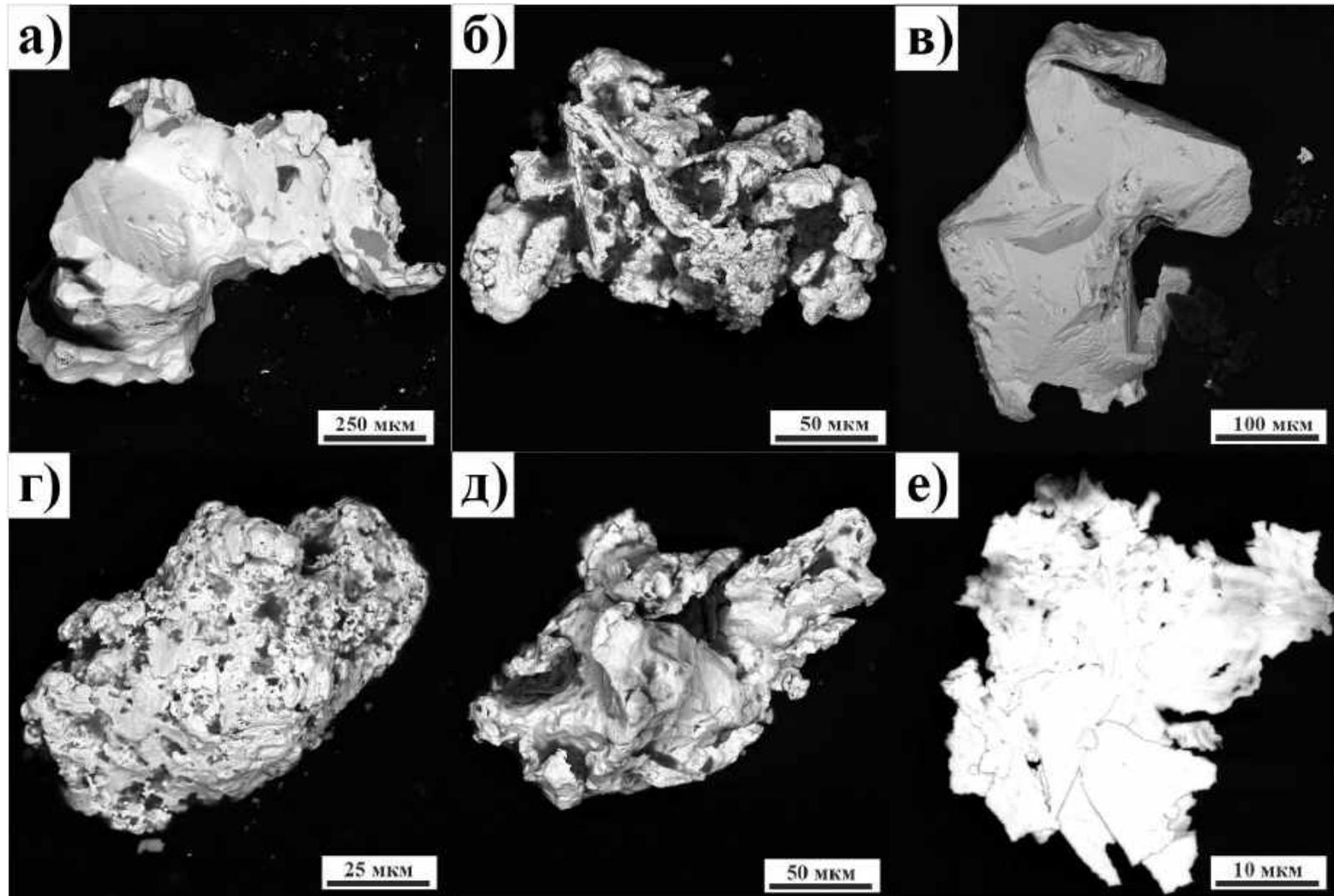


Рисунок 26. Морфология индивидов золота из ТМО Змеиногорского месторождения: а) вытянутая частица интерстициального облика; б) золото агрегатного строения (новообразованная); в) изометричная частица кристаллического облика; г) вытянутая частица с наростами «губчатого» золота на поверхности; д) вытянутая частица интерстициального облика; е) изометричная частица уплощенного облика (новообразованная). Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

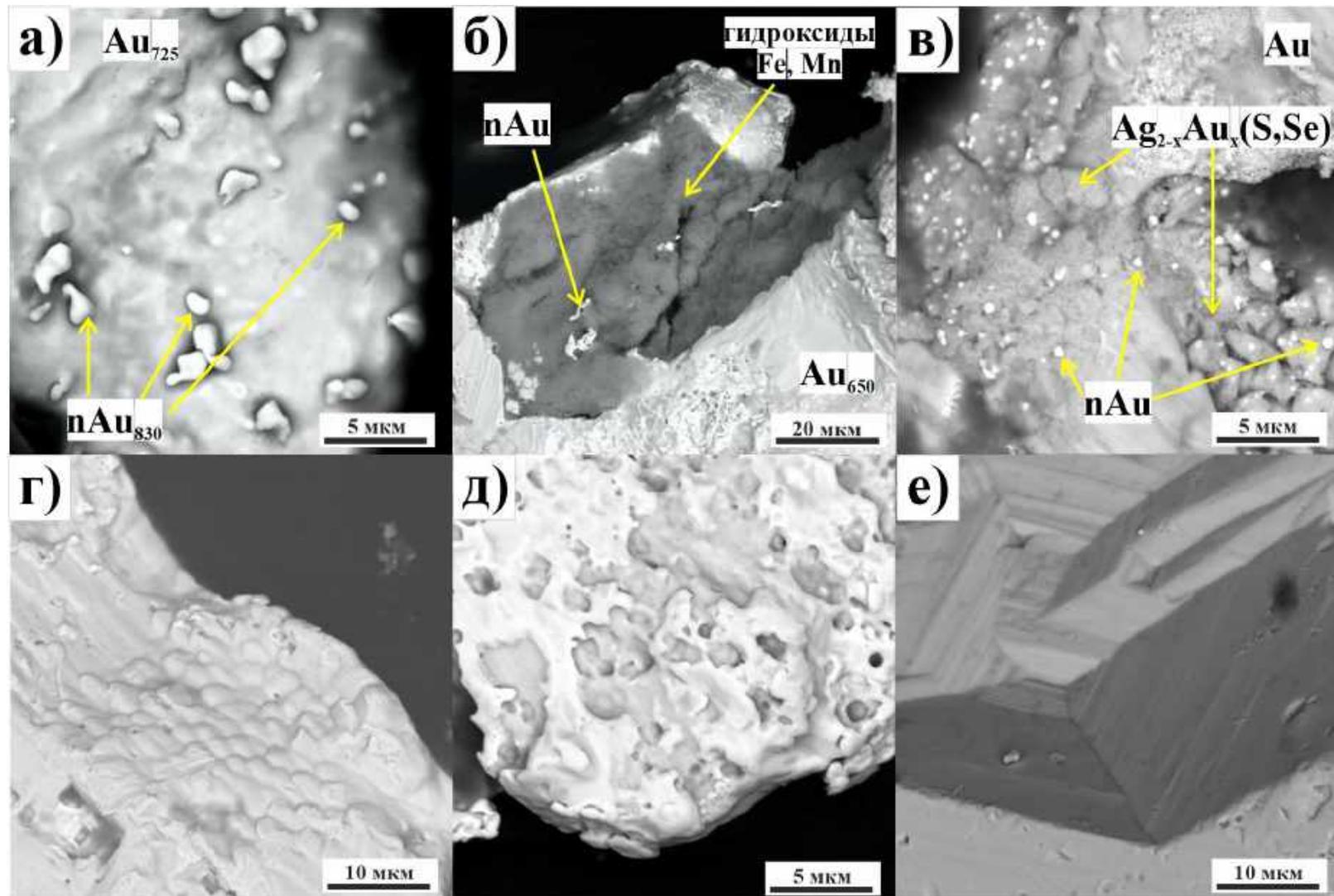


Рисунок 27. Микроскульптуры поверхностей золотин из ТМО Змеиногорского месторождения: а) наросты золота чешуйчатых и округлых форм на поверхности массивной частицы; б) новообразованное золото в ассоциации с гидроксидами Fe, Mn; в) микрокристаллиты золота в пленке петровскаитового состава; г) натечные формы на поверхности золотины; д) структуры растворения в виде ямчатых форм; е) скульптуры растворения в виде граней октаэдра. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

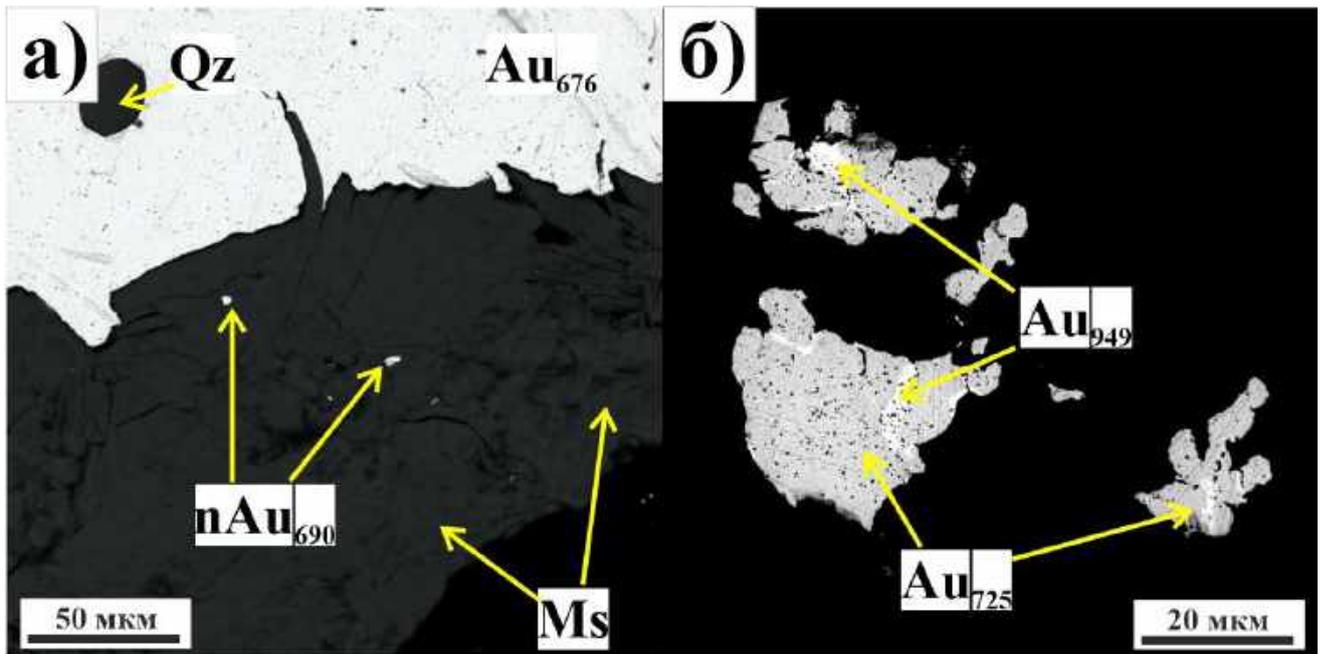


Рисунок 28. Микроструктуры золота из ТМО Змеиногорского месторождения: а) сростки золота с кварцем и микрочастицы Au в мусковите; б) прожилки высокопробного золота внутри частицы.

Таким образом, на Змеиногорском месторождении видимое самородное золото обнаружено в первичных, окисленных рудах и техногенных отложениях. Подробное описание и сравнение типоморфных характеристик представлено в таблице 4 (приложение). В ТМО присутствует новообразованное золото и многообразие остаточного золота 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 серебросодержащих минералов и минералов ряда кюстелит – самородное золото, которые были обнаружены и описаны ранее в разделе 4.3.1. 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. 4, приложение).

Среди морфологических 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.

4.4. КОМПЛЕКС ПРИЗНАКОВ ГИПЕРГЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОТА

На основе детального изучения золота с помощью сканирующего электронного микроскопа и электронно-микросондового анализа, были выделены внешние и внутренние признаки, которые свидетельствуют о том, что в ТМО золото, недоизвлеченное при промышленной добыче, подвергается гипергенным преобразованиям. Обнаруженные признаки доказывают мобильность золота внутри ТМО, а именно, что золото растворяется, мигрирует и осаждается вновь. При этом, некоторые из признаков, частично или полностью, показывают механизмы роста и растворения собственно самородных частиц золота.

4.4.1. МИКРОСКУЛЬПТУРЫ РОСТА

К скульптурам роста и укрупнения золотоносных фаз можно отнести частицы золота *нано- и микронных размеров* на поверхности золотин, которые были описаны ранее для всех изученных объектов (ТМО Ново-Урского, Белоключевского и Змеиногорского месторождений).

Новообразованное золото обнаружено повсеместно, как на поверхности самородных частиц в виде одиночных зерен или скоплений (рис. 11 а-г, 19 а-б, 27а, 29 а-в), преимущественно, чешуйчатых, таблитчатых и сферолитовых форм, так и

в ассоциации с различными минералами (каолинит, гидроксиды Fe, барит) (рис. 15а, 17а, 27 б-в, 29 г-д). Новообразованные фазы золота встречаются как на ровных, гладких поверхностях золотин, так и на возвышенностях рельефа и углублениях, неровностях. При этом, обнаружено различие химического состава новообразованных фаз и матричного золота (рис. 29).

На изображениях (рис. 15а, в, рис. 18б, рис. 21а) наглядно показан механизм совместного роста и укрупнения золота с вмещающими его минералами, что является частой находкой для золота из ТМО Ново-Урского и Белоключевского месторождений.

Зерна агрегатного строения также являются доказательством укрупнения частиц. Обнаруженные нано- и микрочастицы на поверхности золотин, при последовательной концентрации и укрупнении, образуют более крупные кластеры, в виде сфероидов, а затем агрегатов и самостоятельных выделений сложных и простых форм [Falconer, Craw, 2009; Осовецкий, 2013; Кузнецова и др., 2019]. Данный пример проиллюстрирован на рисунке 30.

Другими подтверждениями являются описанные ранее разные скульптуры растворения на фрагментах одной частицы (рис. 20г-е) и полированный срез частицы, состоящий из более 3-х частей, изображенный на рис. 16б. Данные находки в очередной раз подтверждают укрупнение золота в техногенных образованиях. Укрупнение может происходить как за счет механических, так и химических процессов. Разновозрастные частицы соединяются между собой с помощью неструктурированного золота. Такие агрегаты являются очень хрупкими и трудно диагностируемыми.

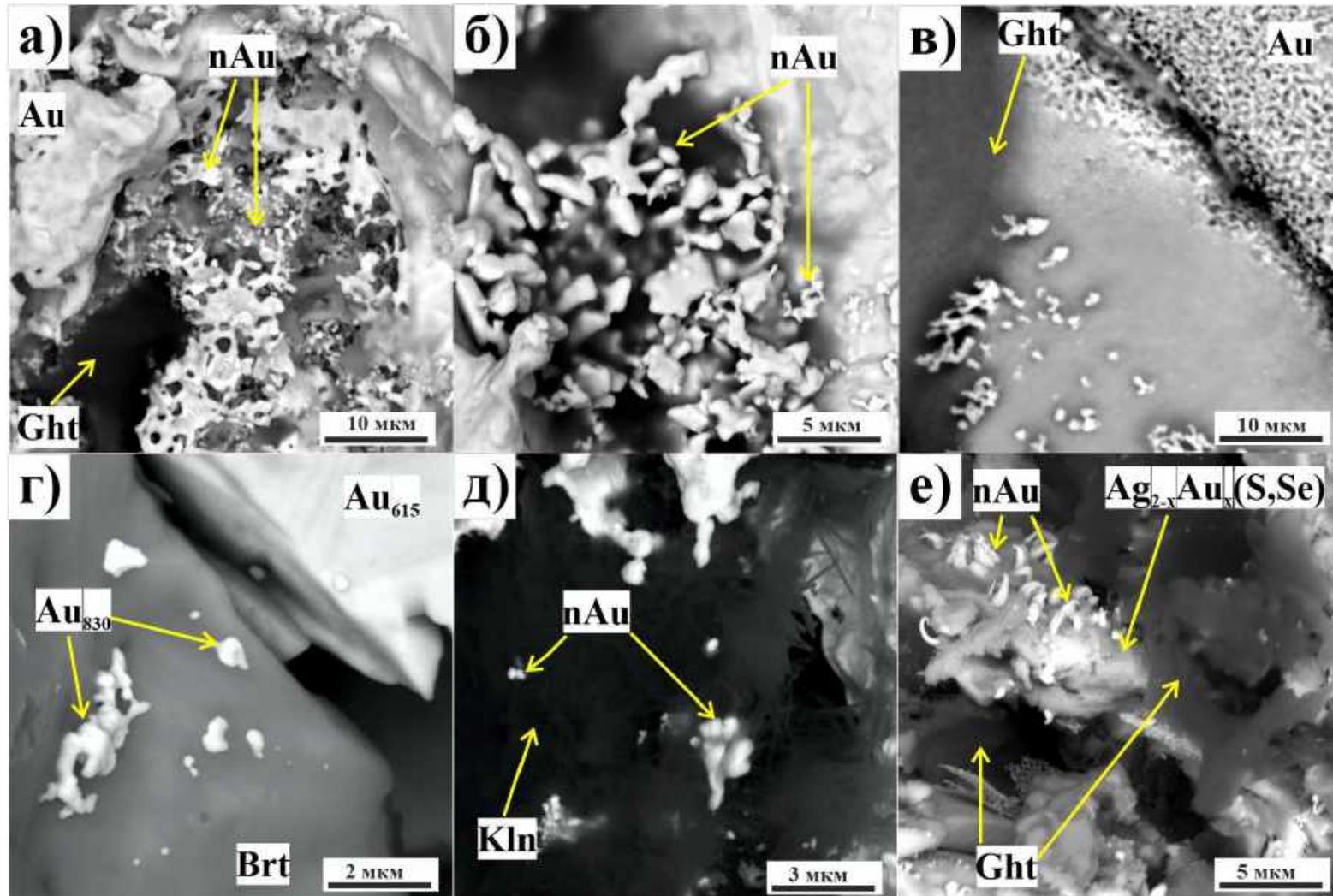


Рисунок 29. Новообразованные фазы золота на различных поверхностях: а) скопления нано- и микрочастиц Au «амебообразных» форм на поверхности золотины; б) скопления нано- и микрочастиц Au пластинчатых, чешуйчатых и сферолитовых форм на поверхности золотины; в) единичные зерна и скопления микрочастиц золота вытянутых форм; г) единичные зерна и скопления нано- и микрочастиц Au на поверхности зерна барита (Brt); д) ассоциация нано- и микрочастиц Au в каолините (Kln); е) вытянутые (дендритные) наночастицы в рыхлой пленке петровскаита и гидроксидов Fe (Gh). Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

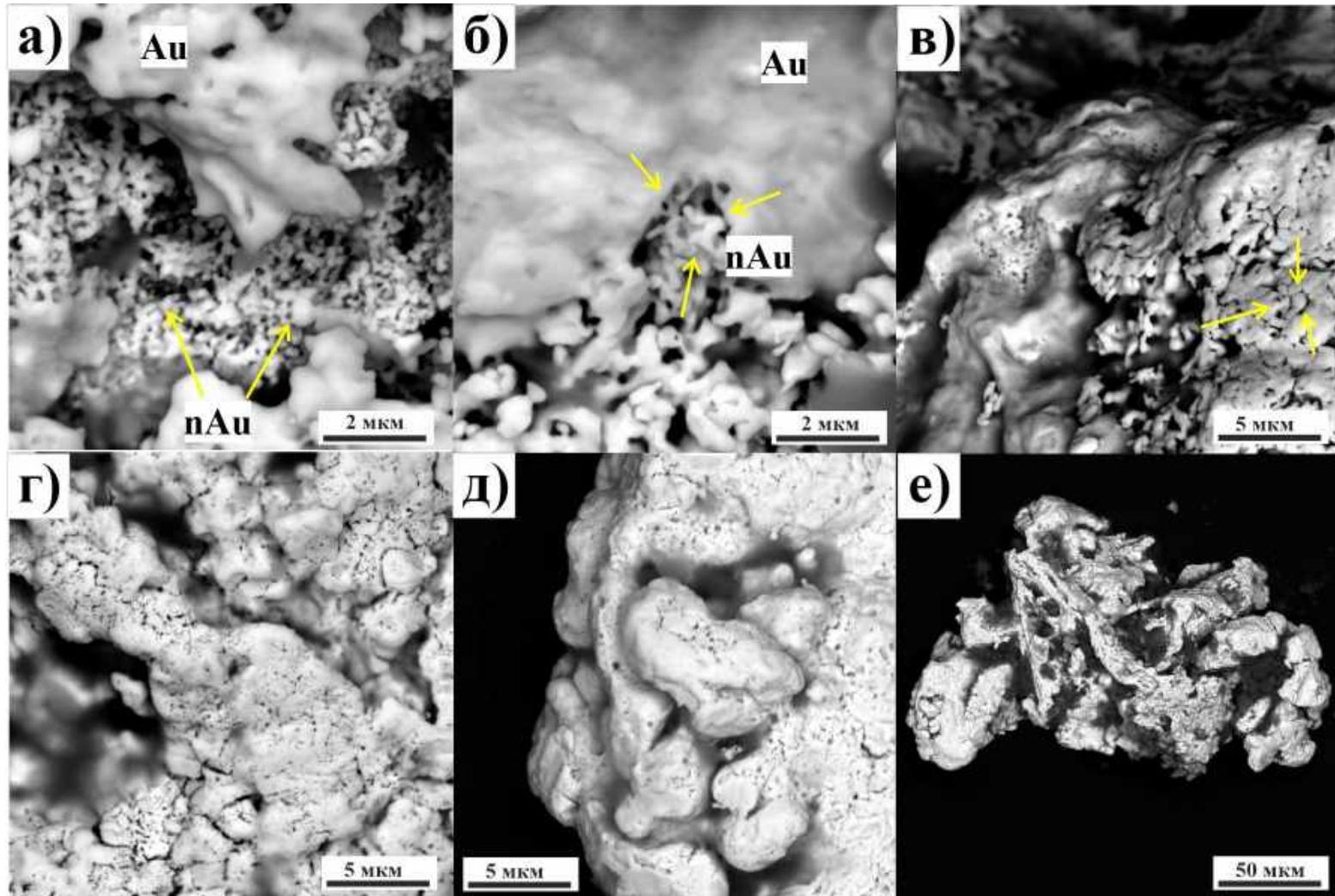


Рисунок 30. Механизм роста и укрупнения частиц агрегатного (глобулярного) строения золота из хвостохранилища Змеиногорской ЗИФ: а) скопление наночастиц Au, которые при укрупнении и соединении формируют губчатые формы; б-в) объединение массивного однородного золота и губчатых скоплений; г) пористая поверхность 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 которых расположены гидроксидные пленки. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

В отвалах новообразованное золото может мигрировать в самородном состоянии, высвобождаясь из сульфидных минералов, или с помощью минерализованных растворов, в виде комплексных соединений, и осаждаться под действием гравитационных сил и/или в результате смены физико-химических условий на геохимических барьерах.

Следующим признаком являются *элементы слоистости*, описанные ранее в разделе 4.2 (рис. 20 а-б). Визуальные мощности слоев $<1 \mu\text{m}$. Также, на частицах часто можно обнаружить индукционные поверхности (рис. 10б), которые свидетельствуют о совместном росте золотины с вмещающими минералами.

Помимо этого, ранее были описаны скульптуры роста/растворения в виде воронкообразных форм по граням куба или октаэдров (рис. 11г, е, 20 в-е, 26в, 27е). Их особенность заключается в том, что края кристаллов полностью развиты, но внутреннее пространство не заполнено. Согласно [Краснова, Петров, 1997; Burke et al., 2017], воронкообразная форма образуется при преобладании диффузионного лимита в процессе роста. А рост скелетных форм – 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). С другой стороны, эти формы могут образовываться в результате растворения, как было показано ранее. Однако, рис. 20в подтверждает сложность данного процесса, показывая цикличность и взаимосвязь данных процессов.

4.4.2. МИКРОСКУЛЬПТУРЫ РАСТВОРЕНИЯ

К скульптурам растворения можно отнести изъеденную поверхность (рис. 31) с мелкочаеистым и ямчатым рельефом, образующийся при взаимодействии поровых растворов с поверхностным слоем золота (рис. 11 в-е, 18 в-г, 19 д-е, 20 д-е, 27 д-е).

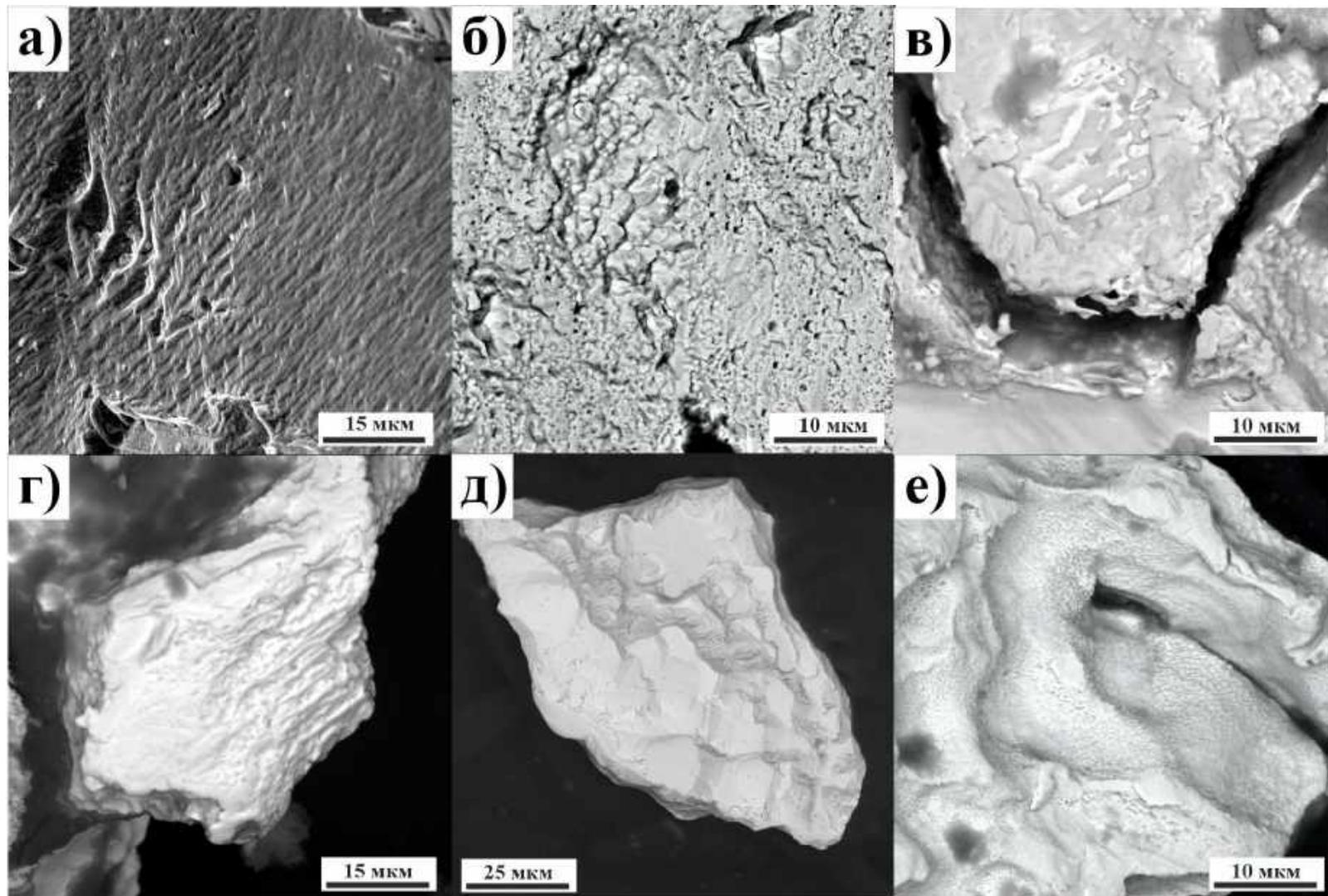


Рисунок 31. Микроскульптуры растворения: а) натечный рельеф, показано направление протекания растворов по поверхности золотины; б) выщелоченный рельеф с микроямками; в) изъеденная поверхность; г) более изъеденная часть золотины, сформировались своеобразные желобки; д) образованные ступенчатые элементы в результате растворения, на границах уровней поверхностей выделяются желобки; е) натечные формы растворения в виде мелкой ряби. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

Одним из возможных результатов взаимодействия поверхностного слоя золота и поровых (минерализованных) растворов является не только выщелоченная поверхность зерен, но и гипергенные новообразования (Au-Ag-S-Se-Hg-состава) на поверхности золотин в виде пленок, налетов, корочек (описанные ранее в разделе 4.1.3, рис. 17). Образованные таким образом частицы золота, могут играть существенную роль в мобильности Au в системе ТМО. Присутствие Cl, Br, I соединений в составе этих минеральных парагенезисов доказывает роль гипергенных процессов в образовании этих новообразований [Кужугет, 2014, 2018]. Однако, автор не исключает возможность их образования как при формировании зоны окисления по первичным колчеданным рудам [Нестеренко и др., 1984; Савва и др., 2010], так и при извлечении золота различными окислителями для промышленных производств [Senanayake, 2004; Birich et al., 2019; Wang et al., 2019].

4.4.3. МИКРОСТРУКТУРЫ ЗОЛОТА

Микроструктуры являются внутренним показателем преобразования золота в ходе его эволюции, благодаря которым можно выделить как элементы роста, так и растворения.

Среди внутренних изменений частиц для изученных объектов можно выделить *образование и увеличение мощности высокопробных прожилков и кайм* в золоте (рис. 28б), которые формируются благодаря диффузионным процессам очищения золота от элементов-примесей. Кроме того, обнаружены *ажурные края* (рис. 21б), *сростки золота с минералами* (рис. 21а), *сростки микрочастиц золота с поверхностью золотины* (рис. 16а) и *«губчатые» образования* (рис. 16б). Данные находки также свидетельствуют о гипергенных преобразованиях золота в техногенных отвалах.

Вышеизложенное служит доказательством *первого защищаемого положения*: **В техногенно-минеральных образованиях сульфидного типа золото подвергается процессам растворения, миграции и осаждения.**

Происходит укрупнение золотинок, формирование наростов Au разных форм и размеров на поверхности самородных частиц и образование сростков Au с гипергенными минералами.

ГЛАВА 5. ОБОБЩЕННАЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОТА

Термодинамическое моделирование поведения Au проведено для хвостохранилища переработанных руд Ново-Урского месторождения, которое относится к колчеданно-полиметаллическому типу оруденения с развитой зоной окисления.

Для уточнения механизма формирования горизонта вторичного золотого обогащения и поведения Au и Ag внутри ТМО, автором были проведены более детальные минералогические и термодинамические исследования. Для этого более детально был изучен разрез кварц-пиритового отвала, который был описан ранее в разделе 3.1.3. Разрез состоит из трех макроскопически различимых горизонтов (сверху вниз, см. рис. 4б): 1) *серо-синеватый* кварц-барит-пиритовый (h = 40 см) с жеодами кремнезема; 2) *бурожелезняковый* (h = 40 см); 3) *сланцевый* (h = 50 см), лежащий непосредственно на почве. Распределение содержания Au и Ag по разрезу неравномерное (см. рис. 4б).

На основании данных полученных с помощью РФА, в табл. 5 приведен минералогический и химический состав отложений по разрезу.

Таблица 5.

Минералогический и химический состав отложений ТМО Ново-Урского месторождения

Выделенные зоны разреза	Состав твердых фаз реальный	Вес. % главных оксидов
Верхняя часть горизонта 1	Барит, пирит, кварц, сульфаты Fe, Cu	SiO ₂ 14.35; Fe ₂ O ₃ 3.47; BaO 55.05; SO ₃ 24.19; ППП 2.32
Нижняя часть горизонта 1	Кварц, пирит, барит, сульфаты Fe, Cu, CaCO ₃	SiO ₂ 7.11; Fe ₂ O ₃ 8.05; BaO 4.22; SO ₃ 18,29; Al ₂ O ₃ 1.2; CaO 34.2; ППП 25.29
Горизонт 2	Кварц, гидроксиды железа, ярозит, барит, глинистые минералы, гипс	SiO ₂ 40.19; Fe ₂ O ₃ 13.26; BaO 10.88; SO ₃ 10.92; Al ₂ O ₃ 6.22; CaO 5.86; ППП 10.42
Горизонт 3	Кварц-альбит-хлоритовые сланцы, глинистые минералы, обильные гидроксиды железа, почва	SiO ₂ 63; Fe ₂ O ₃ 10; BaO 0.3; SO ₃ 0.3; Al ₂ O ₃ 12; CaO 0.7; Na ₂ O 1.6, K ₂ O 1.8; ППП 9 (среднее)

В первых двух горизонтах было обнаружено видимое самородное золото (описанное ранее в разделе 4.1.1). Хочется отметить, что явных морфологических и химических различий в них не обнаружено. Золото несет на себе следы гипергенных преобразований. Однако, в горизонте 1 обнаружено в 7.5 раз больше золотин, чем в горизонте 2.

При постановке задачи принимаем, что рассматриваемая система устойчиво стационарна (способна самопроизвольно возвращаться в исходное состояние при внесении внешних возмущений), в ней выделено конечное число локально-равновесных участков, по которым имеется геохимическая информация. Начальным условием является стабильность барит-пиритовой ассоциации с золотом, конечным – установление термодинамического равновесия конкретной минеральной ассоциации с раствором в зависимости от Eh-pH условий. Феноменологический принцип частичных равновесий позволяет описать необратимую эволюцию безусловно неравновесной сульфидсодержащей гипергенной системы «ТМО-вода-атмосфера».

Главной целью моделирования было установить главные формы нахождения золота в растворе и 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 .

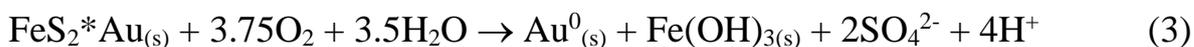
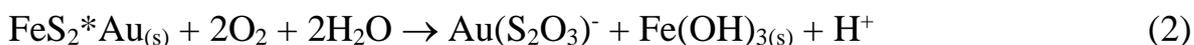
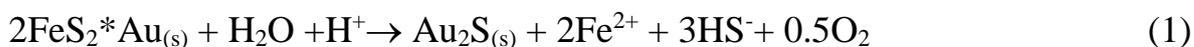
5.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Наиболее интенсивные геохимические превращения на отвалах происходят в результате сезонных колебаний температур, когда происходит криоконцентрирование поровых вод, которые активизируют химическое выщелачивание пород [Gustaytis et al., 2018; Yurkevich et al., 2019]. Преимущественно, это происходит в склоновых частях отвалов [Оленченко и др., 2016].

Выщелачивание Au из сульфидных минералов действует как непрерывный источник поступления Au в систему отложений ТМО, сульфиды способствуют образованию кислых дренажных вод (порowych растворов) [Blowes et al., 2014]. Наличие Au в сульфидных минералах Ново-Урского месторождения доказано в работах [Болгов, 1937; Черепнин, 1957; Дистанов, 1977; Муагкаяа et al., 2020], при содержаниях до 5.8 г/т [Рослякова и др., 1983].

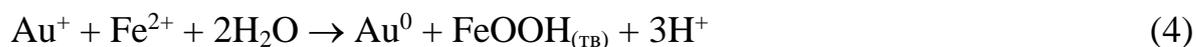
На кинетику окисления пирита влияют следующие факторы: O_2 , Fe^{3+} , температура, pH, Eh, а также наличие или отсутствие микроорганизмов [Смирнов, 1955; Свешников, 1958; Buckley, Woods, 1989; Brown, Jurinak, 1989; Blowes et al., 2014]. При этом, образуются охристые минералы: гетит, ферригидрит, лепидокроцит, ярозит, швертманнит и гидрогетит. Гидроксиды железа с их высокой сорбционной способностью обычно адсорбируют тяжелые металлы и другие элементы. Известно, что охристые осадки нестабильны и склонны к повторному растворению в кислых водах с pH 4.5–6.5 [McDonald et al., 2006; Herrera et al., 2007]. Незначительные изменения pH-Eh могут спровоцировать быструю эволюцию минералов, включая растворение, повторное осаждение и структурные изменения [Marescotti et al., 2012].

В *верхних горизонтах отвала* золото из пиритов будет высвобождаться, по следующим реакциям соответствующим восстановительным, промежуточным и окислительным условиям (1-3) (*горизонт 1*):



В образующихся кислых условиях растворяется как структурное, так и поверхностно-связанное золото, которое может восстанавливаться благодаря Fe^{2+} (4) [Плюснин, Погребняк, 1979]. Но главный процесс, который протекает в условно верхнем горизонте – это восстановление Au^+ до собственной минеральной формы на поверхности пирита (5) в виде наночастиц [Mycroft et al., 1995; Wilder, Sevard, 2002; Breitbach, 2006; Романченко, 2007; Haiyang et al., 2019]. Кроме этого, могут

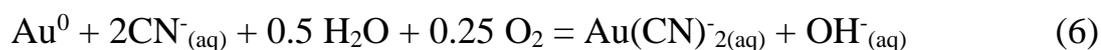
образовываться тонкие пленки на поверхности пиритов, в результате взаимодействия между осаждающимися Au^+ и поверхностными атомами S [Haiyang et al., 2019]:



где $>\text{FeS}_2$ – сульфид с «дефектами» поверхности; e^- – электрон.

Явление восстановления Au^+ до собственной минеральной формы более обязано *электрохимии процесса* (резкие вариации Eh, вольт). В современной международной литературе этот процесс назван *reductive precipitation* [Романченко, 2007; Таусон и др., 2014; Воробьев, Хоноре, 2016]. Механизм включает 2 реакции: катодную – восстановление Au и анодную – окисление сульфидов металлов. А на поверхности сульфидов протекают редокс-реакции пары Fe(III)/Fe(II) с большим током обмена.

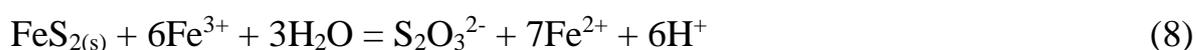
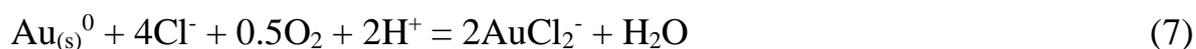
Помимо этого, хочется отметить роль цианидных растворов, которые использовались при извлечении золота на Ново-Урском месторождении. Доказано, что в захороненных условиях, растворы могут сохраняться десятки лет в виде комплексов с $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ [Vlassopoulos, Wood, 1990; Гаськова и др., 2000; Воробьев, Хоноре, 2016]. При этом, в естественной среде некоторые микробы, такие как *S. violaceum*, продуцируют CN^- как побочный продукт метаболизма [Knowles, 1976] и растворяют Au (6).



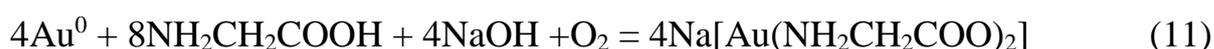
Помимо механического (физического) и химического разрушения, переработанные руды подвергаются биогенному растворению, которые усиливают окисление сульфидов [Blowes et al., 2014]. Согласно [Рихванов и др., 2017], в Ново-Урских отвалах не менее 26% сульфатной серы образуется благодаря деятельности биоты, а именно, микроорганизмов рода *Bacillus* и *Micrococcaceae sp.*, с глубиной их количество увеличивается. Как известно, бактерии рода *Bacillus* способны растворять золото [Korobushkina et al., 1983], а затем осаждают его коллоиды из растворов внутриклеточно и внеклеточно [Karthikeyan et al., 2002].

Благодаря перколяции кислых сульфатных растворов (от лат. percolatio – процеживание, фильтрация в отличие от поверхностного смыва), подзона верхней части разреза (*верхняя часть горизонта I*) представляет собой горизонт выщелачивания с повышенной влажностью. Обратим внимание, как высоки потери при прокаливании (ПП 25.29 %). Водные сульфаты и кристаллогидраты сульфатов, органика скапливаются над плотным бурожелезняковым горизонтом (*нижняя часть горизонта I*). Золото в поровых растворах находится в виде различных комплексов, в том числе тиосульфатных, гидросульфидных, гидроксо- и хлоридных.

В соленой до сверх-соленой средах, AuCl_4^- вероятнее всего будет доминирующим комплексом растворимого Au, поскольку избыток ионов Cl^- будет доступен в качестве координирующего лиганда (7) [Mann, 1984]. Однако в средах, где ионы Cl^- менее распространены, тиосульфатные ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) соединения считаются важным координирующим лигандом, который образует растворимый $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$. Тиосульфат и другие полиотионаты образуются вовремя (био)окислительного выветривания сульфидов металлов. Поэтому ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) разумно считается вероятным координирующим лигандом, особенно если элементные сплавы Au или Au/Ag тесно связаны с первичными сульфидными минералами [Mann, 1984; Kerr, Craw, 2017; Shuster, Reith, 2018] (реакции 7-9 [Shuster, Reith, 2018]).



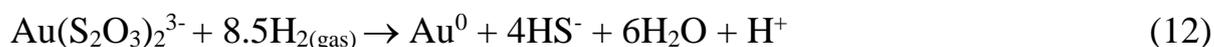
Важно отметить, что в поверхностных условиях может возникать ряд органических комплексов Au [Shuster, Reith, 2018]. Это связано с тем, что органические кислоты, такие как аминок-, гуминовые и фульвокислоты (ФА) (10), могут способствовать солибилизации Au. Однако, в присутствии бактерий, растворение золота с помощью аминокислот происходит по реакции (11) или с образованием цианидных комплексов (6) [Shuster et al., 2017].



Золото также растворимо в виде бисульфидных комплексов $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ [Webster, 1986; Heinrich, 2015], которые могут образовываться как часть процесса окисления пирита. Как и тиосульфатные лиганды, бисульфидные присутствуют только временно в пирит-окисляющей среде. Однако бисульфид-ионы более распространены непосредственно ниже уровня грунтовых вод, где преобладают слабо восстановительные условия [Heinrich, 2015].

Обнаруженные наросты и новообразования Au на поверхности самородных частиц (раздел 4.1.) образуются в процессе восстановления Au из его солей (комплексов). Процесс осаждения золота неоднократный, о чем свидетельствуют его мелкие наросты на более крупных золотилах.

Наконец, *средняя часть разреза*, это ни что иное, как плотный железокремнистый песчаник (*горизонт 2*), который в западной литературе называют «хардпан» (hardpan). Здесь найдено в 7.5 раз меньше знаков золота, но в том числе полностью высокопробная золотила (973 ‰). Эта зона отмечена ограниченным доступом кислорода. Поэтому барьер классифицируем как окислительно-восстановительный (12):



Известно, что сульфитные (SO_3^{2-}) и тиосульфатные лиганды $(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ играют значимую роль только в краткосрочной мобилизации золота в гипергенной среде [Craw, Lilly, 2016; Харламова, 2018, Liua et al., 2020]. Сульфитные комплексы золота (I) устойчивы в нейтральных и щелочных средах, а в кислых – склонны к самовосстановлению с выделением металлического золота [Харламова, 2018]. При этом могут образовываться смешанные хлоридно-сульфитные комплексы $\text{Au}(\text{SO}_3)\text{Cl}^{2-}$. Тиосульфатные комплексы будут разрушаться с образованием сульфат- или гидросульфид-ионов и самородного золота в зависимости опять же от Eh-pH условий среды (12, 13). Это будет приводить к укрупнению золотин или образованию агрегатов в зависимости от наличия затравок и диффузионного режима фильтрации раствора.



Именно при сопоставлении реакции (12, 13) и фрагментов электрохимического ряда активностей металлов (14), 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, $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_n^{(1-2n)}$, где $(1-2n)$ – валентность комплекса, являются метастабильными и могут переноситься на короткие расстояния в пределах профиля осадка, а дестабилизация происходит посредством:

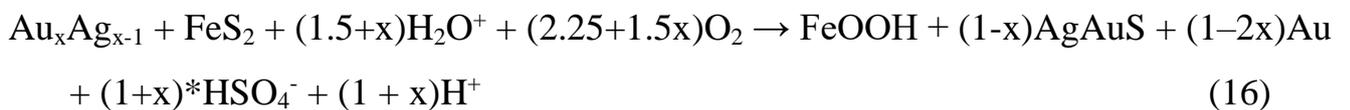
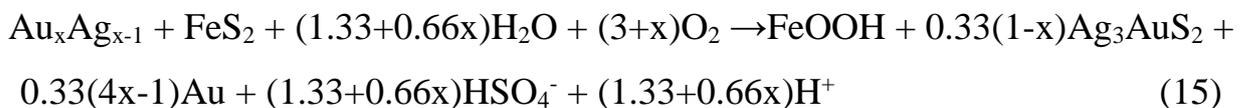
1) тиосульфат-окисляющих бактерий, которые используют тиосульфат в качестве источника энергии (восстановительная биоминерализация золота) [Lengke, Southam, 2005; Etschmann et al., 2016; Shuster et al., 2017];

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; Mycroft et al., 1995].

Эксперименты по моделированию условий потока рассеяния Урского хвостохранилища [Мягкая и др., 2019] показали, что степень извлечения золота глинами из сульфатного раствора в целом выше, чем из хлоридного. Это может свидетельствовать о большей термодинамической устойчивости хлоридных комплексов в кислой среде, чем сульфатных.

Присутствие Au-Ag-S-Se-Hg минерализации в виде пленок на поверхности золотин хвостохранилищ, близкие по стехиометрическим формулам к минералами: петровскита ($\text{AuAg}(\text{S},\text{Se})$), ютенбогаардита (Ag_3AuS_2), науманита (Ag_2Se), тиманнита (HgSe) и фишессерита (Ag_3AuSe_2). Их образование возможно по реакциям (15, 16) [Савва и др., 2010]:



Механизм образования подобных фаз можно визуальнo представить и описать следующим образом (рис. 32).

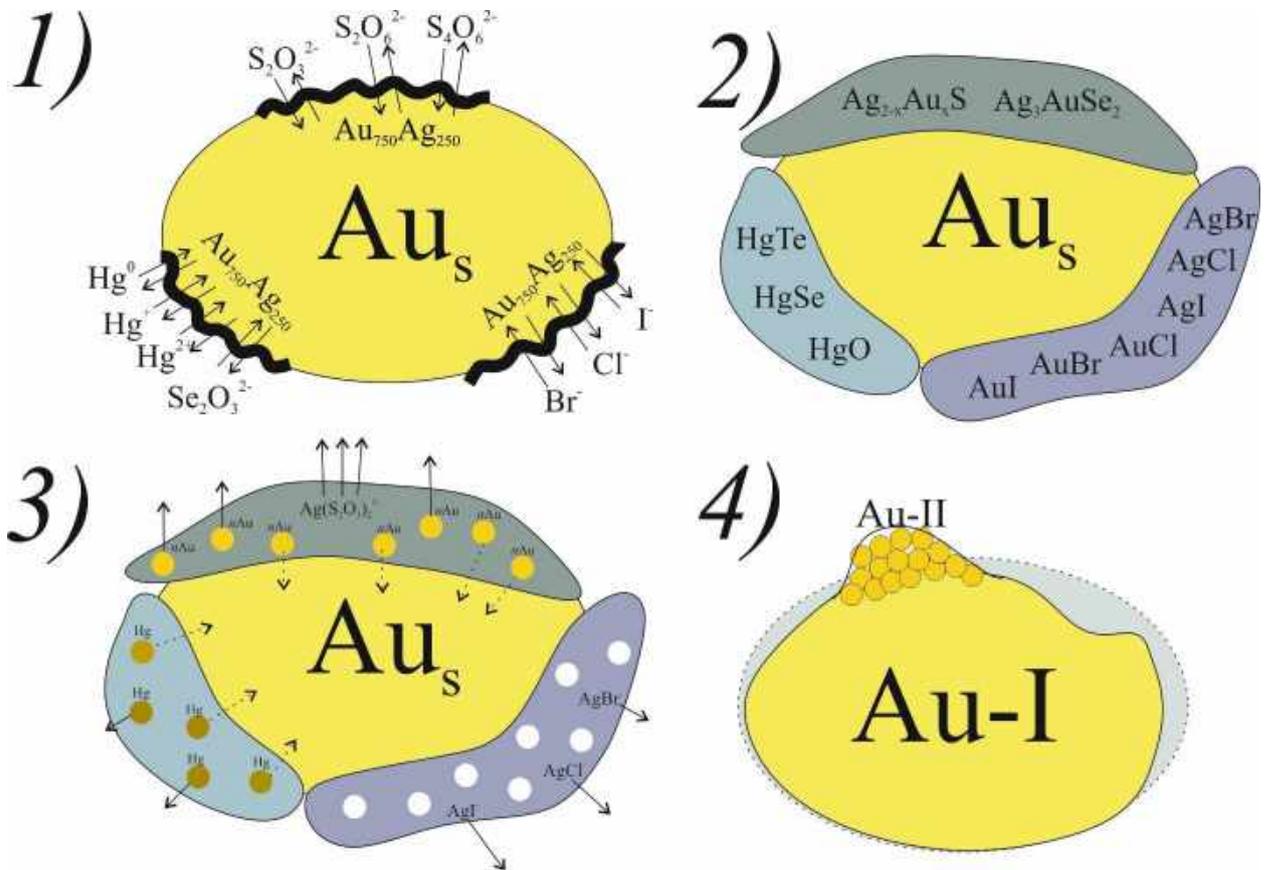


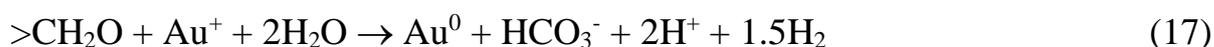
Рисунок 32. Механизм преобразования гипергенных новообразований и рост самородного Au: а) взаимодействие Au и поровых растворов – растворение (разъедание) верхнего поверхностного слоя, диффузионный обмен; б) образование вторичных минеральных парагенезисов (пленки, наросты); в) расположение микроэмульсионных 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).

Данный пассивирующий слой (Au-Ag-S-Se-Hg состава) на поверхности самородного золота может образовываться не только при взаимодействии с золота с поровыми растворами в природной среде [Пальянова и др., 2011; Таусон и др., 2018; Савва и др., 2010], но и в результате технологического извлечения золота [Senanayake, 2004; Birich et al., 2019; Wang et al., 2019].

Взаимодействие золота и вторичных парагенезисов протекает при контакте твердой фазы золота с поровым раствором. При этом происходит диффузионный обмен между фазами. Золото из растворов, реагируя с твердой фазой

(поверхностью золота), осаждается в виде самородных выделений разных форм и размеров и золото и серебросодержащих минералов.

В *почвенном слое* содержание золота достигает величин 0.42-0.35 г/т. Самородного видимого золота здесь не найдено. ППП составляют 11.6 вес. % (82 вес. % приходится на оксиды Si, Fe, Al). В одной из недавних работ [Hadri et al., 2018] показана огромная роль почв в необратимом удержании наночастиц металлов, которое происходит сразу в первые часы после поступления растворов. Этот процесс можно представить следующим образом (17):



где $>\text{CH}_2\text{O}$ – органическая молекула с кислотными функциональными группами, способная восстанавливать золото и окисляться до HCO_3^- , а Au^+ может быть изначально закомплексовано с одним из лигандов (тиосульфатом, хлором или гидроксонием OH^-).

5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЗОЛОТА В СИСТЕМЕ ТМО

Рассмотрим ступенчатую модель растворения пирита (табл. 6, рис. 33), как главного минерала, определяющего процесс химического выветривания сульфидсодержащих ТМО при взаимодействии с атмосферными осадками и формировании кислых дренажных вод. Золото в этих расчетах задавалось как $\text{Au}_{(\text{тв})}$, т.е. самородное, хотя подразумевалось, что оно входит в состав пирита (допущение модели).

Результаты моделирования растворения пирита при 25°C. Концентрации железа и серы указаны в моль/л, золото в мг/л (логарифмы).

pH	7,029	6,063	3,941	1,929	1,74
Eh, В	-0,22	-0,14	0,03	0,30	0,68
H ₂ S tot	-7,29	-7,67	-7,39	-	-
SO ₄ tot	-8,02	-6,06	-3,93	-1,76	-1,76
Fe ⁺⁺	-7,51	-6,35	-4,23	-2,14	-2,78
Fe ⁺⁺⁺	-	-	-	-9,62	-3,85
Fe(III)	-	-	-	-8,45	-2,68
Au _{tot}	-9,59	-9,71	-8,39	-	-5,49

где tot – общее содержание; Fe⁺⁺ – 2-х валентное железо; Fe⁺⁺⁺ – 3-х валентное железо; Fe(III) – с учетом сульфатных комплексов железа. Прочерки («-») в таблице означают концентрации менее принятых значащими 10⁻¹⁰ моль/кг. Полные данные расчетов представлены в таблице 6.1 (приложение).

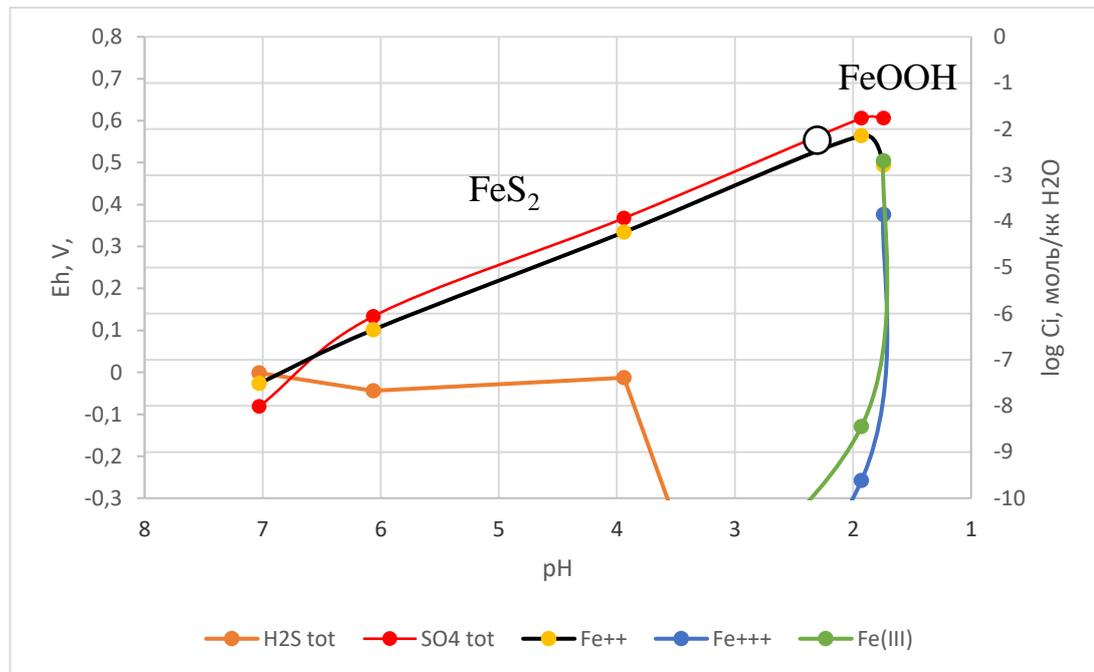


Рисунок 33. Ступенчатая модель растворения пирита при постепенном увеличении окислительного потенциала системы (Eh, В). Исходное количество пирита 0.01 моль/кг H₂O.

В начале взаимодействия при Eh -0.22 В, раствор сохраняет нейтральный pH 7. По мере вовлечения в реакцию все больших количеств пирита при повышении окислительно-восстановительного потенциала до -0.14, 0.03, 0.3 и 0.68 В соответственно, растворы становятся все более кислыми – pH понижается до 6.0, 3.9, 1.9 и 1.7. После достижения pH ~ 2, принципиальных изменений в составе

системы не происходит, только растёт количество гидроксидов железа. Как видно на рисунке 33, вместо пирита образуются гидроксиды железа (в нашей модели выбран гетит). Таким образом, пирит устойчив вплоть до pH 3.9 при Eh 0.3 В. Далее существует область, где FeS_2 растворился полностью (0.01 моль/кг), а FeOOH осаждается в силу того, что железо находится в растворе в виде Fe^{2+} (пустая точка на графике). Это область наибольшей миграции элементов в гипергенных условиях.

Важно, что вплоть до pH 1.9 и Eh 0.3 В в растворе преобладает двухвалентное железо (Fe^{2+}), поскольку кинетика окисления $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ в таких растворах замедлена. На рис 34а [Гаррелс, Крайст, 1968] хорошо видны поля преобладания разновалентных форм железа, что позволяет понять суть процесса гипергенного окисления, при котором поле устойчивости Fe^{2+} очень большое в кислых растворах.

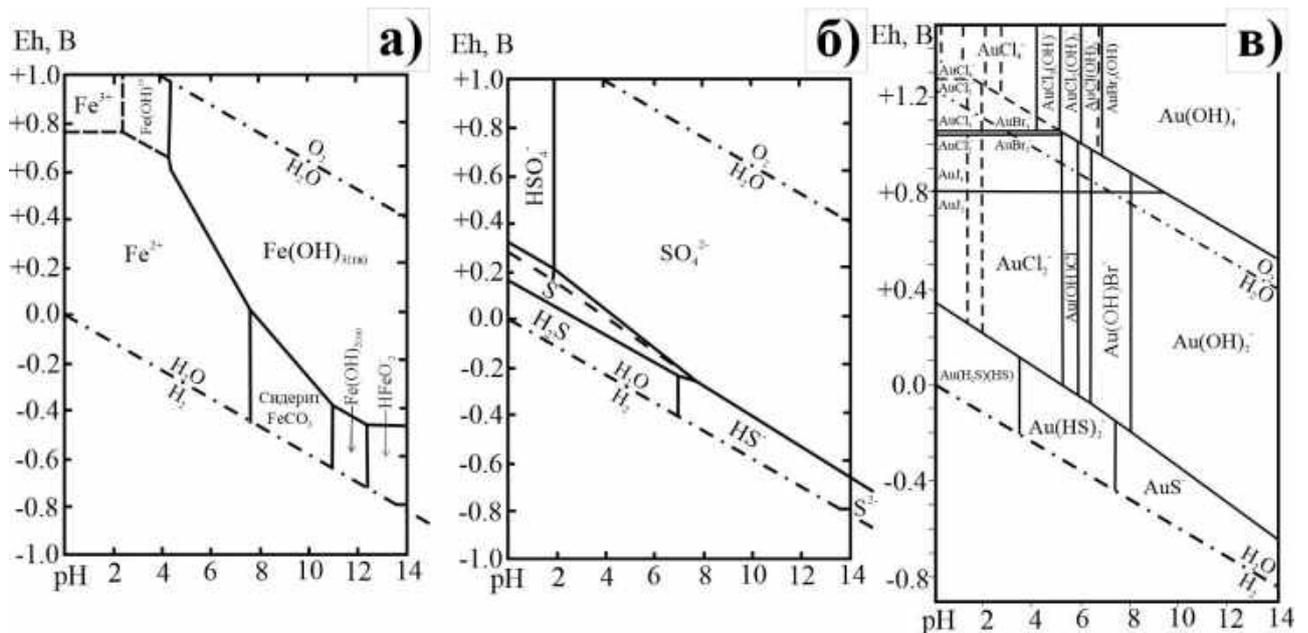
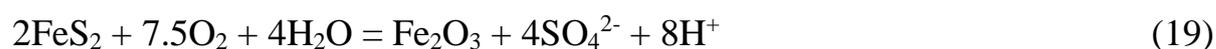


Рисунок. 34. Eh-pH диаграммы: а) поля равновесия серу-содержащих компонентов в воде при 25°C и 1 атм общего давления для суммарной активности растворенной серы, равной 10^{-1} [по Гаррелс, Крайст, 1968]; б) диаграмма, иллюстрирующая соотношения между неустойчивыми гидроокислами железа и сидеритом при 25° С и 1 атм общего давления [по Гаррелс, Крайст, 1968]; в) диаграмма полей преобладания различных комплексов золота при 25° С и 1 атм общего давления [по Росляков, 1981].

Сульфатная сера начинает резко преобладать при pH 4 и Eh >0 В, в то время, когда еще устойчив в ассоциации пирит. Концентрация сульфидной серы

оставалась близко постоянной при $Eh \leq 0$, потом ее количество ниже принятых в модели пределов обнаружения. Здесь следует ожидать смену форм нахождения металлов с гидросульфидных комплексов на сульфатные, хлоридные или гидроксокомплексы (зависит от устойчивости разных комплексов с разными ионами металлов). Например, для Fe(III) отчетливо видно, что в самых кислых растворах на порядок преобладают его сульфатные комплексы, которые проникают в нижние горизонты, способствуя выщелачиванию всех минералов, кроме самых устойчивых: кварца, гетита. При этом, возможно образование ярозита при обилии железа, и барита.

Согласно этим расчетам, ожидается протекание следующих реакций растворения и осаждения минералов железа (18, 19) и электрохимического восстановления золота на поверхности пирита (20):



Запись формы реакции (19) с гематитом наиболее широко применяется разными авторами (это самый устойчивый термодинамически оксид железа).

В рассмотренных Eh-pH условиях, когда концентрация сульфидной серы не превышала $2.5 \cdot 10^{-5}$ ммоль/л, а сульфатной серы – 17 ммоль/л, концентрация хлорид-, фторид- и других азот-содержащих лигандов традиционно низка для рассмотренного типа ТМО, золото в растворе находится на уровне 10^{-10} мг/л в виде $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ и $\text{Au}(\text{HS})^0$. Только в самых кислых окислительных растворах при pH 1.74 золото присутствует в виде AuOH^0 и AuOHCl^- в концентрациях $3.2 \cdot 10^{-5}$ мг/л (ppm).

Подчеркнем, что низкая концентрация золота в присутствии большого количества пирита моделирует также ситуацию восстановительного осаждения золота на поверхности пирита, подробно описанную в статье [Хусаинова и др., 2020]. Повышение концентрации золота маркирует область его миграции (растворения) с дальнейшим переотложением в подходящих зонах разреза (смотри ниже).



где FeS_2 – сульфид с «дефектами» поверхности, а e^- – электрон.

В термодинамических терминах реакция (20) может быть переписана следующим образом (21):



Таким образом продемонстрирована первая часть второго защищаемого положения

Тем не менее, столь разнообразные и широко распространенные в отвалах формы растворения/осаждения золота должны подразумевать формирование гораздо более высоких его концентраций в растворе (дренажных и поровых водах). Важнейшим наблюдением оказалось наличие самородной серы на склонах отвалов Ново-Урского хвостохранилища (рис. 35). Моделирование устойчивости ассоциаций с ее присутствием свидетельствует об изменении условий миграции золота.



Рисунок. 35. Самородная сера на склонах отвалов Ново-Урского хвостохранилища.

Оказалось, что в условиях, соответствующих устойчивости ассоциации $\text{FeS}_2\text{-S}_{(\text{эле})}\text{-Au}_{(\text{мет})}$ системе появляются тиосульфатные и сульфитные комплексы золота (табл. 7, рис. 36).

Результаты моделирования растворения ассоциации пирита с 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
Au tot	-5,81	-6,77	-6,10	-4,55	-2,96
H ₂ S	-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

где tot – общее содержание; Fe⁺⁺ – 2-х валентное железо; Прочерки («-») в таблице означают концентрации менее принятых значащими 10⁻¹⁰ моль/кг. Полные данные расчетов представлены в таблице 7.1 (приложение).

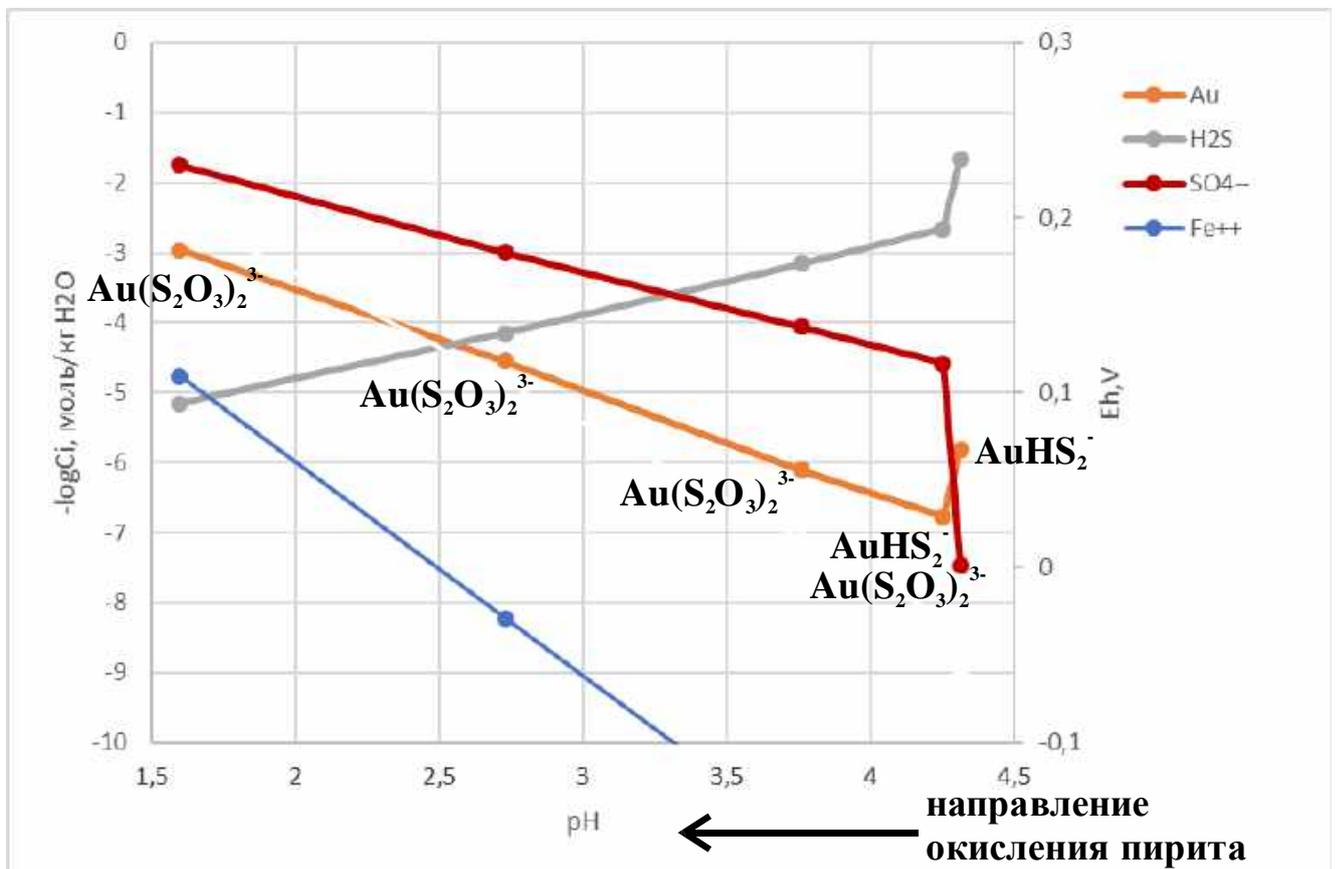


Рисунок 36. Ступенчатая модель растворения пирита при постепенном увеличении окислительного потенциала системы (Eh, В) и устойчивости серы элементарной. Исходное количество пирита 0.01 моль/кг H₂O.

Видно, что Eh-pH область устойчивости этой ассоциации гораздо более узкая, как и следовало ожидать из всех ранее полученных расчетов. Концентрация

сульфидной серы при этом на много порядков выше (до 0.02 моль/л), чем просто при растворении пирита.

Как известно [Гаррелс, Крайст, 1968; Liu et al., 2020], образование элементарной серы происходит в кислых/слабокислых растворах с окислительным потенциалом E_h , V около 0 (рис. 34б). Это является индикаторным признаком условий устойчивости системы ТМО-атмосферные осадки.

В отвалах золота находится в виде $AuHS^0$, $Au(HS)_2^-$, $Au_2(HS)_2S^{2-}$, вплоть до pH 3.7 и E_h 0.016 V (табл. 8). Концентрации данных комплексов незначительны и максимальные значения составляю 10^{-6} мг/л. Только в кислых окислительных условиях ($pH < 2.73$ и $E_h < 0.1$ В) растворы способны переносить золото в количестве более 10^{-3} мг/л преимущественно в тиосульфатных комплексах $Au(S_2O_3)_2^{3-}$.

Таблица 8.

Концентрация комплексов золота при 25°C в мг/л (логарифмы) в условиях устойчивости ассоциации пирит-элементарная сера.

pH	4,3	4,25	3,76	2,73	1,60
E_h, 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

Полные данные расчетов представлены в таблице 7.1 (приложение).

При этом надо сказать, что данные последних работ свидетельствуют, что вопрос с тиосульфатными комплексами пока не решен окончательно. В частности, из-за низкого окислительно-восстановительного потенциала пары SO_4^{2-}/SO_3^{2-} ($SO_4^{2-} + 2e^- = SO_3^{2-} + 2OH^-$, $E^0 = -0.90$ В [Добош, 1980]) комплекс $Au(SO_3)_2^{3-}$ должен практически необратимо восстанавливаться до Au^0 в любой среде. Однако водные нейтральные или щелочные растворы $Au(SO_3)_2^{3-}$ очень устойчивы. Объяснений этому на сегодняшний день нет [Харламова, 2018]. Б.Р. Тагиров в докторской

диссертации (2020) доказывает, что при снижении температуры образование гидросульфидных комплексов золота может сопровождаться образованием комплексов с (гидро)сульфит-ионами, тиосульфат-ионами, которые способны повысить растворимость золота. Но устойчивость этих комплексов нуждается в дальнейшем экспериментальном и теоретическом исследовании. При высоких температурах вне зависимости от окислительно-восстановительных условий (в окисленных и восстановленных флюидах) из комплексов с серой устойчивы только (гидро)сульфидные [Тагиров, 2020].

Рассмотрим результаты моделирования условий устойчивости изученных минеральных ассоциаций по горизонтам разреза (см. рис. 4б).

При отрицательных Eh -0.36 В и pH 8-9, когда устойчивы барит, пирит и другие сульфиды, содержание золота и серебра в растворе остается ниже геохимически значимого уровня (столбец 1-2). Сера в растворе находится в виде HS^- и SO_4^{2-} (0.68 мг/л), Ва и Si 3-4 мг/л. При небольшом доступе кислорода, Eh 0.2 В (pH 2.5 – 5.1 в зависимости от количества Са в твердой фазе) пирит исчезает, в твердой фазе присутствуют кварц, барит, халькозин, аргентит. Могут появляться до 1% кальцита. Железо в растворе находится в виде в виде Fe^{2+} и FeSO_4^0 до 2.6 г/л; столько же серы в форме SO_4^{2-} . Эти сульфатные растворы способствуют выщелачиванию Al, Са, Zn, их сотни мг/л раствора. Золота и серебра в растворах 10^{-6} – 10^{-8} мг/л, здесь возможно обогащение золотом за счет накопления в остаточной фазе, интенсивному его растворению препятствует Fe^{2+} (3). Далее растворы становятся сильнокислыми, Eh 1.1, pH 1.6.

Только в таких кислых, окислительных условиях появляются ярозит, гетит в ассоциации с кварцем и баритом. Золота в растворе может быть до 68 мг/л, а серебра до 100 мг/л (суперкислые растворы) соответственно в виде AuCl^0 , $\text{Au}(\text{OH})^0$, Ag^+ и AgSO_4^- . Естественно, что при подщелачивании растворов или затрудненном доступе кислорода, как описано выше, золото мгновенно переосаждается. При Eh 0.18, pH 7.8. его в растворе $6 \cdot 10^{-8}$ мг/л, серебра на два порядка больше. В минеральной ассоциации устойчивы оксиды, сульфаты, могут быть карбонаты (кальцит и смитсонит).

Таблица 9.

Результаты моделирования условий устойчивости минеральных ассоциаций и количеств золота и серебра, вовлеченных в миграцию и перераспределение

Разрез	Верх. часть горизонта 1		Нижн. часть горизонта 1		Горизонт 2		Сланцы		Почва	
	рН		2.4		1.6		7.78		8.2	
Eh, мВ	-0.36		0.2		1.1		0.18		-0.22	
Silver	9.27E-04	0.21%	0	0	0	0	9.27E-04	0.17%	9.27E-04	1.60%
Gold	5.08E-05	0.02%	5.08E-07	0.00%	1.15E-07	0.00%	5.08E-04	0.17%	5.08E-04	1.60%
Quartz	1.66E-01	21.22%	1.78E-01	25.93%	1.82E-01	24.92%	1.66E-01	16.56%	4.84E-02	46.62%
Cuprite							2.72E-03	0.65%	0	0
Пирит	4.17E-02	10.62%								
Sphalerite	1.03E-02	2.12%								
Chalcocite	0	0	2.72E-03	1.05%						
Chalcopyrite	5.45E-03	2.12%	0	0						
Аргентит			4.64E-04	0.28%						
Goethite					2.79E-02	5.65%	4.71E-02	6.94%	1.67E-03	2.37%
Calcite							8.21E-03	1.36%		
Smithsonite							9.12E-03	1.90%		
Gypsum Гипс							7.91E-02	22.57%		
Baryte	1.29E-01	63.69%	1.29E-01	72.74%	1.29E-01	68.27%	1.29E-01	49.70%		
Kaolinite									3.81E-03	15.77%
Chlorite									3.59E-03	32.04%
Ярозит К					1.01E-03	1.15%				
Раствор, мг/л										
Ag	5.51E-08		2.27E-06		1.00E+02		4.65E-06		3.61E-12	
Al	0		3.39E+02		2.48E+02		0		2.10E-04	
Au	4.07E-11		2.40E-08		6.77E+01		5.49E-08		7.13E-14	
Ba	2.92E+00		3.90E-03		4.74E-03		4.80E-03		0	
Ca	0		1.44E+02		0		6.67E+02		0	
Cu	5.58E-11		1.33E-04		3.46E+02		2.78E-02		0	
Fe	1.39E-03		2.63E+03		9.03E+02		3.52E-05		6.17E-03	
S	6.84E-01		3.25E+03		3.29E+03		8.13E+02		1.07E+02	
Si	3.87E+00		2.82E+00		2.82E+00		2.85E+00		2.91E+00	
Zn	2.80E-06		6.71E+02		6.71E+02		7.44E+01		0	

На заключительном этапе мы рассчитали условия устойчивости кварц-альбит-хлоритовых сланцев. Появляются гидроксиды железа, глинистый минерал (каолинит), подвижность золота и серебра ограничена, и это слой будет удерживать металлы из просачивающихся растворов до сохранения близких к природным значениям Eh-pH условий.

Обратим внимание на изменение концентраций серы в растворах, обусловленные рядом равновесий (табл. 4, третья строка снизу): минимальные значения естественны в равновесии с пиритом при $E_h -0.36$, далее ее содержание резко возрастает до 3.25 мг/л, но из сульфатов присутствует только плохо растворимый барит (его столько, сколько было бария было в растворе), остальная сера в виде SO_4^{2-} «избыточна». Она будет накапливаться в растворе вплоть до появления ярозита (рН 1.6), однако при сдвиге рН в нейтральную область (рН 7.8) концентрацию сульфатов регулирует уже гипс (и кальций).

В дальнейшем предполагается расширить модель с учетом термодинамики образования твердых растворов золота с другими металлами, в том числе по данным сотрудников нашей лаборатории (Пальянова Г.А с соавторами). Также предполагается более детально (в поле E_h -рН) отследить смену форм нахождения золота в растворе в равновесии с этими минералами.

5.3. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗОЛОТА

Геохимические барьеры могут влиять на образование разных по химическому составу генераций золота [Kirillov et al, 2018, Хусаинова и др, 2020]. Образование Ag-содержащего (14-20 мас. % Ag) самородного Au является результатом распада смешанных тиосульфатных комплексов типа $(Au,Ag)(S_2O_3)_n^{(1-2n)}$. Доказательствами являются пленки $Ag_{2-x}Au_xS$ состава на поверхности золотин с микрокристаллитами золота (рис. 17а). 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. 15а).

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 или выноситься из данной системы, концентрируясь в последующем на различных геохимических барьерах.

Вышеизложенное служит 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 $\text{S}_{(\text{эл})}$, 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.**

ГЛАВА 6. СРАВНЕНИЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩ НАСЫПНОГО И НАМЫВНОГО ТИПА

Для сравнения и оценки степени преобразования самородного золота в техногенно-минеральных образованиях (ТМО), не только объектов золото-сульфидного типа, но и других формационных типов, были дополнительно изучены объекты, которые представлены в табл. 10.

Таблица 10.

*Объекты исследования в зависимости от способа складирования
переработанных руд*

Объект	Способ обогащения	Формация
<i>Намывной тип</i>		
Месторождение Тардан	Гравитационный	Золото-скарновая
Чернореченская россыпь	Гравитационный + амальгамация	Золото-кварцевая
Россыпи рр. Ис и Тура	Гравитационный+ амальгамация	Золото-кварцевая
Месторождений Акжал, Яковлевское и Президент	Гравитационный + амальгамация	Золото-кварцевая
<i>Насыпной тип</i>		
Месторождения Ново-Урское и Белоключевское	Цианирование	Золото-сульфидная
Змеиногорское месторождение	Гравитация с флотацией и цианированием	Золото-сульфидная
Месторождение Даубай	Породный отвал	Золото-кварцевая

Для всех перечисленных выше объектов (рис. 37) определялись такие параметры золотоносности, как: содержание, гранулометрия, морфология, химический состав золота, внутреннее строение и степень преобразования частиц. Оценка данных параметров давалась относительно преобразования и изменения золота в системе «первичный источник – ТМО».



Рисунок 37. Карта-схема расположения объектов исследования: 1-2) хвостохранилище Ново-Урского и Белоключевского месторождений (Салаир); 3) хвостохранилище золото-извлекательной фабрики (ЗИФ) Змеиногорского месторождения (Рудный Алтай); 4) хвосты гравитационного обогащения руд Тарданского месторождения (Тува); 5) ТМО Чернореченской россыпи (Урал); 6) ТМО рр. Ис и Тура (Урал); 7) ТМО месторождения Акжал (Казахстан); 8-9) ТМО рудопроявлений Яковлевское, Президент, Даубай (Казахстан).

6.1. ХВОСТЫ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ КОРЕННЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТАРДАН

Золоторудное месторождение Тардан расположено на юге АССО в зоне контакта Копто-Байсютского тоналит-плагиогранитного массива таннуольского комплекса с вулканогенно-осадочными образованиями позднего рифея-кембрия (рис. 38). Рудное поле контролируется структурами Каахемского глубинного разлома. В стратиграфическом отношении район месторождения характеризуется отложениями позднерифейского, венд-кембрийского, позднекембрийского, силурийского, раннедевонского и плейстоценового возраста [Коробейников и др., 1976; Гаськов, 2008; Кужугет и др., 2020].

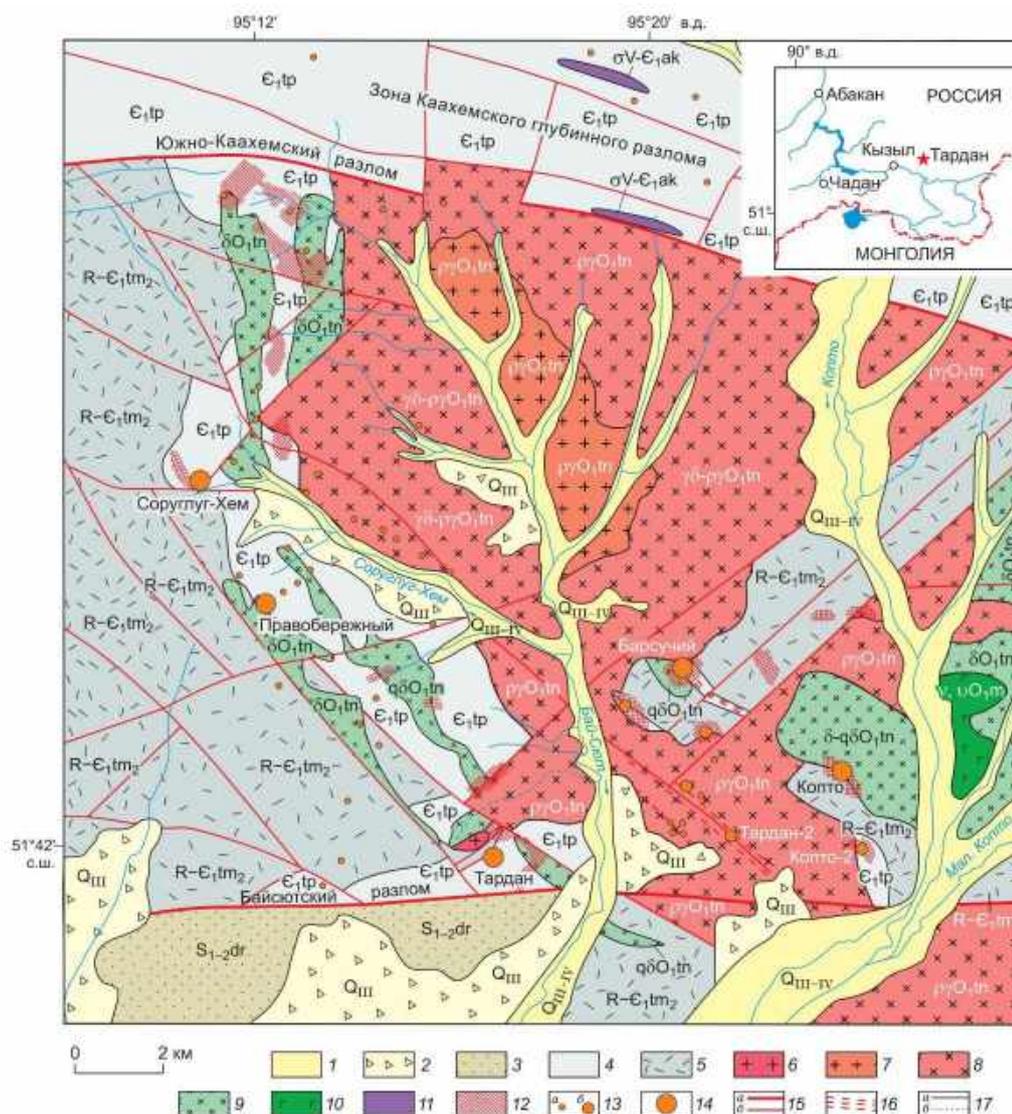


Рисунок 38. Схема геологического строения Тарданского золоторудного узла [по Кужугет и др., 2020]. Условные обозначения: 1 – аллювиальные отложения пойм (QIII-IV); 2 – делювиально-пролювиальные отложения (QIII); 3 – красноцветные песчаники, гравелиты, конгломераты с прослоями известняков дерзигской свиты (S1-2dr); 4 – песчаники, туфопесчаники, туфогравелиты, алевролиты, конгломераты, кристаллические сланцы, амфибол-хлоритовые сланцы и известняки тапсинской свиты (E1tp); 5 – базальтовые, андезитовые порфиры с прослоями известняков верхней подсвиты туматтайгинской свиты (R – E1tm2); 6–9 – раннетаннуольский диорит-тоналит-плагиигранитный комплекс (O1tm): 6 – гранит-порфиры и кварцевые порфиры (γπ); 7 – плагииграниты (ργ); 8 – нерасчлененные плагииграниты (ργ) и тоналиты (γδ); 9 – диориты (δ), кварцевые диориты (qδ); 10 – габброиды мажалькского перидотит-пироксенит-габброноритового комплекса (v, vE1?m); 11 – серпентиниты, перидотиты, пироксениты и связанные с ними габброиды и диориты офиолитового акдовракского комплекса (σV–E1ak); 12 – скарны; 13 – точки минерализации (а) и рудопроявления золота (б); 14 – месторождения золота; 15 – региональные (а) и локальные (б) разломы; 16 – зоны дробления; 17 – границы геологические: установленные (а), предполагаемые (б).

Основную добычу коренного золота осуществляли из скарновой руды, в которой золото образовалось в микротрещинках и в межзерновых пустотах. На месторождении выделено 3 генерации золота: 1) золото из скарново-магнетитовых руд; 2) золото из минерализованных зон; 3) золото из фланговых участков

минерализованных зон [Гаськов, 2008]. Золото из скарново-магнетитовых руд (1) представлено мелкими и тонкими (0.3-0.01 мм) самородными выделениями, находится в свободном виде и в сростании с андрадитом, магнетитом, актинолитом, хлоритом, гематитом, кальцитом, кварцем, халькопиритом, борнитом, галенитом, висмутином, теллуру-висмутитом, проявляя признаки своего более позднего отложения. Частицы золота размером более 50 мкм в руде не обнаружены, основная их масса (~75%) приходится на класс крупности менее 50 мкм. Формы золотин чаще тонколистоватые, тонкопластинчатые, бахромчатые, комковидно-губчатые, дендрито-листоватые, зерновидные и реже сростки кристаллов [Шаповалов и др., 2008]. Это преимущественно высокопробное золото (820-990 ‰) с содержанием примеси серебра (до 13.6%) и меди (до 5.07%) [Гаськов, 2008]. Для золота из минерализованных зон (2) пробность изменяется в широком диапазоне – от 440 до 820 ‰. Наиболее низкопробные выделения золота близки по составу к электруму и характеризуются, наряду с высокими содержаниями серебра (до 54.78%), повышенной примесью ртути (до 3.65%). Золото из фланговых участков минерализованных зон (3) отличается низкой пробностью, не превышающей 600 ‰. Главными примесями в нем является серебро, содержание которого изменяется от 20 до 66%, и ртуть с содержанием до 5.47% [Гаськов, 2008]. Содержание золота в скарновой руде составляет 6 г/т [Шаповалов и др., 2008]. Поверхность основной массы золотин абсолютно чистая, однако, отмечаются зерна в сростках с гидроксидами железа и силикатами.

В результате первой ступени обогащения первичных руд образовались «хвосты» гравитационного обогащения продуктов дробления рудного золота. В плане «хвосты» выглядят как своеобразный конус выноса с несколькими зонами распределения вещества (рис. 39): ближняя (I), средняя часть (II) и периферия (III).

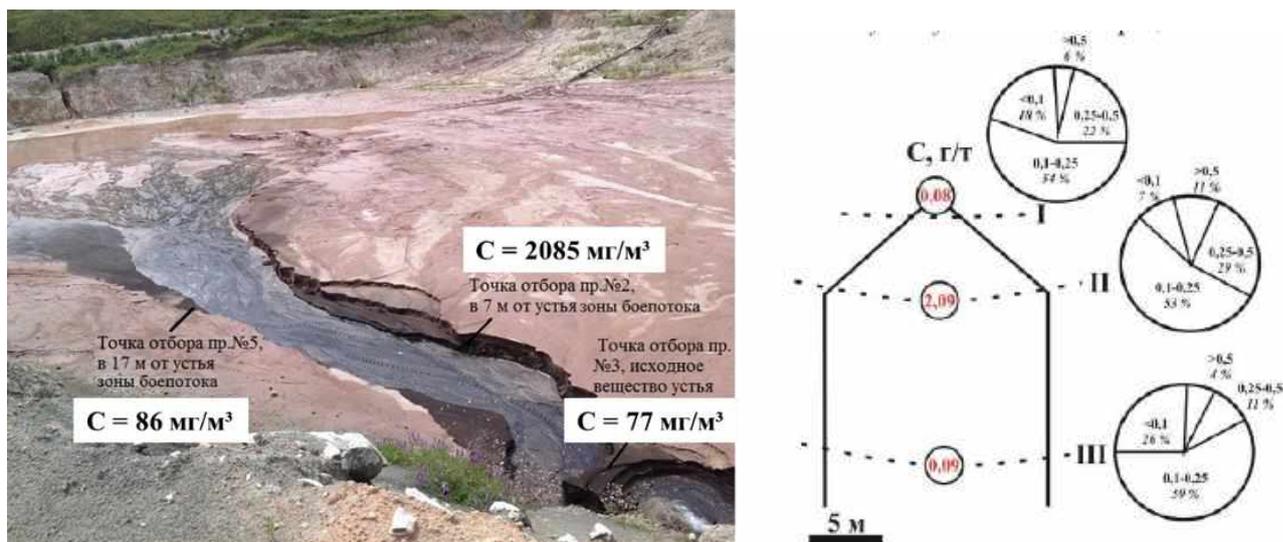


Рисунок 39. Намывной отвал гравитационных руд золоторудного месторождения Тардан [по Хусаинова и др., 2019]: а) точки отбора проб и общий вид намывного отвала; б) схема зон распределения вещества с выделением гранулометрического распределения классов золота.

В ближней зоне (I) содержание золота – 77 мг/м^3 . Основная масса благородного металла характеризуется как мелкое ($0.25-0.1 \text{ мм}$), также присутствует тонкое (менее 0.1 мм). Цвет золотин различен. Встречаются зерна от яркого золотисто-желтого до бледно-желтого цвета. Преобладающая масса частиц золота в пробе имеет неправильную форму, в меньшей степени наблюдаются идиоморфные выделения золота. Поверхность встречается как относительно ровная, сглаженная, так и волнообразная, контуры краев округлые, неровные, зазубренные, иногда встречаются золотины с загнутыми краями.

Зона II формируется вблизи головной части хвостохранилища и является ее продолжением. Здесь намывной поток разделяется на несколько струй. Отмечено высокое содержание золота – 2085 мг/м^3 . Основная масса золота характеризуется как мелкое $0.25-0.1 \text{ мм}$ (53%). Присутствуют частицы уплощенного облика, с довольно гладкой и ровной поверхностью, реже встречаются трещинки и небольшие ямки, края окатанные. Но в большей степени преобладают частицы, представляющие собой слипшиеся, смятые агрегаты комковидной, причудливой формы.

В зоне III содержание золота – 86 мг/м^3 . Основная масса благородного металла характеризуется как мелкое – $0.25-0.1 \text{ мм}$ ($58,6 \%$) и тонкое – значительно

увеличивается число знаков менее 0.1 мм (25,7%), в отличие от предыдущих проб. Наибольшую распространенность имеют частицы уплощенного пластинчатого и таблитчатого облика. Частицы уплощенного облика в большей степени свернуты и изогнуты, наряду с этим встречаются зерна с гладкой и ровной поверхностью, ровными краями. У золота изометричного облика отмечаются преимущественно округлая форма, слабая уплощенность, неровная поверхность. Наибольшее морфологическое разнообразие представляют золотины «агрегатного» строения. Их размер колеблется от 0.125 до 0.5 мм. Они имеют причудливую, неправильную форму, часто изогнуты, края подогнуты, поверхность золотинок неровная, кавернозная, с ямками, пустотами, иногда присутствуют включения других минералов. Края зазубренные, бахромчатые, иногда окатанные. Помимо свободного золота, наблюдаются сростки золота с другими минералами.

Таким образом, в результате механической дифференциации вещества при транспортировке частиц золота вдоль отвала происходит перераспределение его концентраций и изменение содержания размерных фракций. В целом для гравитационных отвалов характерно некоторое увеличение доли относительно крупного класса (0.1-0.5 мм) по сравнению с рудной зоной. Повышенная концентрация металла определена не ближней зоне, а в 7 м от зоны поступления осадков в отвал. На этом участке создавались благоприятные условия соответствия динамики водного потока и гидравлической крупности частиц металла. Дополнительным фактором распределения концентраций золота по телу отвала является высокое (1-10%) содержание магнетита. При намагничивании они образуют агрегаты с большей, чем у частиц золота, гидравлической крупностью и могут вытеснять частицы золота. Низкая концентрация, выявленная в головной части отвала, не является типичной для намывных отвалов. Известно, что основная закономерность распределения свободного гравитационного золота в намывных массивах – это приуроченность наиболее высоких концентраций золота к устью сбросных пульповодов [Макаров, 2001; Наумов, 1994, 2010].

По данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), на поверхности золотинок присутствуют наросты Au в виде мелких нано- и микрокристаллитов

чешуйчатых, вытянутых и кристаллических форм, как в пленках (корочках), так и на поверхности собственно самородных частиц (рис. 40). К скульптурам растворения можно отнести изъеденную поверхность, которая покрыта наростами новообразованного золота. Также наблюдаются царапины на поверхности золотин, которые могли образоваться при дроблении руды или при совместной миграции золота с минеральным веществом переработанных руд. Присутствие микрокристаллитов золота в пленках и на поверхностях золотин может играть существенную роль в последующих преобразованиях и укрупнениях видимых самородных частиц.

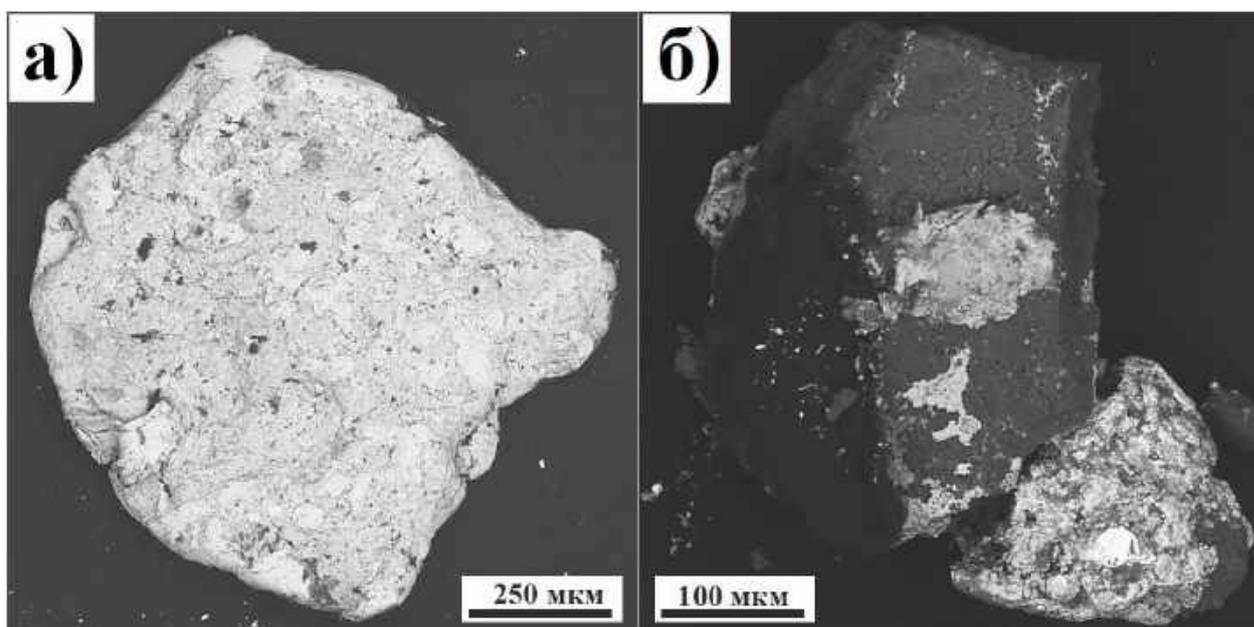


Рисунок 40. Морфология индивидов золота из ТМО Тарданского месторождения: а) частица изометричной формы уплощенного облика; б) агрегат вытянутой формы, покрытый пленкой гидроксидов Fe с нанокристаллитами золота. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

По распределению химического состава золото имеет достаточно широкий диапазон пробности (328 – 980 ‰) (табл. 11). Полученная картина многообразия элементов-примесей – Cu, Ag, Fe, Hg, Co, Bi, Pd и пробности частиц золота свидетельствует о том, что в отвал поступало золото разных генераций. Вместе с тем можно выявить тенденцию к уменьшению содержания золота в частицах по мере удаления от участка его поступления в отвал [Хусаинова и др., 2019].

Элементы-примеси в золоте из «хвостов» гравитационного обогащения руд месторождения Тардан [по Хусаинова и др., 2019]

Источник золота (N анализов)	Химические элементы, %										
	Au	Ag	Cu	Fe	Hg	Co	Bi	Pd	Zn	Al	As
в устьевой части (10)	81.11	9.39	6.75	2.07	0.19	0.03	0	0	0.37	0.05	0.01
в 7 м. от устья (5)	79.84	12.43	1.50	3.65	0	0	2.31	0.25	0	0	0
в 17 м. от устья (4)	70.97	9.84	14.20	3.84	0.55	0	0.48	0.13	0	0	0

Во внутреннем строении встречаются золотины с однородным, так и с зональным строением – высокопробными каймами и прожилками (рис. 41). Последние могли образоваться или увеличиться в размерах в результате длительного нахождения в водной среде. Также золото отмечено в сростках с висмутидом, борнитом, кальцитом.

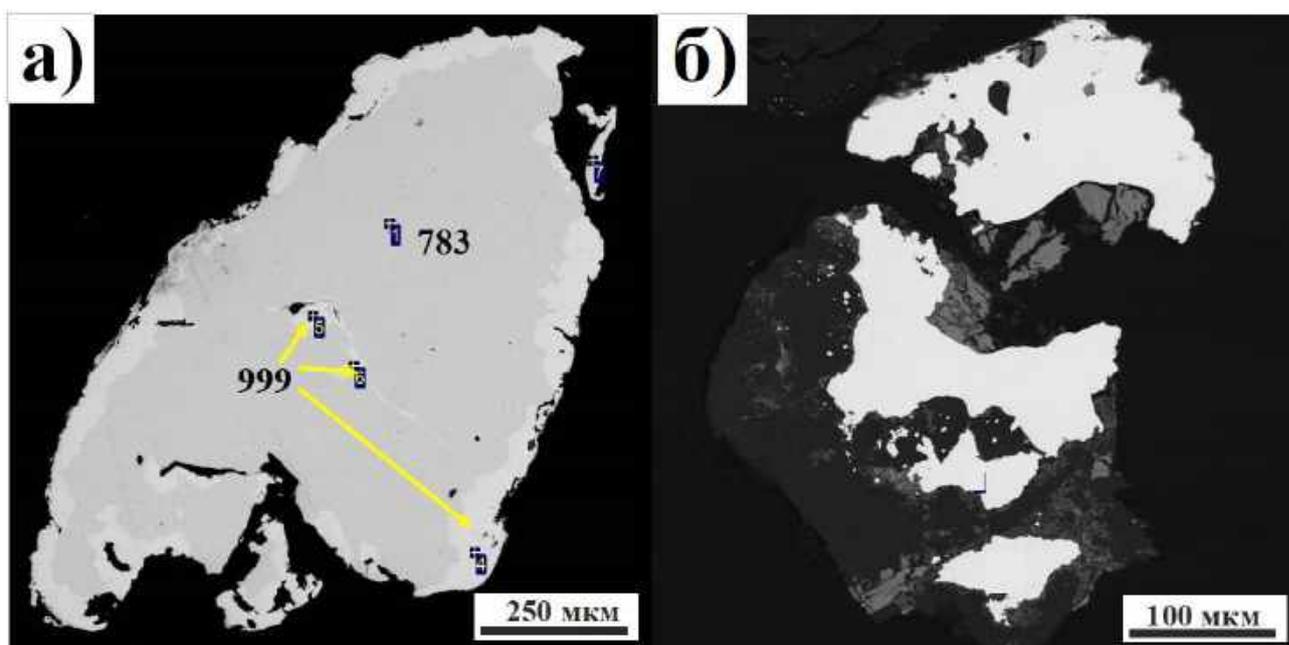


Рисунок 41. Микроструктуры золота из ТМО Тарданского месторождения: а) прожилки и каймы высокопробного золота; б) однородное внутреннее строение частицы с нано-частица золота во вмещающем вещества (гидроксиды Fe).

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Золото из «хвостов» гравитационного обогащения коренных руд Тарданского месторождения является остаточным и попало в намывные отложения отвала в результате гравитационных потерь обогащения. Золото имеет схожие типоморфные характеристики с

природными (коренными) рудами, что также доказывает источник его происхождения. В «хвостах» Тарданского месторождения ярко проявляются процессы механической дифференциации и интеграции вещества. Происходит закономерное распределение золота как в россыпных объектах: в устьевой зоне накапливается крупное и среднее золото, а по периферии выносятся тонкие и мелкие классы. Трансформациям золото подвергается за счет поверхностных преобразований под действием водной среды и механических перемещений. Преимущественно, это наросты нано- и микрокристаллитов Au на поверхности золотин, а также образованные высокопробные каймы и прожилки.

Хочется отметить, что после непродолжительного существования гравитационной фабрики и смены методики обогащения и извлечения золота, «хвосты» гравитационного обогащения Тарданского месторождений были повторно отработаны, с помощью цианидных растворов.

6.2. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ ЧЕРНОРЕЧЕНСКОЙ РОССЫПИ

Чернореченская россыпь расположена на Северном Урале (рис. 42), входит в состав Чернореченского рудного узла, находящегося в пределах Краснотурьинской золоторудной зоны. Россыпь сформирована за счет эрозионного разрушения рудоносных пород Чернореченского рудного узла и приурочена к протяженной Ивдельско-Тагильской мезозойской эрозионно-структурной депрессии. В разрезе россыпи присутствуют горизонты, отвечающие высокопродуктивным аллювиальным, аллювиально-пролювиальным отложениям лангурской (J_{2-3}), в меньшей степени мысовской (K_2) и наурзумской (N_1) свит, а также четвертичным отложениям в долинах рек Черная и Калья [Савельева, Баранников, 2006].

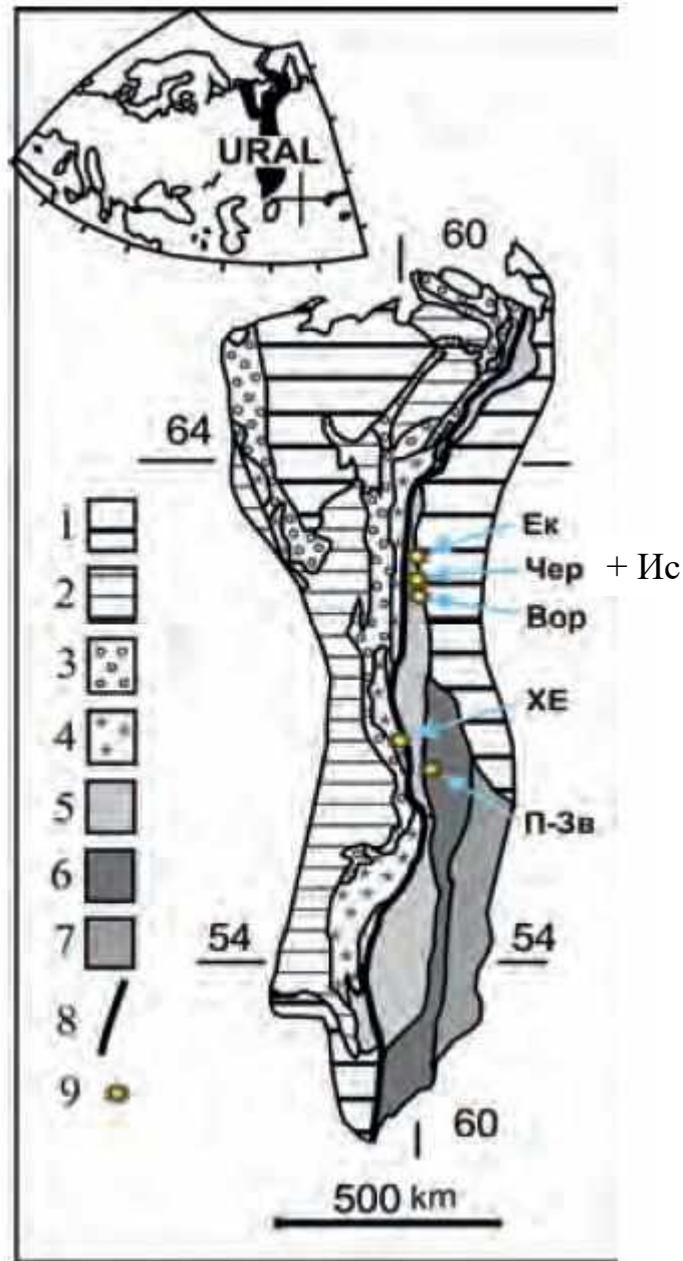


Рисунок 42. Схематическая карта расположения объектов в структурах Урала [по Баранников, Азовскова, 2017]: 1 – мезозойско-кайнозойские отложения; 2 – Предуральский прогиб. Мегазоны (3 – Западно-Уральская, 4 – Центрально-Уральская, 5 – Тагильская и Магнитогорская, 6 – Восточно-Уральская, 7 – Зауральская); 8 – Главный Уральский глубинный разлом; 9 – объекты исследований: Ек – Екатеринбургский рудно-россыпный узел, **Чер – Чернореченский участок**, Вор – Воронцовское месторождение, ХЕ – Хионинско-Елизаветинское рудное поле, П-Зв – Первомайско-Зверевское рудное поле (Верхотурское и Зверевское месторождения). Структурная основа по Г. А. Петрову, 2011.

Основные исследования были проведены сотрудниками лаборатории осадочных полезных ископаемых (ЛОПИ) Пермского государственного университета. Автором было изучено непосредственно самородное золото.

Основная масса металла, установленного в намывных отвалах ТМО (рис. 43), сосредоточена во фракциях 0,5-0,08 мм при содержании 60-255 мг/м³ [Лунев, Наумов, 1993].

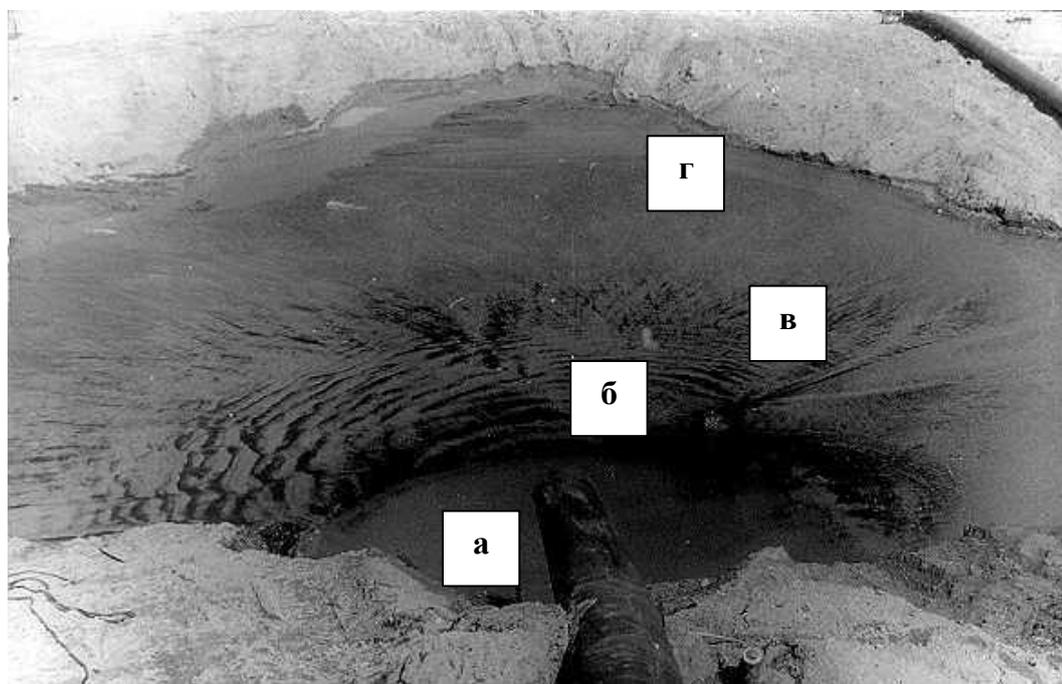


Рисунок 43. Зональный характер распределения минералов тяжелой и легкой фракции в намывной фации отвалов Чернореченской россыпи [по Наумов, 2010]: а) устьевая зона; б, в) средняя зона; г) периферия.

В изученных пробах преобладают частицы золота в сростках с кварцем и магнетитом, преимущественно пластинчатой формы и с пористой структурой (рис. 44). Золото имеет ярко-желтый, золотисто-желтый цвет. Поверхность – неровная, шероховатая, с ямками и дырками. Некоторые золотины покрыты пленками гидроксидов Fe и Mn, имеют следы влияния ртути (амальгамация), срастания с сульфидами. Края частиц загнутые, рваные, реже относительно ровные, зубчатые [Хусаинова, 2016].

На поверхности золотин присутствуют наросты новообразованного (пересажженного) золота сферолитовых, реже чешуйчатых форм (рис. 44), которые образуют агрегаты более сложных форм.

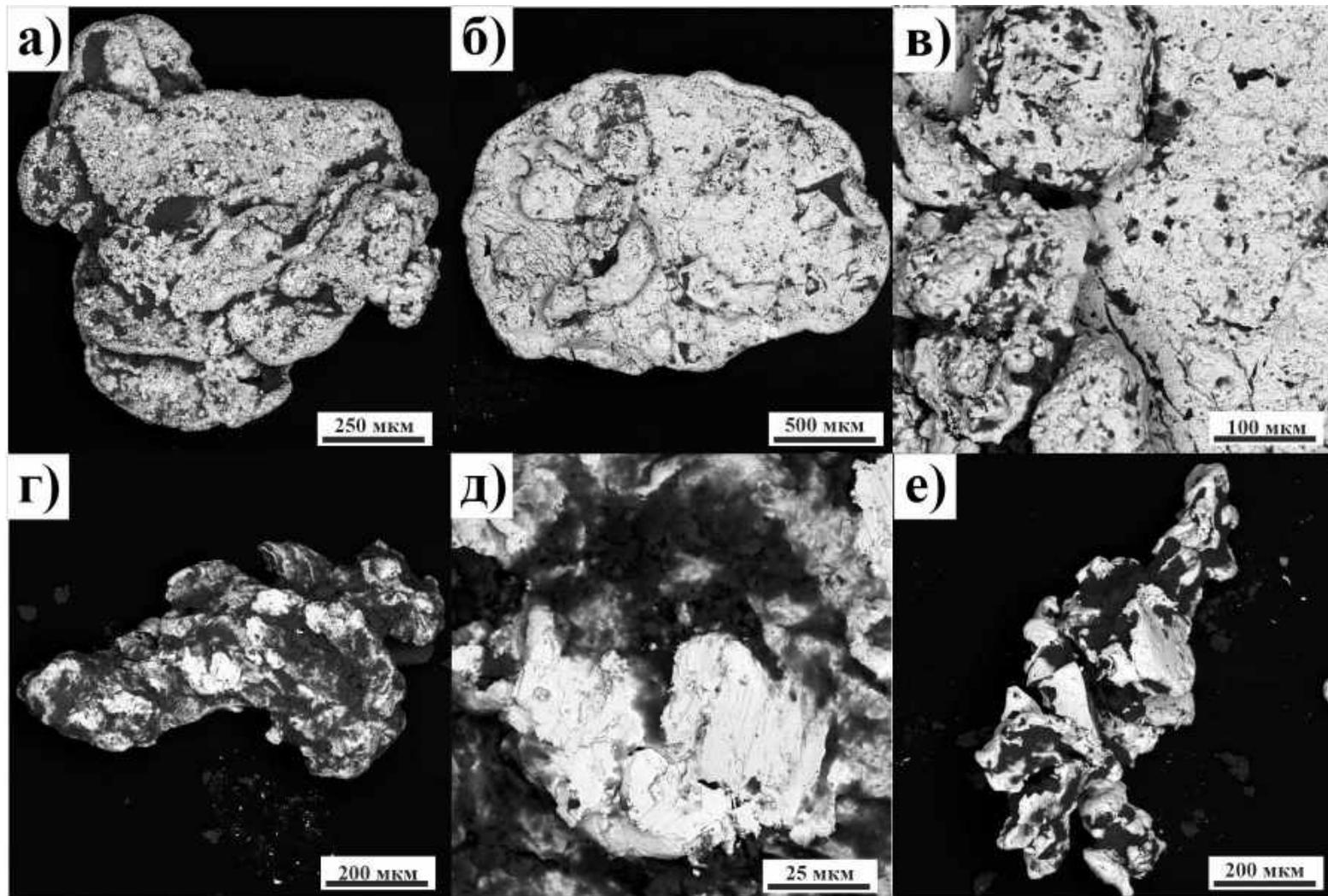


Рисунок 44. Морфология индивидов и микрорельефа поверхностей золотинок из ТМО Чернореченской россыпи: а-б) частицы изометричной формы уплощенного облика с наростами Au на поверхности золотинок; в) ув. фрагмент изображения «б» с наростами в виде сферолитовых форм нано- и микронных размеров; г) вытянутая частица, покрытая пленками гидроксидов Fe и Mn; д) ув. фрагмент изображения «г» с наночастицами золота; е) частица вытянутой формы с угловатыми очертаниями, покрытая пленками гидроксидов Fe и Mn. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

Для частиц золота характерно повышенное содержание элементов: Cu, Ag, Au, Hg, Pb. Пробность золота варьирует от 600 до 900 ‰, Ag до 9.6 мас. %, Hg до 11 мас. %. Пленки и налеты на поверхности золотин представлены элементами Al, Si, K, Fe (табл. 12). Отмечено уменьшение пробности частиц [Хусаинова, 2016].

Таблица 12.

Химический состав золота из отвалов Чернореченской россыпи Краснотурьинского района, мас. % [по Хусаинова, 2016]

Химические элементы	1-2	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3
Al	0.23	0.90	1.84	3.17	1.61	2.19	1.62
Si	-	1.43	2.27	11.48	-	13.62	1.88
K	-	-	-	0.68	-	-	-
Fe	0.00	14.35	22.85	4.72	0.00	2.61	1.20
Co	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00
Ni	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00
Cu	0.00	2.10	2.41	0.45	0.65	4.87	1.52
As	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
Se	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ag	7.48	0.93	2.14	2.29	9.62	3.00	3.57
Cd	-	0.00	0.00	-	0.72	-	-
Au	86.99	69.11	60.01	71.41	84.26	73.37	90.20
Hg	3.56	11.18	8.30	4.51	3.14	0.00	0.00
Pb	-	-	-	1.13	-	-	-

Примечания: зерно 1: 1-1 – матрица; 1-2 – 1-4 – точки анализа оболочки; зерно 2: 2-1 – матрица; 2-2 – 2-3 – точки анализа оболочки

Таким образом, техногенно-минеральные образования Чернореченской россыпи относятся к намывному типу складирования вещества, с зональным распределением минералов переработанных руд и золота. Согласно [Наумов, 2010] содержание золота по отвалу зависит от динамики водного потока, преимущественно в устьевой зоне крупное, среднее золото и золото с сростками, а на периферии – тонкое и мелкое. В отвалах присутствует преимущественно остаточное золото, которое сильно подверглось преобразованиям за счет применения амальгамации в методики обогащения. Обнаруженное многообразие золотоносных фаз в виде частиц золота, пленок, примазок, корочек и разнообразных частиц (шариков, палочек, пружинок и псевдоморфоз по зубчикам от медных застежек), является результатом активного взаимодействия остаточного

и амальгамированного золота, которое способствует укрупнению частиц в отложениях.

6.3. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКЖАЛ

Объект расположен Жарминском районе Восточно-Казахстанской области Казахстана в пос. Акжал. Месторождение ограничено Боко-Акжальским глубинным разломом северо-западного простирания. Рудное поле сложено вулканогенно-терригенными породами Аркалыкской свиты нижнекаменноугольного возраста, и небольшими интрузиями Кунушского комплекса (С₃-Р₁) (рис. 45). Породы аркалыкской свиты представлены порфиритами, яшмами, алевролитами, песчаниками и кремнистыми сланцами с редкими линзами рифовых известняков [Вавулин, 2016].

Золото содержится в кварцевых жилах с минерализованными зонами, играющими подчиненную роль. Главными рудными минералами являются золотосодержащие пирит и арсенопирит, реже встречаются пирротин, марказит, галенит, сфалерит, халькопирит, тетраэдрит, петцит, антимонит, киноварь и самородное золото. Содержание сульфидов до 2%. Выделяют три морфологических типа золота: золото I – преобладает в рассеянных рудах; золото II – в кварцевых жилах; золото III – в поздних кварц-карбонатных жилах. Пробность золота в верхних горизонтах 680-720 и понижается до 650-600 на более глубоких горизонтах. Средние содержания золота в отработанных рудных телах – 8-12 г/т [Вавулин, 2016].

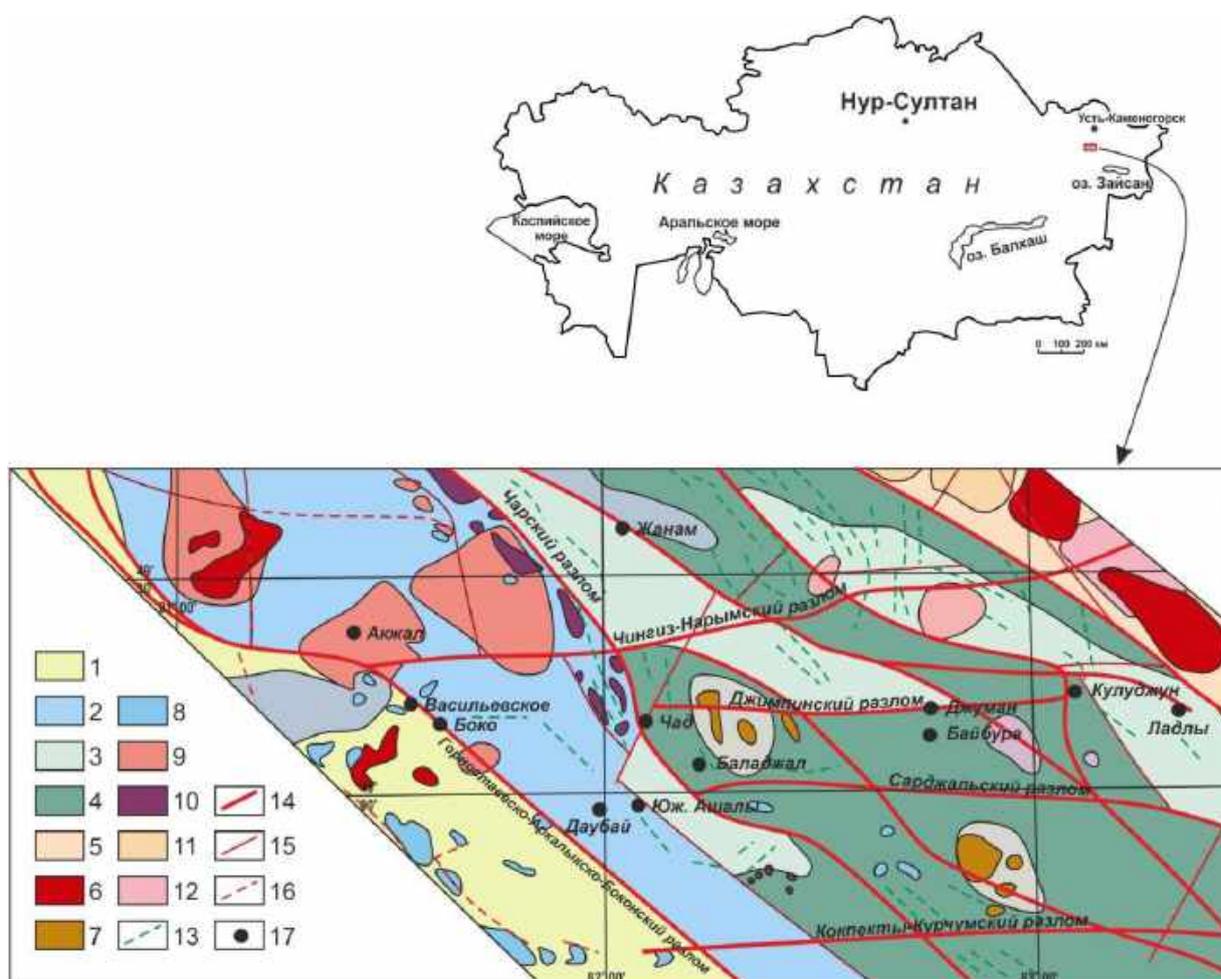


Рисунок 45. Тектоническая карта Западно-Калбинского золотоносного пояса [по Беспяев и др., 2013]. Условные обозначения: 1 – структуры, прошедшие стадию рифтогенного развития при частичной или относительно слабой деструкции; 2 – гранитизированные метабазитовые существенно вулканогенные комплексы обдуцированной и океанической коры (Суздальско-Акжалская золоторудная зона); 3 – островодужные структуры поднятия; 4 – островодужные структуры опускания (прогибы); 5 – островодужные структуры: спилит-дацитриолитовый комплекс; 6 – перемещенные гранитоиды калбинского комплекса; 7 – перемещенные гранитоиды монастырского комплекса; 8 – пояс габброидов, несущих медно-никелевое оруденение; 9 – граносиениты Аргимбайского комплекса; 10 – палеограница континентального массива: протрузии гипербазитов, меланж, покровы; 11 – тафрогенные впадины; 12 – структуры, прошедшие стадию рифтогенного развития при полной деструкции; 13 – дайки диабазов, диабазовых порфириров; 14 – глубинные разломы – структурные зоны, фиксирующие следы субдукции; 15 – региональные разрывы; 16 – внутриблоковые разрывы, установленные по геологическим и геофизическим данным, а также разрывы, контролирующие золотое оруденение; 17 – месторождения золота.

Хвостохранилище месторождения Акжал сформировалось за период более 48 лет работы фабрики месторождения. Отвалы достигают высоты более 2.5 м. Верхние горизонты, преимущественно, светло-коричневого цвета, ближе к почвам (к основанию) выделяется горизонт черного цвета. Добыча золота осуществлялась следующим способом: 1) дробление и измельчение руды до 0.2 мм; 2) добавление ртути к основному концентрату в «бегунковой» чаше; 3) разделение амальгамы с

золотом и концентрата с помощью воды; 4) нагревание амальгамы и получение концентрата золота.

По результатам атомно-абсорбционного анализа (аналитик Ильина В.Н.) содержание золота в техногенных отложениях достигает 0.67 г/т; серебра – 0.97 г/т. Среди видимых самородных выделений обнаружено 5 знаков.

Золото мелкое (<0.1 мм) и представлено вытянутым (палочкообразным) и изометричными формами частиц (рис. 4б), которые покрыты пленками и налетами. На поверхности золотин присутствуют как скульптуры роста (рис. 41б, е), так и растворения. Также встречаются «нашлепки» на поверхности. По химическому составу, это золото средней пробыности (840 ‰) с примесью серебра 16 мас. % (табл. 1, приложение).

Таким образом, обнаруженное золото из ТМО месторождения Акжал мелкое (<0.1 мм), изометричных и вытянутых форм. На поверхности отмечаются следы преобразования и роста золота. Возможно, это остаточное золото с ярко выраженными следами гипергенного преобразования.

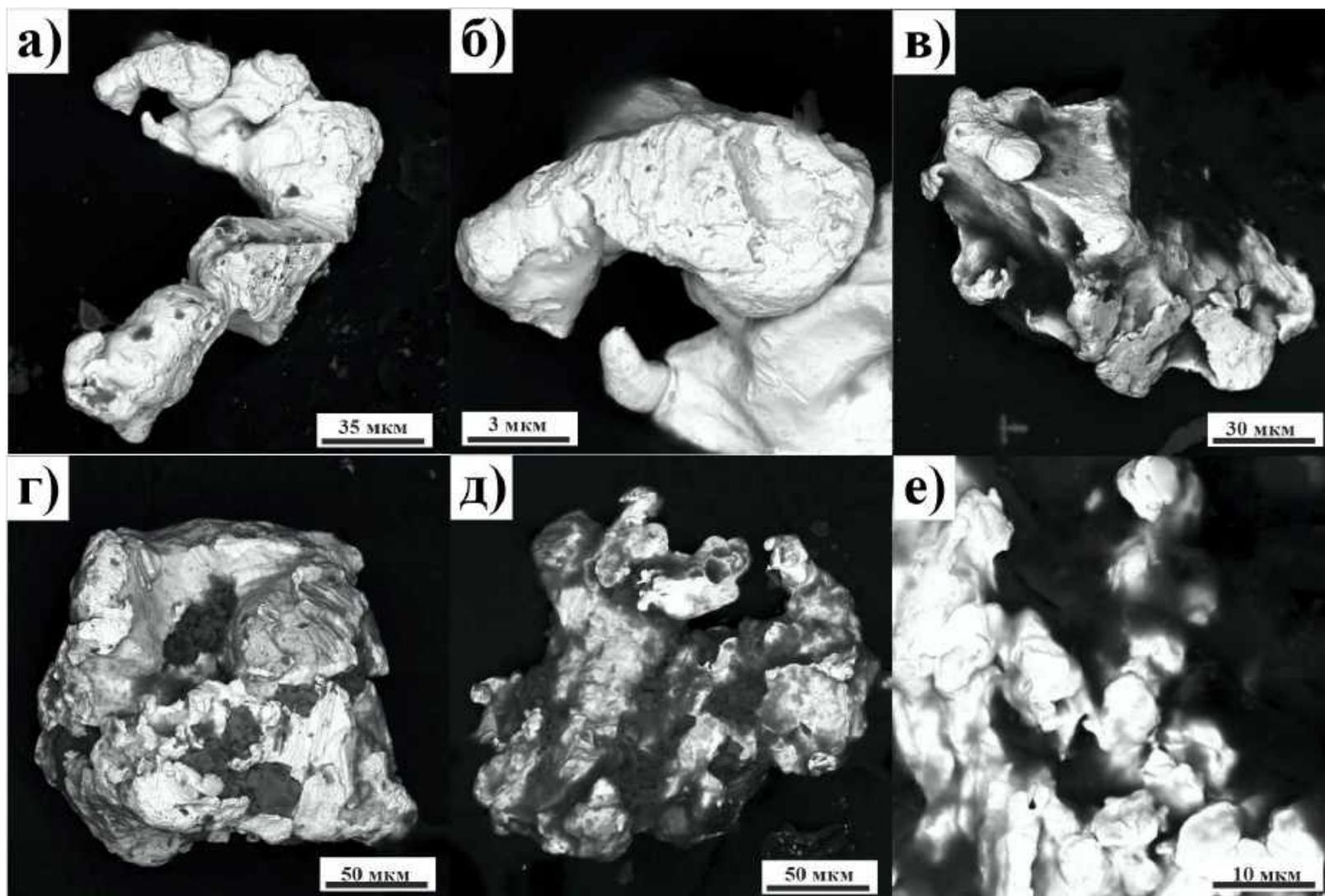


Рисунок 46. Морфология индивидов золота из ТМО месторождения Акжал: а) общий вид золотины палочкообразной формы, похожий на клешню; б) ув. фрагмент изображения А с видимым послойным ростом элемента кристаллического облика; в) частица кристаллического облика с нашлапками на поверхности; г-д) изометричные золотины комковидного облика с наростами на поверхности, покрытые пленками; е) ув. фрагмент изображения Д. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

6.4. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАУБАЙ

Месторождение Даубай (рис. 45) расположено в Кокпектинском районе Восточно-Казахстанской области Казахстана. Открыто в 1909 г. и обрабатывалось до 1950 г.

Месторождение находится в покрове андезитовых порфиров даубайской свиты нижней перми, мощностью более 300 м. Золотое оруденение контролируется одноименным сквозным разломом широтного простирания. Месторождение кварцево-жильное. Жилы протяженностью до 1000 м и более и мощностью до 1 м, меридионального, редко субширотного простирания. Размещаются в зонах смятия и дробления. Всего на месторождении обрабатывалось более 10 кварцевых жил. Главной является жила «Президент», также выделяют жилы Сулу, Яковлевская, Даубайская, Подаренная, Ульяновская и др. Содержание в них в среднем составляло 12-15 г/т при кустовом характере распределения оруденения. Состав руды: пирит, арсенипирит, золото, реже халькопирит, шеелит, стибнит. Содержание сульфидов 1-3% [Вавулин, 2016].

6.4.1. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЯКОВЛЕВСКОЕ И ПРЕЗИДЕНТ

Месторождения Яковлевское и Президент расположены в Восточном Казахстане и относятся к золотокварцевой мало-сульфидной формации. На месторождениях золото присутствовало в свободной форме в кварцевых жилах с содержанием около 10 г/т. Отработку объектов осуществляли с 1913-1954 гг. Золото извлекали на бегунковой фабрике с использованием амальгамирования по методике, аналогичной схеме отработки руд месторождения Акжал.

По данным атомно-абсорбционного анализа (аналитик Ильина В.Н.) содержание золота достигает 0.14 г/т; серебра – 0.44 г/т. Всего было обнаружено 2 знака видимого золота.

Первая частица – это золоти́на размерностью ~ 300 мкм (рис. 47 а-в), которая имеет сложную форму с элементами трещиноватости (кавернозности). На поверхности можно наблюдать структуры роста, которые выражены небольшими «нашлепками» ($\sim 3-5$ мкм) на «кавернозных» поверхностях. Золото средней пробыности (853 ‰), отмечаются примеси Ag до 5 мас. %, Hg до 9 мас. %, Cu до 0.5 мас. %.

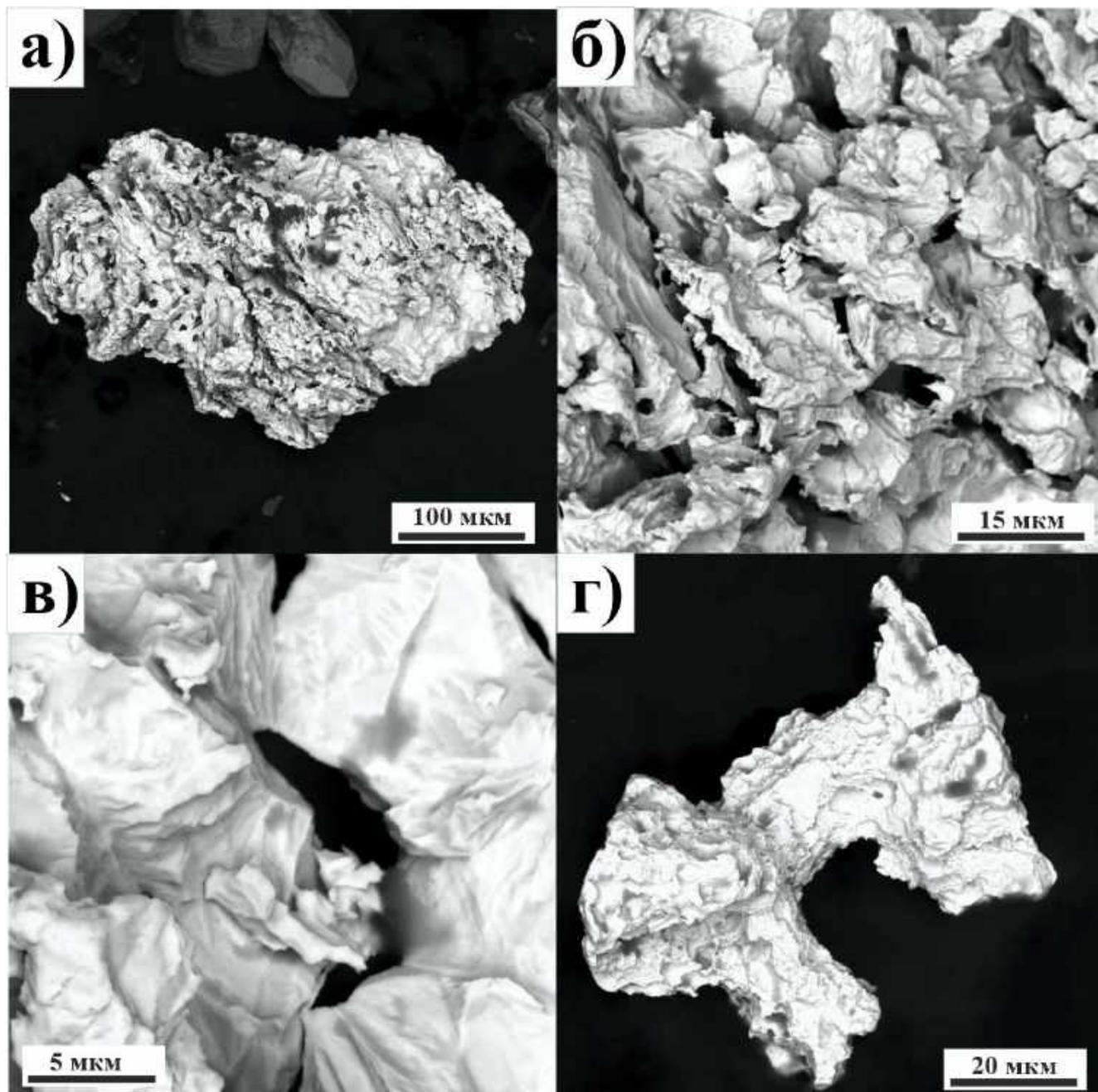


Рисунок 47. Золотины из ТМО месторождений Яковлевское и Президент: а) общий вид золоти́ны массивного облика; б-в) ув. фрагменты изображения А с видимыми наростами на поверхности частицы; г) частица кристаллического облика. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

Вторая частица – золото размерностью <0.1 мм (рис. 47г), дендритного облика с элементами структур растворения на поверхности, на гранях которых нарастает золото другой генерации в виде «губчатых» наростов. Золото высокопробное (978 ‰).

6.4.2. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАУБАЙ

На месторождении Даубай (Восточный Казахстан) материал был отобран из отвала, который представлен золотоносным кварцем и околожильными метасоматически измененными породами диабазового состава. Максимально золотоносен кварцево-жильный материал (среднее содержание Au - 16 г/т). Период отработки объекта относится к 60-70-м годам XX в. Золото извлекали ручным способом из подземной горной выработки. Были опробованы кварцевые жилы для изучения рудного золота. По результатам атомно-абсорбционного анализа (аналитик Ильина В.Н.), содержание золота в отвале – 0.074 г/т, в кварцевых жилах (первичные руды) – 3.5 г/т, серебра – 0.2 и 1.4 г/т, соответственно. В основании лежалого отвала обнаружено 3 знака Au и более 60 знаков получено при дроблении и промывке кварцевой жилы.

Рудное золото – мелкое (класс <0.2 мм), характеризуется вытянутой, реже изометричной формами, с элементами кристалличности (рис. 48 а-в). Поверхность зерен золота как гладкая, ровная, так и с различными структурами роста, также отмечены сростки золота с кварцем и кальцитом (рис. 48 г-е). По химическому составу пробность золота варьирует от 840 до 895 ‰, присутствуют примеси Hg до 2.8 мас. ‰, Ag до 14.3 мас. ‰. По внутреннему строению золото однородное, по краям наблюдаются каемки мощностью до 10 μm с пробностью Au до 985 ‰.

В отвале обнаружено золото мелкое, тонкое (класс <0.2 мм). Золотины вытянутой формы со следами механической деформации (рис. 49 а-в). На увеличенных фрагментах можно наблюдать как загнутые края, так и «нашлепки» золота на поверхности (рис. 49 г-ж). По химическому составу это Au 951-953 ‰, Ag до 4.6 мас. ‰, Hg до 0.2 мас. ‰. Золото однородное, зональности не обнаружено.

Таким образом, ТМО месторождений Даубай, Яковлевское и Президент относятся к насыпным отвалам. Обнаруженное золото – мелкое, тонкое золото (<0.2 мм), изометричной и вытянутой формы, редко с элементами кристалличности. Поверхность золотин подверглась незначительным преобразованиям, которые выражены в многочисленных «нашлепках» золота на поверхности матричного золота, загнутых краях.

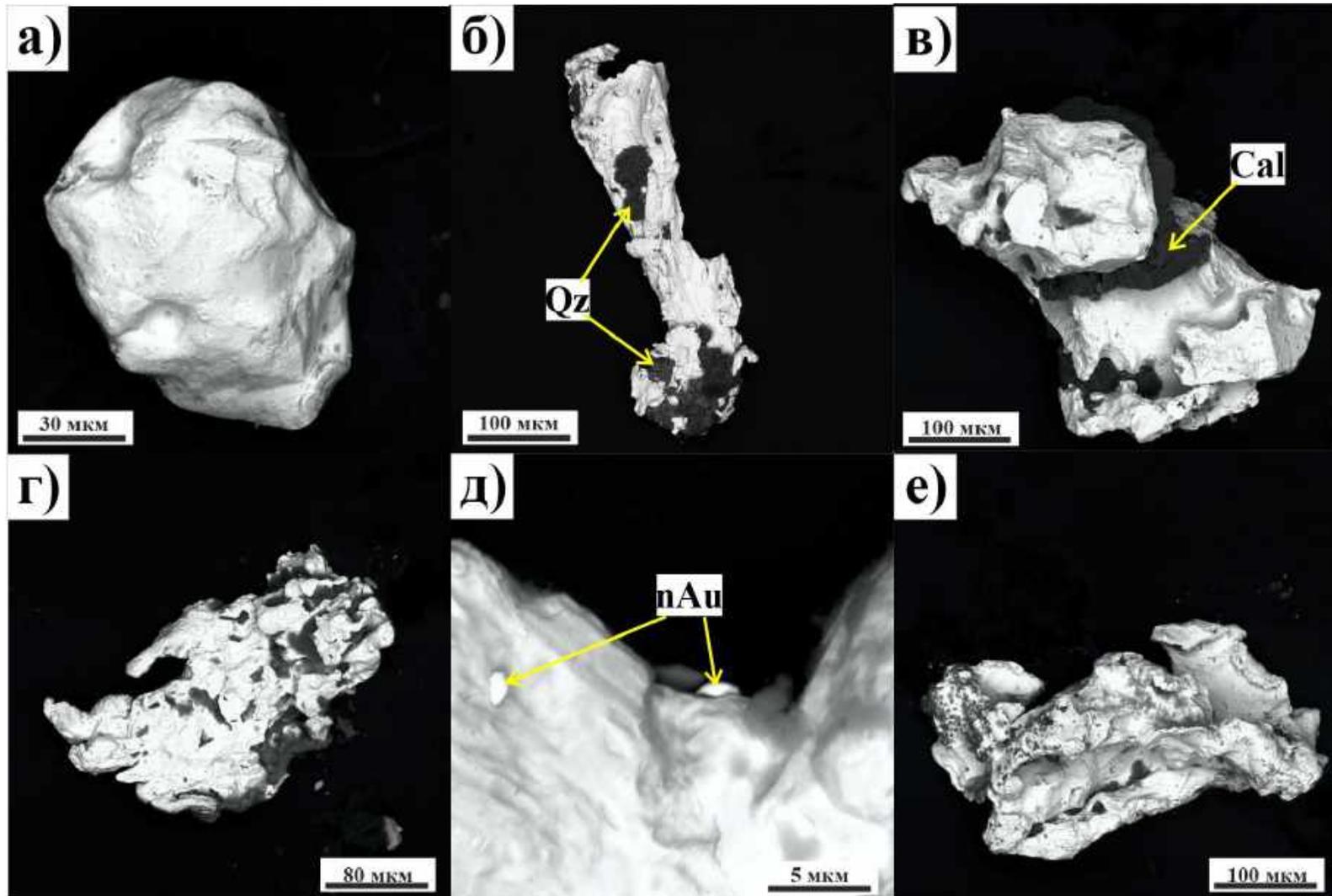


Рисунок 48. Морфология индивидов золота из кварцевых прожилков месторождения Даубай: а) изометричная частица кристаллического облика; б) вытянутая частица; в) изометричная частица с элементами кристалличности с сростками кварца; г) вытянутая частица уплощенного облика; д) сферолитовые наросты Au микронного размера на поверхности самородной частицы; е) вытянутая частица кристаллического облика. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

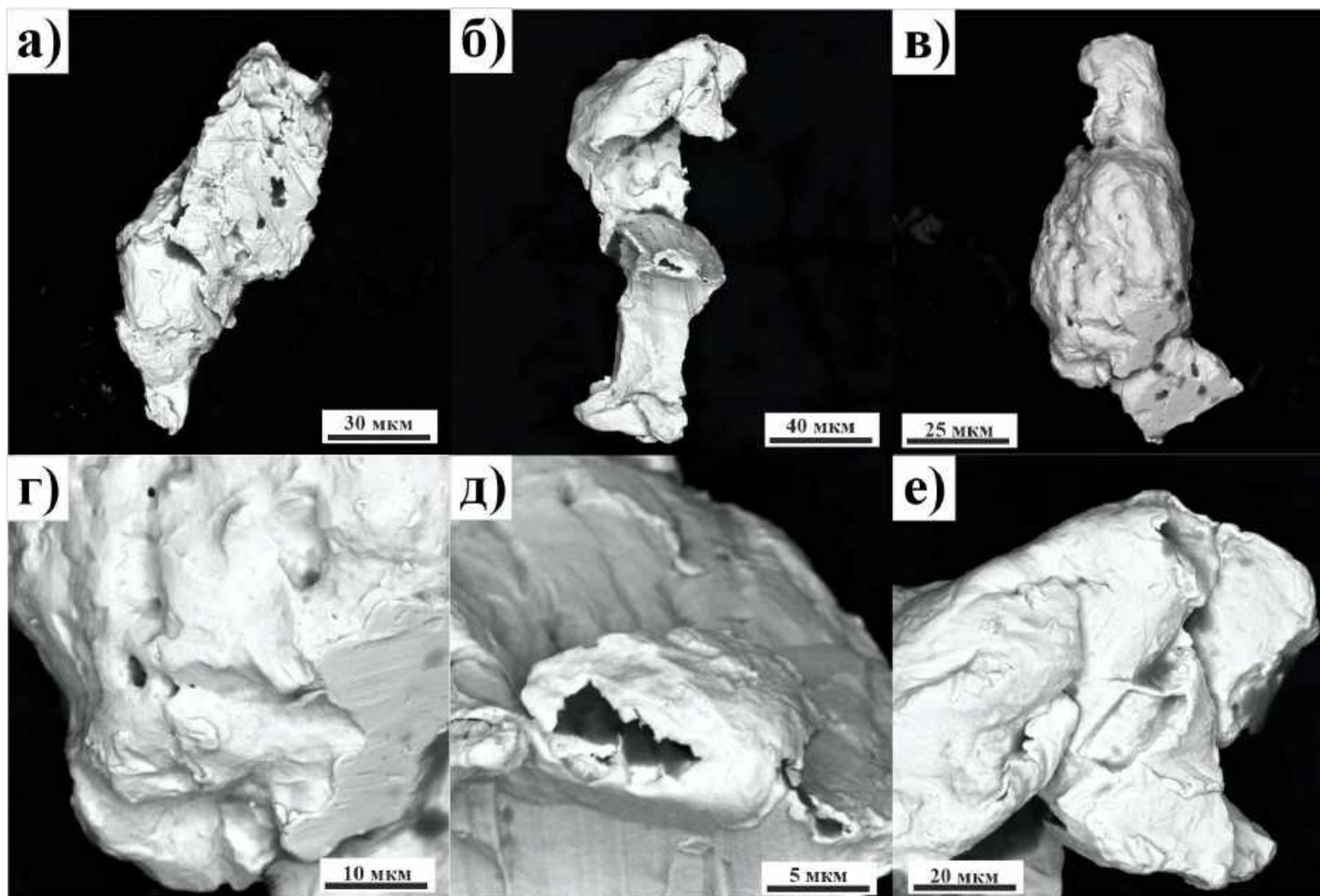


Рисунок 49. Морфология индивидов золота из отвала месторождения Даубай: а-в) частицы вытянутой формы с элементами кристалличности, с сростками кварца; г-д) следы механических деформаций, наросты Au на поверхности самородных частиц, загнутые края. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

6.5. ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ ОТЛОЖЕНИЙ РР. ИС И ТУРА

Хвостохранилище ТМО бассейна рр. Тура и Ис расположено на Среднем Урале (Краснотурьинский район), в пределах Исовского узла, россыпи которого генетически связаны с ультрамафитовыми массивами (рис. 42).

Основные исследования были проведены сотрудниками лаборатории осадочных полезных ископаемых (ЛОПИ) Пермского государственного университета. Автором изучено непосредственно самородное золото.

Пробы отбирали из специализированных отвалов шлихообогатительной установки (ШОУ) Исовского прииска, которая образовалась в результате переработки концентратов с гидравлик и драг в бассейне рр. Тура, Ис. По данным [Наумов, 1994], основную долю (50.2%) составляет золото фракции менее 0.08 мм, реже (20.4%) встречается золото фракции 0.5-0.25 мм, еще меньше (16%) золота класса 2.0-0.5 мм, 0.25-0.125 мм – 8.7%, 0.125-0.08 мм – 4.8%. Среднее содержание свободного золота составило 8.2 г/м³. В минералогическом составе преобладает (%): ильменит – 45, гематит – 13, пироксен – 10, лимонит – 6, амфиболы – 3 [Лунев, Наумов, 1991].

В ТМО присутствует золото разных морфологических типов: от изометричных до уплощенных форм, отмечены сростки золота с амальгамами или полностью амальгамированные частицы разных форм и размеров. Повсеместно встречаются шарики, палочки и псевдоморфозы по «зубчикам» от медных молний.

Поверхность золотин существенно преобразована. В ТМО происходит укрупнение и рост самородных частиц (рис. 50), что подтверждается результатами изучения внутреннего строения. Новообразованные фазы представлены нано- и микрочастицами сферолитовых и чешуйчатых форм.

С помощью изучения микроструктур золота (внутреннего строения) можно четко выделить остаточное и новообразованное (преобразованное) золото (рис. 51). Чаще всего эти фазы кардинально отличаются по химическому составу и визуально отличимы. К новообразованным фазам можно отнести такие минералы как: вейшанит – Au₅₆₋₆₇Hg₃₃₋₃₉ с примесями Ag до 5 мас. %, аурикуприд – Cu₃₇Au₅₀ с

примесями Zn до 7 мас. %, Hg до 6 мас. %, тетра-аурикуприд – $\text{Cu}_{24}\text{Au}_{70}$ с примесями Ag до 0.4 мас. %, Hg до 5.6 мас. %, колымит $\text{Cu}_{27}\text{Hg}_{73}$ и самородную медь Cu_{100} . Вейшанит является своеобразным цементом, который соединяет частицы золота между собой. Присутствуют как однородные фазы, так и пористые фазы вейшанита. Вторые могут быть связаны с процессами его разрушения. При этом, пористость остаточного золота варьирует от 806 до 950 % с примесью Ag до 19 мас. %. Также отмечены сростки золота с халькопиритом и кварцем, изоферроплатиной и тетраферроплатиной, и обнаружены выделения хлораргирита.

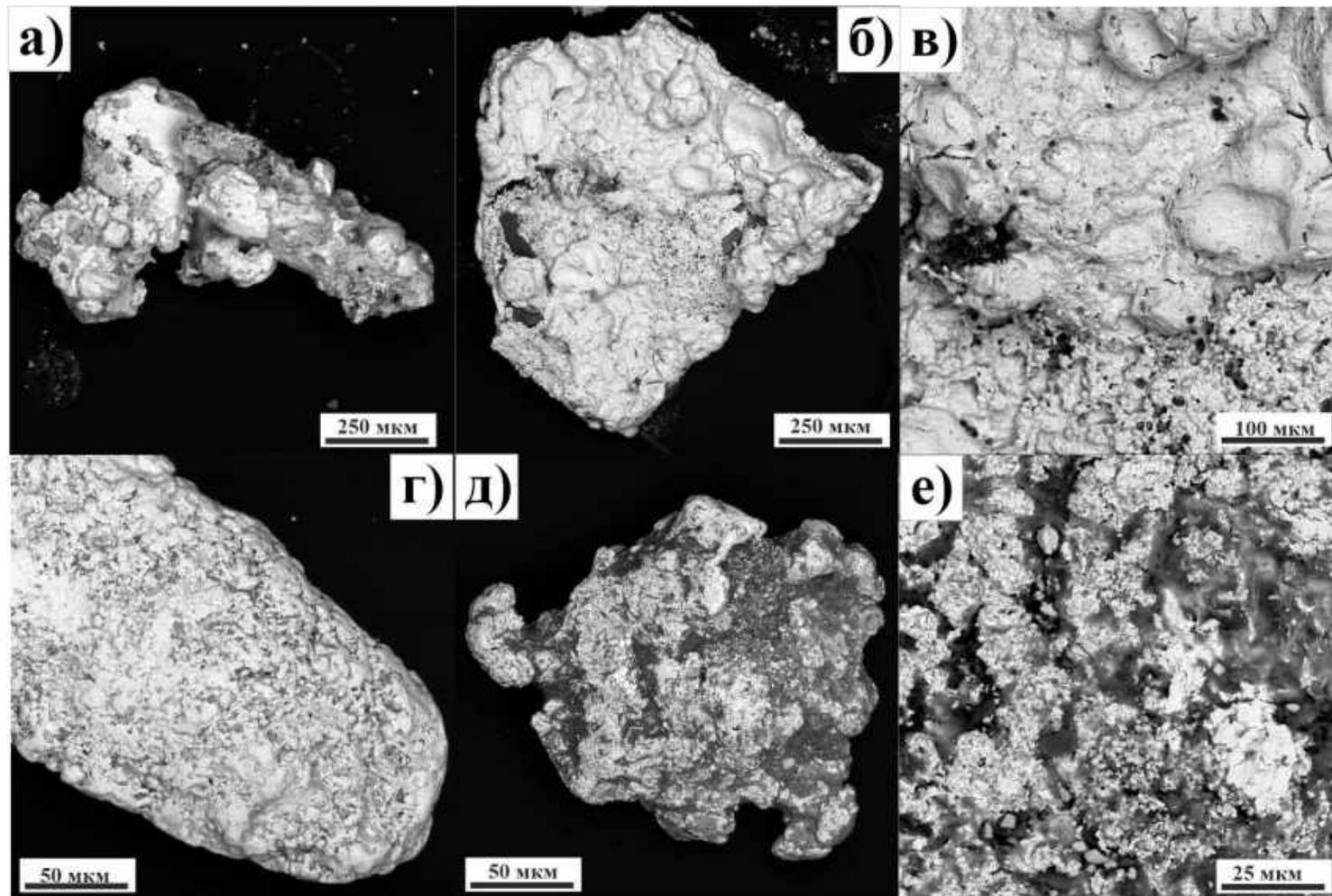


Рисунок 50. Морфология индивидов золота и микроскульптуры поверхностей золоти́н из ТМО Исовского ШОУ: а) частица вытянутой формы, с нарощими частицами, которые образуют более крупный агрегат; б) изометричная частица уплощенного облика с наростами округлой формы на поверхности; в) ув. фрагмент изображения «б»; г) поверхность золотины с мелкими частицами вытянутой формы; д) частица изометричного облика с пленками гидроксидов Fe и Mn на поверхности; е) ув. фрагмент изображения «д» с сферолитовыми частицами Au микронных размеров на поверхности золотины и в пленках. Снято на сканирующем микроскопе в режиме BSE-съемки.

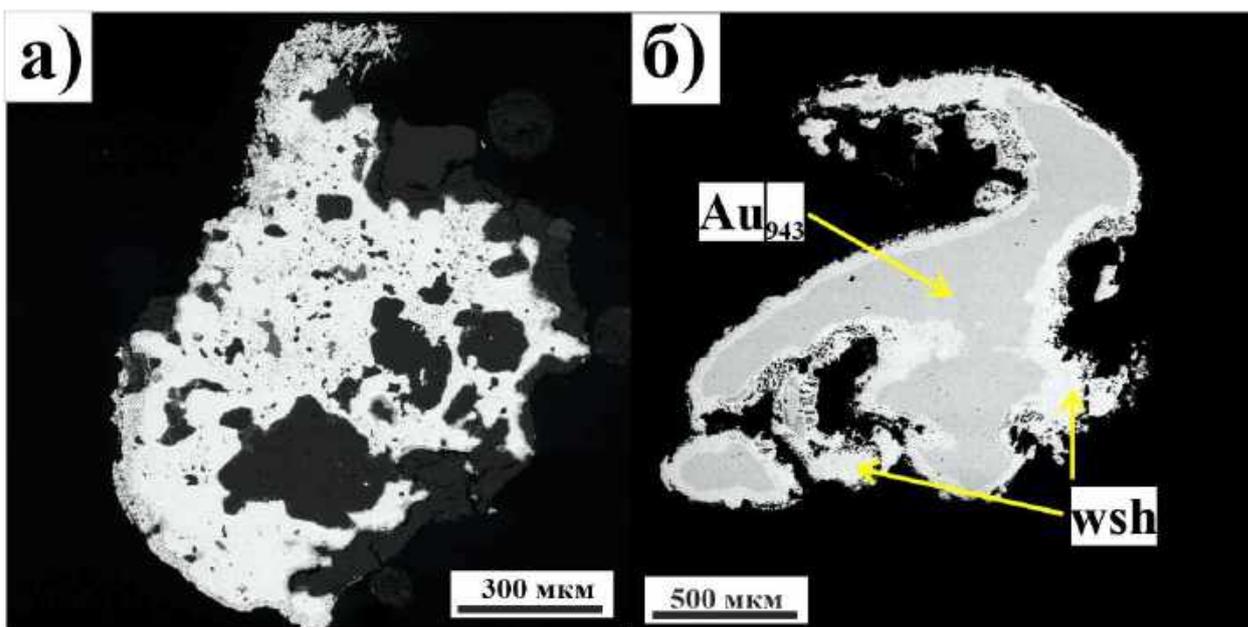


Рисунок 51. Микроструктуры золота из ТМО Исовского ШОУ: а) изометричная золотина сложного строения с сростками вмещающих минералов, по краям игольчатые формы золота; б) агрегатное золото, состоящее из нескольких индивидов, по краям которых каемка вейшанита (Wsh – $(Au,Ag)_3Hg_2$).

Таким образом, техногенно-минеральные образования шлихообогатительной фабрики бассейна рр. Тура, Ис – это насыпные отложения, в которых наблюдается обилие и разнообразие золотоносных фаз. Такое многообразие можно объяснить тем, что отвал являлся конечной ступенью обогащения золота (домывочный цех, в котором получают суперконцентрат золота). В техногенных отложениях преобладает остаточное золото, которое активно подверглось преобразованиям за счет агрессивного способа обогащения амальгамацией. Наличие Hg приводит к заметному укрупнению как видимых самородных частиц, так и вмещающих и золотосодержащих минералов в отложениях.

6.6. КРИТЕРИИ СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ ЗОЛОТА ТЕХНОГЕННО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ЭКЗОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Среди экзогенных месторождений Au аналогами техногенно-минеральных образований являются месторождения кор выветривания, зоны окисления и

россыпи. Ниже представлен комплекс отличительных признаков, характерных для преобразования золота в этих объектах:

1) В россыпях золото *распределяется по крупности, уплощенности, «массивности» и «уплотненности»* [Билибин, 1955; Петровская, 1973; Нестеренко, 1991; Николаева, Яблокова, 2007 и др.] 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* [Смирнов, 1955; Альбов, 1960; Калинин и др., 2006 и др.].

2) В россыпях в результате транспортировки на поверхности золотинок можно выделить следующие *механические преобразования*: пустоты, отпечатки, образованные в результате высвобождения Au от сростков первичных минералов, окатывание частиц, истирание, сковывание [Билибин, 1955; Петровская, 1973; Нестеренко, 1991 и др.].

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 золотинок образуются скульптуры растворения в виде «шагреновой» поверхности, «притупленных» или сглаженных вершин и ребер и др.

4) *Укрупнение отдельных золотинок 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 и в виде частиц более крупных кристаллов и их сростков. Иногда наросты нано- и микрочастиц

«нового» Au обнаруживаются и на поверхности золотин из россыпных месторождений [Reith et al., 2012; Shuster et al., 2017; Stewart et al., 2017 и др.].

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

б) *Изменение химического состава золотин и формирование высокопробных кайм и прожилков* характерны для всех экзогенных месторождения золота [Петровская, 1973, 1993; Нестеренко, 1991; Николаева, Яблокова, 2007; Николаева и др., 2015; и др.]. Для месторождений кор выветривания и зон окисления новообразованное золото чаще всего отличается от первичных руд более высокой пробностью (обычно, на 100-250 ‰).

Все вышеперечисленные признаки установлены для золота из ТМО изученных месторождений (табл. 13, приложение). В изученных техногенно-минеральных образованиях разных геолого-генетических типов месторождений 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. 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 сильно 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. Часто при наличии Hg, могут образовываться различные палочки, шарики, разнообразные псевдоморфозы, которые отсутствуют в природных объектах.

В целом, объекты насыпного типа являются аналогами кор выветривания или зон окисления (табл. 13, приложение), 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 (табл. 13, приложение). 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 кораи 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 типоморфного анализа выделены внешние и внутренние 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. Из тиосульфатных комплексов образуется золото низкой и средней пробности, тогда как из гидросульфидных – высокопробное золото.

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 микроаростов золота разных форм. Однако, наиболее яркие преобразования выражены в объектах: а) где применялось амальгамирование; б) где присутствует обилие сульфидных минералов.

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.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ АВТОРА*Журналы из перечня ВАК:*

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

Прочие публикации:

3. **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.
4. **Хусаинова А.Ш.** Золотоносность скарново-метасоматического месторождения Тардан и сопряженной с ним россыпи р. Бай-Сют (Тыва) // Металлогения древних и современных океанов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2015, с. 181-185.
5. **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.
6. **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.

7. **Хусаинова А.Ш.** Некоторые факты и следствия техногенного рудогенеза золота // *Материалы Шестой Российской молодежной научно-практической Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования»*. М.: ИГЕМ РАН, 2016, с. 377-380.

8. 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.

9. **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.

10. **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.

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

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

13. **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.

14. **Alfiia 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.

15. **Alfiia 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.

16. **Alfiia Khusainova** Secondary gold structures: evidence of "new" gold's growth inside wastes of sulphide deposits // The material of 15th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Scotland, Glasgow, 2019.

17. **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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ

Техногенно-минеральные образования (ТМО) – это скопления минеральных веществ на поверхности Земли или в горных выработках, образовавшиеся в результате их отделения от массива и складирования в виде отходов горного, обогатительного, металлургического и другого производства [Макаров, 2001].

Хвостохранилище – это горно-геологический объект, представляющий собой комплекс специальных сооружений и оборудования, предназначенный для хранения или захоронения радиоактивных, токсичных и других отходов обогащения полезных ископаемых, именуемых в специализированной литературе хвостами [Википедия, 13.05.2019].

Типоморфные характеристики – совокупность параметров (размер частиц золота, морфология, внутреннее строение и состав (пробность, элементы примеси), золотоносные минеральные ассоциации), которые описывают особенности золота в исследованном объекте [Николаева, Яблокова, 2007].

g/t – грамм на тонну, 0,0001 мас. % (соответствует «ppm» в англоязычной литературе);

мас. % – массовые %;

BSE – обратно-рассеянные электроны (режим съемки на сканирующем электронном микроскопе).

СЭМ – сканирующая электронная микроскопия.

МРСА – микрорентгено-спектральный (микронзондовый) анализ.

ААС – атомно-абсорбционный спектроскопический анализ.

РФА – рентгено-флуоресцентный анализ.

ИСП МС – масс-спектрометрический анализ с индуктивно-связанной плазмой.

ПОВ – природное органическое вещество.

Аббревиатуры минералов [по Donna et al., 2010]:

Au – золото;

Brt – барит;

Qz – кварц;

Csp – халькопирит;

Cal – кальцит;

Ms – мусковит;

Kln – каолинит;

Ght – гетит;

Mlh – малахит.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбов М.Н. Вторичная зональность золоторудных месторождений Урала. М.: Госгеолтехиздат, 1960. 215 с.
2. Амосов Р.А., Васин С.Л. Золотые микрофоссилии // Руды и металлы, 1993, № 3, с. 101-107.
3. Амосов Р.А., Васин С.Л. Онтогенезис самородного золота России. М.: ЦНИГРИ, 1995. 150 с.
4. Бакулина Л.П., Минова Н.П. Золотоносные россыпи Тимана // Тез. докл. XI Междунар. совещ. по геол. россыпей и местор. кор выветривания. М., 1997, с. 28.
5. Банщикова Т.С., Литвинцев В.С., Пономарчук Г.П. Морфологические характеристики техногенного золота и закономерности его пространственного расположения в отвальных комплексах // Мат. XIV межд. сов. по геол. россыпей и м-й кор выветривания, 2010, Новосибирск: ИГМ СО РАН, с. 82-86.
6. Баранников А.Г., Азовскова О.Б. Золотоносные объекты гипогенно-гипергенного типа на Урале. Конвергентность признаков их отличия от рудоносных кор выветривания // Известия Уральского государственного горного университета, 2017, Вып. 2 (46), с. 13-22.
7. Беспаяев Х.А., Любецкий В.Н., Любецкая Л.Д., Мукаева А.Е. Особенности металлогении Западно-Калбинского золоторудного пояса // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук, 2013, 5 (401), с. 13-20.
8. Беневольский Б.И., Иванов В.Н. Минеральносырьевая база золота на рубеже XXI в. // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. М., 1999, № 1, с. 9-16.
9. Билибин Ю.А. Основы геологии россыпей. Изд-во Академии наук СССР. Москва, 1955. 472 с.
10. Болгов Г.П. Сульфиды Салаира, Урская группа полиметаллических месторождений // Изв. Томск. Инд. ин-та, 1937, т.53 (11), с. 45-96.

11. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем / Ин-т геологии и минералогии СО РАН. – Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2006. – 169 с.

12. Блюман Б.А., Ибрагимова Э.К., Сапега В.Ф. Типоморфизм биогенного золота линейной коры выветривания // Доклады XI съезда Рос. минер. общ.: «Современная минералогия от теории к практике», 2013, с. 147-149.

13. Брагин В.И., Макаров В.А., Усманова Н.Ф., Самородский П.Н., Лобастов Б.М., Вашлаев А.И. Минералогические исследования техногенного сырья хвостохранилища золотоперерабатывающей фабрики // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2019, №1, с. 163-171.

14. Вавулин О.В. Восточно-Казахстанская область. Золото. Справочник. «РОКИЗОЛ», Усть-Каменогорск – Бишкек, 2016, 331 с.

15. Википедия (Интернет-источник)
https://en.wikipedia.org/wiki/Acid_mine_drainage (на 17.03.2019)

16. Воробьев А.Е., Хоноре Т. Сравнительный анализ свойств нанорельефа различных золотосодержащих сульфидов // Вестник РУДН, Инженерные исследования, 2016, № 1, с. 80-84.

17. Ворошилов В.Г., Понитевский К.Л. Геохимическая зональность колчеданно-полиметаллических месторождений северо-западной части Рудного Алтая // Известия Томского политехнического университета, 2001, Т. 304, № 1, с. 160-169.

18. Гаськов И.В. Колчеданно-полиметаллические месторождения северо-западной части рудного Алтая: условия образования и закономерности размещения. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 2002, 46 с.

19. Гаськов И.В. Новые данные о соотношении скарновой и золоторудной минерализации на Тарданском месторождении (Северо-Восточная Тува) // Геология и геофизика, 2008, Т. 49, №12, с. 1227-1237.

20. Гаськова О.Л., Бортникова С.Б., Айриянц А.А., Колмогоров Ю.П., Пашков М.В. Геохимические особенности техногенного озера, содержащего отходы

цианирования золото-арсенопирит-кварцевых руд // Геохимия, 2000, № 3, с. 317-328.

21. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968. 568 с.

22. Григорьев Д.П. Онтогения минералог. Изд-во Львовского университета, 1961, 284 с.

23. Дербиков И.В. Ново-Урское полиметаллическое месторождение // Матер. по геол. Зап.-Сиб. края, 1937, №. 42, 58 с.

24. Дистанов Э.Г. Колчеданно-полиметаллические месторождения Сибири. Новосибирск: Наука, 1977, 351 с.

25. Добош Д. Электрохимические константы. М: Мир, 1980. 365с.

26. Ивенсен Ю.П. Опыт изучения морфологии и микроскульптуры золота // Труды треста «Золоторазведка» и НИГРИЗолото. М., 1938, вып. 10, с. 96-133.

27. Жемчужный С.Ф. Физико-химическое исследование золотых самородков в связи с вопросом об их генезисе // Изв. Ин-та физ.-хим. анализа АН СССР, 1922, т. II, вып. 1.

28. Журавкова Т.В., Пальянова Г.А., Калинин Ю.А. Горячев Н.А., Зинина В.Ю., Житова Л.М. Физико-химические условия образования минеральных парагенезисов Au и Ag на месторождении Валунистое (Чукотка) // Геология и геофизика, 2019, т. 60, № 11, с. 1565-1576.

29. Звягинцев О.Е. Геохимия золота. Изд-во АН СССР, 1941, 114 с.

30. Зеркалов В.И. Минералогия и геология колчеданных медно-цинковых месторождений Сев.-Вос. Салаира. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. н., Томск: ТПИ, 1962, 20 с.

31. Калинин Ю.А., Ковалев К.Р., Наумов Е.А., Кириллов М.В. Золото коры выветривания Суздальского месторождения (Казахстан) // Геология и геофизика, 2009, т. 50, №3, с. 241-257.

32. Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Прудников С.Г. Золотоносные коры выветривания юга Сибири. Новосибирск: «Гео», 2006, 339 с.

33. Калинин Ю.А., Бакшеев Н.А., Житова Л.М., Фрадкин Е.И. Роль биогенных факторов в образовании золота из кор выветривания и россыпей Салаира // Сборник материалов конференции – Цветные металлы и минералы, Красноярск, 2017, с. 921-927.

34. Кашин С.В., Молчанов А.В., Шатов В.В. Гидротермально-метасоматические формации регионального распространения и их использование для прогнозирования скрытого колчеданно-полиметаллического оруденения (на примере Змеиногорского рудного района, Рудный Алтай) // Региональная геология и металлогения, 2013, №56, с. 65-77.

35. Ким А.А. Анализ минералогических особенностей самородного золота в первичных и окисленных рудах месторождений Центрального Алдана // Древние коры выветривания Якутии, 1975, Якутск, с. 109-127.

36. Кожевников М.Г. К вопросу о роли химических агентов в обогащении старых приисковых отвалов // Труды треста «Золоторазведка», 1935, вып. 1, с. 7-13.

37. Ковалев К.Р. Особенности формирования руд колчеданно-полиметаллических месторождений Северо-Восточного Салаира и Восточной Тувы // Дис. ... докт. геол.-мин. н., Новосибирск, 1969, 283 с.

38. Ковлеков И.И. Техногенное золото Якутии. Изд-во МГУ, Москва, 2002, 303 с.

39. Коробейников А.Ф., Мацюшевский А.В. Золото в интрузивных и контактово-метасоматических породах Тарданского скарного поля Тувы // Геохимия, 1976, № 9, с. 1409-1416.

40. Коробушкина Е.Д., Бирюзова В.И., Коробушкин И.М., Каравайко Г.И. Зарождение кристаллов золота в клетках дрожжей и его аккумуляция // Докл. АН СССР, 1989, т. 304, № 2, с. 431-433.

41. Коробушкина Е.Д., Коробушкин И.М. Взаимодействие золота с бактериями и образование «нового» золота // Докл. АН СССР, 1986, т. 287, № 4, с. 978-980.

42. Королева Г.П., Ломоносов И.С., Карпов И.К. Физико-химическая модель гидрогенного концентрирования золота в зоне гипергенеза // ДАН, 1984, т. 278, № 3, с. 732-734.

43. Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов // Санкт-Петербург: Невский курьер, 1997, 228 с.
44. Крейтер В.М., Аристов В.В., Волынский И.С. Поведение золота в зоне окисления золото-сульфидных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1958. 268 с.
45. Кужугет Р.В. Иодидная и бромидная минерализация в окисленных рудах Хаак-Саирского золоторудного месторождения, Западная Тува // Записки Российского минер. общ., 2014, СХLIII, №2, с. 64-80.
46. Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Прокопьев И.Р., Редина А.А. Минералого-геохимические особенности и условия образования золото-сульфидно-кварцевого месторождения Тардан (Северо-восточная Тува) // Геология и геофизика, 2020, Т. 61, № 2, с. 194-215.
47. Кужугет Р.В., Монгуш А.А., Ооржак Ш.Н., Бутанаев Ю.В. Иодсодержащие минералы ряда хлораргирит – бромаргирит в окисленных рудах золото-кварцевых рудопроявлений Хаак-Саир и Тардан-2 (Тува, Россия) // Изв. Томского политех. ун-та, Инжиниринг георесурсов, 2018, Т. 329, №12, с. 80-93.
48. Кузнецова И.В., Сафронов П.П., Моисеенко Н.В. Вещественно-минеральная характеристика техногенных россыпей – потенциальных источников благородного металла (на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья, Россия) // Георесурсы, 2019, 21(1), с. 2-14.
49. Кузнецова И.В. Геология, тонкодисперсное и наноразмерное золото в минералах россыпей Нижнеселемджинского узла (Приамурье). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Красноярск: СФУ, 2011, 21 с.
50. Куимова Н.Г. Аккумуляция и кристаллизация золота микроорганизмами, выделенными из рудных и россыпных месторождений. Дис. ... канд. геол.-мин. н., Владивосток, 2004, 135 с.
51. Куимова Н.Г., Жилин О.В. Биогенная кристаллизация ионного золота микромицетами // Докл. РАН, 2002, Т. 386, № 6, с. 809-812.
52. Куимова Н.Г., Моисеенко В.Г. Биогенная минерализация золота в природе и эксперименте // Литосфера, 2006, № 3. с. 83-95.

53. Литвинцев В.С., Леоненко Н.А., Банщикова Т.С. Типоморфные особенности золота техногенных россыпей Приамурья в аспекте новых технологий // Тихоокеанская геология, 2016, т. 35, №4, с. 89-99.

54. Лунев Б.С., Наумов В.А. Концентрация и рассеяние золота в намывных техногенных отложениях // Геохимия техногенеза, Минск, 1991, с. 164-165.

55. Лунев Б.С., Наумов В.А. Геолого-технологические исследования по комплексной разработке минерального сырья техногенных россыпей. Отчет Пермского государственного университета Естественно-научного института. Пермь, 1993. 19 с.

56. Маликов Ю.И. Подготовка препаратов для анализа на микрозонде. Методические рекомендации. Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР, 1984. - 36 с.

57. Макаров В.А. Условия формирования техногенных золотосодержащих объектов и особенности методики их геолого-технологической оценки. Автореф. дис. ... док-ра геол.-мин. наук. Красноярск, 2001а. 33 с.

58. Макаров В.А. Геолого-технологические основы ревизии техногенного минерального сырья на золото. Красноярск, Изд-во ООО «Поликом», 2001б, 132 с.

59. Макаров В.А., Самородский П.Н. Актуальные вопросы оценки и освоения техногенных месторождений золота // Золото и технологии, 2018, №4, т. 42, с. 82-96.

60. Маракушев С.А., Ковалевская А.А., Сафронов П.П., Бородавкина О.Н. Моисеенко В.Г. Бактериальная перекристаллизация золота // Докл. АН СССР, 1989, т. 308, № 2, с. 482-485.

61. Мирзеханова Г.С. Условия формирования, принципы прогноза и оценки ресурсов техногенных образований отработанных россыпей золота: на примере юга Дальнего Востока. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук, АмурКНИИ ДВО РАН, 2005, 48 с.

62. Моисеенко В.Г. Метаморфизм золота месторождений Приамурья. Хабаровск, Книжное изд-во, 1965, 125 с.

63. Моисеенко В.Г. От атомов золота через кластеры, нано- и микроскопические частицы до самородков благородного металла. Благовещенск: ДВО РАН, Амурское отделение РМО, 2007, 187 с.

64. Моисеенко В.Г., Палажченко В.И. Эксперимент длиной в век // ДАН, 2003, т. 393, №4, с. 528-531.

65. Моисеенко В.Г., Маракушев С.А. Бактериальное концентрирование, укрупнение и «облагораживание» золота в зоне окисления золоторудных месторождений и россыпях. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 1987, 45 с.

66. Мурзин В.В., Малюгин А.А. Типоморфизм золота зоны гипергенеза (на примере Урала). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. 96 с.

67. Мягкая И.Н., Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Густайтис М.А. Распределение золота и серебра в потоке рассеяния Урского хвостохранилища (Кемеровская область) // Мат. XXV Всерос. мол. конференции: Строение литосферы и геодинамика, 2013, с. 60-62.

68. Мягкая И.Н., Сарыг-оол Б.Ю., Лазарева Е.В., Жмодик С.М. Моделирование процесса сорбции Au природными сорбентами в условиях потока рассеяния сульфидного хвостохранилища // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия, 2019, Т. 12, № 4, с. 580-589.

69. Наумов В.А. Минерагения, техногенез и перспективы комплексного освоения золотоносного аллювия. Автореф. дис. ... док-ра геол.-мин. н., Пермь: ПГУ, 2010, 42 с.

70. Наумов В.А. Особенности формирования и распределения благородных металлов в техногенных россыпях и отвалах Урала // Горный журнал. Екатеринбург, 1994, №8, с. 39-50.

71. Наумов В.А. Илалтдинов И.Я., Наумова О.Б., Кольцов В.А. Оценка содержания золота в техногенных намывных отложениях // Современные проблемы науки и образования. Изд-во «Академия Естествознания», Пенза, 2013, №4, с. 398.

72. Наумов В.А., Наумова О.Б. Взаимодействие золота с ртутью в техногенных отвалах Урала // Современные проблемы науки и образования. Изд-во «Академия Естествознания», Пенза, 2014, №6, с. 1666.

73. Наумов В.А., Наумова О.Б. Формы нахождения и перспективы освоения золота в природных и техногенно-минеральных образованиях Западного Урала // Вестник Пермского Университета. Геология, 2019, Т. 18, №1, с. 55-63.

74. Наумов В.А., Осовецкий Б.М., Наумова О.Б. Результаты исследований и предложения по извлечению золота на некоторых золоторудных объектах России и Узбекистана // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь, 2011, с. 50-52.

75. Неронский Г.И., Сафронов П.П. и др. «Новое» золото в россыпях Приамурья // Глубинное строение Тихого океана и его континентального обрамления. Благовещенск: АмурКНИИ, 1988, с. 55-56.

76. Нестеренко Г.В., Кузнецова А.И., Пальчик Н.А., Лаврентьев Ю.Г. Петровскит $AuAg(S,Se)$ – новый селеносодержащий сульфид золота и серебра // Зап. Всесоюз. минерал. общ., 1984, т. 4, №. 5, с. 602-607.

77. Нестеренко Г.В., Воротников Б.А., Николаева Н.М., Пещевицкий Б.И. Новообразования минералов золота в зоне окисления сульфидных месторождений Казахстана // Записки ВМО, 1985, Ч. СХIV, Вып. 5, с. 555-568.

78. Нестеров Н.В. Вторичная зональность золоторудных месторождений Якутии. М.: Недра, 1973, 172 с.

79. Николаева Л.А. «Новое» золото в россыпях Ленского района // Труды ЦНИГРИ. М., 1958, вып. 25, кн. 2, с. 19-122.

80. Никифорова З.С., Герасимов Б.Б., Глушкова Е.Г., Каженкина А.Г. Золотоносность востока Сибирской платформы: россыпи-коренные источники // Геология рудных месторождений, 2013, т. 55, № 4, с. 305-319.

81. Никифорова З.С., Герасимов Б.Б., Глушкова Е.Г., Каженкина А.Г. Индикаторные признаки россыпного золота как показатель прогнозирования формационных типов золоторудных месторождений (восток Сибирской платформы) // Геология и геофизика, 2018, т. 59, № 10, с. 1643-1657.

82. Никифорова З.С., Филиппов В.Е., Герасимов Б.Б. Влияние эоловых процессов на образование золотоносных россыпей в различные эпохи развития Земли // Геология и геофизика, 2005, т. 46, № 5, с. 517-528.

83. Николаева Л.А., Яблокова С.В. Типоморфные особенности самородного золота и их использование при геологоразведочных работах // Руды и металлы, 2007, №6, с. 41-57.

84. Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н., Яблокова С.В., Шатилова Л.В. Самородное золото рудных и россыпных месторождений России: атлас. Москва: ЦНИГРИ, 2015, 200 с.

85. Новгородова М.И. Метаколлоидное золото // Новые данные о минералах. М., 2015, вып. 40, с. 106-144.

86. Овчаренко Ф.Д., Ульберг З.Р., Гарбара С.В. и др. Механизм биогенного формирования аутигенных включений золота в тонкодисперсных осадках // Докл. АН СССР, 1985, т. 284, № 3, с. 711-713.

87. Оленченко В.В., Кучер Д.О., Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Еделев А.В., Гора М.П. Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) // Геология и геофизика, 2016, Т. 57, № 4, с. 782-795.

88. Осовецкий Б.М. «Новое» золото. Монография. Пермь: ПГНИУ, 2016. 116 с.

89. Осовецкий Б.М. Наноскульптура поверхности золота: монография. Пермь: ПГНИУ, 2012, 232 с.

90. Осовецкий Б.М. Природное нанозолото: монография. Пермь: ПГНИУ, 2013, 176 с.

91. Парий А.С, Амосов Р.А. Технологическое опробование техногенных россыпей с мелким и тонким золотом // Горный журнал, 1998, № 5, с. 33-41.

92. Пальянова Г.А., Кох К.А., Сереткин Ю.В. Образование сульфидов золота и серебра в системе Au-Ag-S // Геология и геофизика, 2011, т. 52, №4, с. 568-576.

93. Петровская Н.В. Золотые самородки. Наука, 1993, 191 с.

94. Петровская Н.В. Самородное золото: общие характеристики, типоморфизм, вопросы генезиса. Наука, 1973, 349 с.

95. Петровская Н.В., Новгородова М.И., Фролова К.Е. О природе структур и субструктур эндогенных выделений самородного золота // Минералогия самородных элементов. Владивосток, Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1980, с. 10-20.

96. Плюснин А.М., Погребняк Ю.Ф. Экспериментальное изучение поведения золота в условиях зон окисления сульфидных месторождений // Геология рудных месторождений, 1979, т. 21, № 1, с. 106-109.

97. Позднякова Н.Н. Использование типоморфных признаков россыпного золота при прогнозировании и поисках рудных месторождений (на примере россыпей Шахтаминского района Забайкалья и россыпи р. Чай-Юрья Магаданской области // Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Москва, ЦНИГРИ, 2015, 27 с.

98. Попенко Г.С. Минералогия золота четвертичных россыпей Узбекистана. Ташкент: Изд-во «ФАН», 1982, 144 с.

99. Половникова Л.М. Геологический отчет о техногенных образованиях хвостохранилища Змеиногорской золотоизвлекательной фабрики. Отчет, Роснедра, 2009, 31 с.

100. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во Иностранной лит-ры, 1962, 1132 с.

101. Рихванов Л.П., Абросимова Н.А., Барановская Н.В., Белан Л.Н., Большунова Т.С., Бортникова С.Б., Горбатюк Е.А., Густайтис М.А., Еделев А.В., Межибор А.М., Мягкая И.Н., Соктоев Б.Р., Юсупов Д.В., Жмодик С.М., Ищук Н.В., Кириченко И.С., Наркович Д.В., Лазарева Е.В., Оленченко В.В., Саева О.П., Сарыг-оол Ю., Усманова Т.В., Юркевич Н.В. Биогеохимический мониторинг в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом микробиологических факторов трансформации минеральных компонентов. Новосибирск, изд-во СО РАН, 2017. 437 с.

102. Романченко А.С. Изучение спонтанного осаждения наночастиц золота на сульфидах металлов с помощью сканирующей зондовой микроскопии и

рентгеноэлектронной спектроскопии. Автореферат дисс. ... канд. хим. наук. Красноярск: ИХХТ СО РАН, 2007, 19 с.

103. Росляков Н.А. Геохимия золота в зоне гипергенеза. Новосибирск: Наука. 1981. 237 с.

104. Рослякова Н.В., Щербаков Ю.Г., Агеенко Н.Ф., Портянников Д.И., Бортникова С.Б., Радостева Н.Е. Условия золотоносности колчеданно-полиметаллических месторождений // Тр. ИГиГ, 1983, № 533, с. 31-65.

105. Савва Н.Е., Пальянова Г.А., Колова Е.Е. Минералы золота и серебра в зоне вторичного сульфидного обогащения // Вестник СВНЦ ВО РАН, 2010, №1, с. 33-45.

106. Савельева К.П., Баранников А.Г. Золотое оруденение нетрадиционного типа в зоне Серовско-Маукского глубинного разлома на Северном Урале // Литосфера, 2006, №2, с. 157-166.

107. Свешников Г.Б. Электродные потенциалы минералов и их роль в растворении сульфидных руд. Уч. зап. ЛГУ, 1958, № 249, вып. 10.

108. Смирнов С.С. Зона окисления сульфидных месторождений. М. – Л., Изд-во АН СССР, 1955. 332 с.

109. Спиридонов Э.М. Обзор минералогии золота в ведущих типах Au и минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов. Апатиты, 2010, с. 143-171.

110. Сурков А.В. Атлас морфологии самородного золота. Ч.1. Москва, Издательско-полиграфическая фирма «СтудиА», 2000, 60 с.

111. Тагиров Б.Р. Поведение благородных металлов (Au, Pd, Pt) в гидротермальных флюидах. Автореферат ... докт. дисс., Москва, ИГЕМ, 2020, 50 с.

112. Таусон В.Л., Кварцова Р.Г., Липко С.В., Макшаков А.С., Арсентьев К.Ю. Типохимизм поверхности самородного золота // ДАН, 2018, т. 480, №2, с. 210-216.

113. Таусон В.Л., Кравцова Р.Г., Смагунов Н.В., Спиридонов А.М., Гребенщикова В.И., Будяк А.Е. Структурное и поверхностно-связанное золото в

пиритах месторождений разных генетических типов // Геология и геофизика, 2014, т. 55, № 2, с. 350-369.

114. Хазов А.Ф., Петровский Д.В. Генетические особенности гипергенно-модифицированного золота в корках выветривания // ДАН, 2007, т. 416, № 4, с. 533-537.

115. Хазов А.Ф., Силаев В.И., Филлипов В.Н. Аутигенная минерализация в речных россыпях как природный научный феномен // Известия Коми НЦ УрО РАН, 2010, 2, с. 54-60.

116. Харламова В.Ю. Высокоустойчивые комплексы золото (I) с серосодержащими лигандами в водном растворе. Авторефер. диссер. ... канд. хим. наук. ИНХ СО РАН, 2018, 22 с.

117. 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.

118. 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.

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

120. Черепнин В.К. К вопросу о составе и генезисе руд Урских месторождений Салаира // Изв. Томск. политехн. ин-та, 1953, т. 90, с. 56-68.

121. Черепнин В.К., Бернатонис В.К. Вторичные процессы в сульфидных и золоторудных месторождениях. Томск: ТПИ, 1981. 89 с.

122. Шаповалов Д.Н., Совлук В.И., Безходарнова Т.Э., Коновалова А.В. О результатах разведки центральной части рудного поля месторождения Тардан. Отчет «ООО Тардан-Голд». КЫЗЫЛ, 2008. 202 с.

123. Шваров Ю.В. HCh: Новые возможности термодинамического моделирования геохимических систем, предоставляемы Windows // Геохимия, 2008, №8, с. 898-903.
124. Шварцев С.Л., Дутова Е.М. Гидрогеохимия и мобилизация золота в зоне гипергенеза (Кузнецкий Алатау, Россия) // Геология рудных месторождений, 2001, т. 43, № 3, с. 252-261.
125. Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г. и др. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал "Гео", 2000. 187 с.
126. Шило Н.А. Учение о россыпях. Теория россыпеобразующих рудных формаций и россыпей. Владивосток: Дальнаука, 2002. 576 с.
127. Юркевич Н.В., Карин Ю.Г., Кулешова Т.А. Состав отвала Белоключевского месторождения золота по данным электромагнитного сканирования и геохимического опробования // XXI Международного симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых: «Проблемы геологии и освоения недр»: Труды конференции, 2017, Т. 1, с. 853-855.
128. Яблокова С.В. Образование «нового» золота в некоторых россыпях Южной Якутии // Геология россыпей. М.: Наука, 1965, с. 152-155.
129. Beveridge T.J. Role of cellular design in bacterial metal accumulation and mineralization // An. Rev. Microbiol., 1989, V. 43, pp. 147-171.
130. Birich A., Stopic S., Friendrich B. Kinetic Investigation and Dissolution Behavior of Cyanide Alternative Gold Leaching Reagents // Scientific Reports, 2019, vol. 9, p. 10.
131. Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Saeva O., Shuvaeva O., Makas A., Troshkov M., Abrosimova N., Kirillov M., Korneeva T., Kremleva T., Fefilov N., Shigabaeva G. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste // Science of the Total Environment, 2019, V. 647, pp. 411-419.
132. Boyle R.W. The geochemistry of gold and its deposits // Geol. Surv. Canada, Bull., 1979, № 280, p. 583.

133. Blowes D.W., Ptacek C.J., Jambor J.L., Weisener C.G., Paktunc D., Gould W.D., Johnson D.B. The Geochemistry of Acid Mine Drainage // Treatise on Geochemistry (Second Edition), 2014, Vol. 11, pp.131-190.
134. Blowes D.W., Jambor J.L. The pore-water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide tailings, Waite Amulet, Que'bec, Canada // Appl. Geochem., 1990, 5, pp. 327-346.
135. Breitbach A.S. Nanoparticles in the Environment: A Study of Surface Reactivity of Pyrite and Arsenopyrite // MATERIALS, NNIN REU, 2006, Research Accomplishments, pp. 54-55.
136. Brown A.D., Jurinak J.J. Pyrite oxidation in aqueous mixtures // J. Environ. Qual., 1989, 18, pp. 545–550.
137. Buckley A.N., Woods R.W. The surface oxidation of pyrite // Appl. Surf. Sci. 27, 1987, pp. 437-452.
138. Burke M., Rakovan J., Krekeler M.P.S. A study by electron microscopy of gold and associated minerals from Round Mountain, Nevada // Ore Geology Reviews, 2017, V. 91, pp. 798-717.
139. Çelebi E.E., Öncel M.S. Determination of acid forming potential of massive sulfide minerals and the tailings situated in lead/zinc mining district of Balya (NW Turkey) // Journal of African Earth Sciences, 2016, 124, pp. 487-496.
140. Craw D., Lilly K. Gold nugget morphology and geochemical environments of nugget formation, southern New Zealand // Ore Geology Reviews, 2016, V. 79, pp. 301-315.
141. Donna L., Evan W., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // American Mineralogist, 2010, V. 95, pp. 185-187.
142. Dunn S.C., Heyden B.P., Rozendaal A., Taljaard R. Secondary gold mineralization in the Amani Placer Gold Deposit, Tanzania // Ore Geology Reviews, 2019, V. 107, pp. 87-107.
143. Dunn E.J. Geology of Gold (South Africa, Australia, New Zealand) // London, 1929.

144. Emmons S.F. The secondary enrichment of ore deposits // *Trans. A. I. M. E.*, 1935, v. 30.
145. Etschmann B., Brugger J., Fairbrother L., Grosse C., Nies D.H., Martinez-Criado G., Reith F. Applying the Midas touch: Differing toxicity of mobile gold and platinum complexes drives biomineralization in the bacterium *Cupriavidus metallidurans* // *Chemical Geology*, 2016, 438, pp. 103-111.
146. Fairbrother L., Brugger J., Shapter J., Laird J.S., Southam G., Reith F. Supergene gold transformation: Biogenic secondary and nano-particulate gold from arid Australia // *Chemical Geology*, 2012, V. 320-321, pp. 17-31.
147. Falconer D.M., Craw D. Supergene gold mobility: a textural and geochemical study from gold placers in southern New Zealand // *Society of Economic Geologists*, 2009, V. 14, pp. 77-93.
148. Friese F.W. The transportation of gold by organic underground solutions // *Econ. Geol.*, 1931, 26 (4), pp. 421-431.
149. Gustaytis M.A., Myagkaya I.N., Chumbaev A.S. Hg in snow cover and snowmelt waters in high-sulfide tailing regions (Ursk tailing dump site, Kemerovo region, Russia) // *Chemosphere*, 2018, V. 202, pp. 446-459.
150. Hadri H.E., Louie S.M., Hackley V.A. Assessing the interactions of metal nanoparticles in soil and sediment matrices – a quantitative analytical multi-technique approach // *Environ. Sci.: Nano*, 2018, 5, pp. 203-2014.
151. Haiyang Xian, Hongping He, Jianxi Zhu, Runxiang Dua, Xiao Wu, Hongmei Tang, Wei Tan, Xiaoliang Liang, Runliang Zhu, H. Henry Teng Crystal habit-directed gold deposition on pyrite: Surface chemical interpretation of the pyrite morphology indicative of gold enrichment // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 264, pp. 191-204.
152. Hallbauer D.K. The plant origin of the Witwatersrand «carbon» // *Minerals Sci. Eng.*, 1975, V. 7, № 2, pp. 11-132.
153. Heinrich, C.J. Witwatersrand gold deposits formed by volcanic rain, anoxic rivers and Archaean life // *Nat. Geosci.*, 2015, 8, pp. 206-209.

154. Herrera S.P., Uchiyama H., Igarashi T., Asakura K., Ochi Y., Iyatomi N., Nagae S. Treatment of acid mine drainage through a ferrite formation process in central Hokkaido, Japan: evaluation of dissolved silica and aluminium interference in ferrite formation. *Miner. Eng.* 20 (13), 2007, pp. 1255-1260.
155. Hong H., Tie L. Characteristics of the minerals associated with gold in the Shewushan supergene gold deposit, China // *Clays Clay Miner.* 53, 2005, pp. 162-170.
156. Hough R.M., Butt C.R.M., Reddy S.M., Verrall M. Gold nuggets: supergene or hypogene? // *Aust. J. Earth Sci.*, 2007, 54, pp. 959-964.
157. Hough R.M., Noble R.R.P., Reich M. Natural gold nanoparticles // *Ore Geology Reviews*, 2012, 42, pp. 55-61.
158. Hough R.M., Noble R.R.F., Hitchen G.J., Hart R., Reddy S.M., Saunders M., Clode P., Vaughan D., Lowe J., Gray D.J., Anand R.R., Butt C.R.M., Verrall M. Naturally occurring gold nanoparticles and nanoplates // *Geology*, 2008, Vol. 36, pp. 571-574.
159. Hyland M.M., Bancroft G.M. An XPS study of gold deposition at low temperatures on sulphide minerals: reducing agents // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1989, 53, pp. 367-372.
160. Kalinin Y.A., Palyanova G.A., Kovalev K.R., Naumov E.A., Pirajno F. Supergene remobilization of Au in Au-bearing regolith related to orogenic deposits: a case study from Kazakhstan // *Ore Geology Reviews*, 2019, V. 109, pp. 358-369.
161. Karthikeyan S., Beveridge T.J. *Pseudomonas aeruginosa* biofilms react with and precipitate toxic soluble gold // *Environ. Microbiol.*, 2002, 4, p. 667.
162. Kerr G., Craw D. Mineralogy and geochemistry of biologically-mediated gold mobilisation and redeposition in a semiarid climate, southern New Zealand // *Minerals*, 2017, 7, p. 147.
163. Kirillov M.V., Bortnikov S.B., Gaskova O.L., Shevko E.P. Authigenic gold in stale tailings of cyanide leaching of gold-sulfide-quartz ores (Komsomol'skii gold-extracting factory, Kemerovo Region) // *Doklady Earth Sciences*, 2018, 481 (2), pp. 1091-1094.
164. Korobushkina E.D., Karavaiko G.I., Korobushkin I.M. In environmental biogeochemistry // *Ecology Bulletin* 35, ed Hallberg R, 1983, pp. 325-333.

165. Knowles C.J. Microorganisms and cyanide // *Bacteriol. Rev.*, 1976, 40, pp. 652-680.
166. Lalomov A.V., Chefranov R.M., Naumov V.A., Naumova O.B., LeBarge W., Dilly R.A. Typomorphic features of placer gold of Vagran cluster (the northern Urals) and search indicators for primary bedrock gold deposits // *Ore Geol. Rev.*, 2017, V. 85, pp. 321-335.
167. Lazareva E.V., Myagkaya I.N., Kirichenko I.S., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. Interaction of natural organic matter with acid mine drainage: In-situ accumulation of elements // *Science of the Total Environment* 660, 2019, pp. 468-483.
168. Lengke M.F., Southam G. The effect of thiosulfate-oxidizing bacteria on the stability of the gold-thiosulfate complex // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, 69, pp. 3759-3772.
169. Liversidge A. The crystalline structure of gold and platinum nuggets // *J. Chem. Soc.*, 1897, v. 72.
170. Liua X., Jianga T., Xua B., Zhang Y., Lia Q., Yanga Y., He Y. 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*, 2020, V. 151, 12 pp.
171. Mann A.W. Mobility of gold and silver in lateritic weathering profiles: some observations from Western Australia // *Econ. Geol.*, 1984, Vol. 79 (1), pp. 38-49.
172. Marescotti P., Carbone C., Comodi P., Frondini F., Lucchetti G. Mineralogical and chemical evolution of ochreous precipitates from the libiola Fe-Cu-sulfide mine (Eastern Liguria, Italy). *Appl. Geochem.* 27 (3), 2012, pp. 577-589.
173. McDonald D.M., Webb J.A., Musgrave R.J. The effect of neutralization method and reagent on the rate of Cu and Zn release from acid rock drainage treatment sludges // *Proceedings of the 7th ICARD*. St. Louis, Missouri, USA, 2006. pp. 1198-1218.
174. Melchiorre E.B., Orwin P.M., Reith F., Rea D., Yahn J., Allison R. Biological and geochemical development of placer gold deposits at Rich Hill, Arizona, USA // *Minerals*, 2018, Vol. 8(56), 20 p.

175. Mossman D.J., Dyer B.D. The geochemistry of Witwatersrand-type gold deposits and the possible influence of ancient prokaryotic communities on gold dissolution and precipitation // *Precambrian Research*, 1985, V. 30, pp. 303-319.
176. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: Migration in water flow // *Journal of Geochemical Exploration*, 2016a, Vol. 160, pp. 16-30.
177. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 2: Reprecipitation on natural peat // *Journal of Geochemical Exploration*, 165, 2016b, pp. 8-22.
178. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Zaikovskii V.I., Zhmodik S.M. Interaction of natural organic matter with acid mine drainage: Authigenic mineralization (case study of Ursk sulfide tailings, Kemerovo region, Russia) // *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, V. 211.
179. Mycroft J.R., Bancroft G.M., McIntyre N.S., Lorimer J.W. Spontaneous deposition of gold on pyrite from solutions containing Au(III) and Au(I) chlorides. 1. A surface study // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59, pp. 3351-3365.
180. Puddephatt R.J. *The Chemistry of Gold. Topics in Inorganic and General Chemistry: Monograph 16*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1978.
181. Rea M.A., Zammit C.M., Reith F. Bacterial biofilms on gold grains- Implications for geomicrobial transformations of gold FEMS // *Microbiol. Ecol.*, 2016, Article fiw082.
182. Reith F., McPhail D.C. Mobility and microbially mediated mobilization of gold and arsenic in soils from two gold mines in semi-arid and tropical Australia // *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 2006, p. 1421.
183. Reith F., Rea M.A., Sawley P., Zammit C. M., Nolze G., Reith T., Rantanen K., Bissett A. Biogeochemical cycling of gold: Transforming gold particles from arctic Finland // *Chemical Geology*, 2018, V. 483, pp. 511-529.
184. Reith F., Rogers S.L., McPhail D.C., Webb D. Biomineralization of Gold: Biofilms on Bacterioform Gold // *Science*, 2006, V. 313, pp. 233-236.

185. Reith F., Stewart L., Wakelin S.A. Supergene gold transformation: Secondary and nanoparticulate gold from southern New Zealand // *Chemical Geology*, 2012, 320-321, pp. 32-45.
186. Reith F., Rea M.A., Sawley P., Zammit C. M., Nolze G., Reith T., Rantanen K., Bissett A. Biogeochemical cycling of gold: Transforming gold particles from arctic Finland // *Chemical Geology*, 2018, Vol. 483, pp. 511-529.
187. Saryg-ool B. Yu., Myagkaya I.N., Kirichenko I.S., Gustaytis M.A., Shuvaeva O.V., Zhmodik S.M., Lazareva E.V. Redistribution of elements between wastes and organic-bearing material in the dispersion train of gold-bearing sulfide tailings: Part I. Geochemistry and mineralogy // *Science of the Total Environment*, 2017, pp. 581-582.
188. Shuster J., Reith F. Reflecting on Gold Geomicrobiology Research: Thoughts and Considerations for Future Endeavors // *Minerals*, 2018, 8(9):401, 12 pp.
189. Shuster J., Reith F., Cornelis G., Parsons J.E., Parsons J.M., Southam G. Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments // *Chemical Geology*, 2017, V. 450, pp. 154-164.
190. Shuster J., Southam G. The in-vitro “growth” of gold grains // *Geology*, 2015, V. 43, № 1, pp. 79-82.
191. Senanayake G. Gold leaching in non-cyanide lixiviant systems: critical issues on fundamentals and applications // *Minerals Engineering*, 2004, V. 17, I. 6, pp. 785-801.
192. Southam G., Beveridge T.J. The in-vitro formation of placer gold by bacteria // *Geochim. et Cosmochim. Acta.*, 1994, V. 58, pp. 4527-4530.
193. Stewart J., Kerr G., Prior D., Halfpenny A., Pearce M., Hough R., Craw D. Low temperature recrystallisation of alluvial gold in paleoplacer deposits // *Ore Geology Reviews*, 2017, Vol. 88, pp. 43-56.
194. Vlassopoulos D., Wood S.A. Gold speciation in natural waters: I. Solubility and hydrolysis reactions of gold in aqueous solution // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, 54 (1), pp. 3-12.

195. Wang L., Wang H., Ma B. et al. Research on gold extraction from uytenbogaardtite via in situ microzone analysis // *Hydrometallurgy*, 2019, 186, pp. 170-175.
196. Watterson J.R. Preliminary evidence for the involvement of budding bacteria in the origin of Alaskan placer gold: *Geology*, 1992, v. 26, pp. 1147-1151.
197. Webster J.G. The solubility of gold and silver in the system Au-Ag-S-O₂-H₂O at 25°C and 1 atm // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1986, 50, pp. 1837-1845.
198. Williams-Jones A.E., Bowell R.J., Migdisov A.A. Gold in solution // *Elements*, 2009, Vol. 5, pp. 281-287.
199. Wierchowicz J., Mikulski St.Z., Gasiński A. Nanoforms of gold from abandoned placer deposits of Wądroże Wielkie, Lower Silesia, Poland – The evidence of authigenic gold mineralization // *Ore Geology Reviews*, 2018, V. 101, pp. 211-220.
200. Wei X., Wolfe F., Han Y. Mine drainage: characterization, treatment, modeling, and environmental aspect // *Water Environment Research*, Volume 86, Number 10, 2014. pp. 1515-1534.
201. Widler A.M., Seward T.M. The adsorption of gold (I) hydrosulphide complexes by iron sulphide surfaces // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, V. 66, pp. 383-402.
202. Xia C. Associated Sulfide Minerals in Thiosulfate Leaching of Gold: Problems and Solutions. PhD Thesis, Ontario, 2008, 339 p.
203. Yurkevich N., Bortnikova S., Abrosimova N., Makas A., Olenchenko V., Edelev A., Saeva O., Shevko A. Sulfur and Nitrogen Gases in the Vapor Streams from Ore Cyanidation Wastes at a Sharply Continental Climate, Western Siberia, Russia // *Water, Air, and Soil Pollution*, 2019, V. 230, № 12, 17 p.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1.

Сводная таблица данных химического состава золота
(результаты микрозондового анализа).

№ п/п	Объект	Au	Ag	Hg	Cu	Пробность Au, ‰	Сумма
1	ТМО Ново- Урского месторождения	87.15	11.25	1.45	-	873	99.84
2		76.43	19.97	3.49	-	765	99.89
3		82.39	16.49	2.59	-	812	101.47
4		87.39	12.68	1.71	-	859	101.78
5		86.27	12.75	1.47	-	858	100.49
6		84.41	13.96	1.92	-	842	100.29
7		87.78	10.92	1.36	-	877	100.06
8		83.16	15.02	2.55	-	826	100.73
9		80.51	16.35	2.77	-	808	99.63
10		87.42	11.16	1.59	-	874	100.08
11		87.37	11.62	2.79	-	869	100.58
12		80.98	16.88	2.33	-	804	100.66
13		83.65	13.94	3.91	-	837	99.92
14		77.16	18.26	1.34	-	777	99.34
15		87.22	10.65	1.32	-	879	99.21
16		86.56	10.64	1.92	-	879	98.52
17		85.43	12.33	1.92	-	857	99.68
18		84.82	13.29	2.14	-	846	100.25
19		82.09	14.05	2.12	-	835	98.26
20		83.49	14.64	2.80	-	827	100.93
21		73.98	24.06	0.80	-	748	98.84
22		73.18	25.07	1.06	-	737	99.31
23		72.79	24.74	1.01	-	739	98.54
24		72.82	25.16	1.04	-	735	99.02
25		89.92	8.64	0.29	-	910	98.85
26		91.06	8.21	0.15	-	916	99.42
27		90.96	8.56	0.27	-	912	99.79
28		90.66	8.88	0.27	-	908	99.81
29		86.62	11.60	1.28	-	871	99.50
30		85.14	12.81	1.63	-	855	99.58
31		87.05	11.09	1.31	-	875	99.45
32		82.89	14.13	2.02	-	837	99.04
33		79.29	17.34	3.01	-	796	99.64
34		84.83	12.42	1.53	-	859	98.78
35		86.42	11.15	1.20	-	875	98.77
36		86.69	11.89	1.04	-	870	99.62
37	ТМО Белоключевского месторождения	86.50	12.86	0.43	0.01	867	99.80
38		85.21	13.52	0.18	0.03	861	98.94
39		86.82	11.46	0.41	0.14	878	98.83
40		82.57	15.69	0.38	-	851	98.64

№ п/п	Объект	Au	Ag	Hg	Cu	Пробность Au, ‰	Сумма
41		84.75	14.64	0.06	0.09	852	99.53
42		84.44	14.91	0.34	0.02	847	99.71
43		90.13	9.72	0.34	0.22	898	100.41
44		85.98	12.94	0.22	0.02	867	99.16
45		88.79	9.56	0.22	0.20	899	98.77
46		86.80	11.80	0.16	0.18	877	98.95
47		88.94	10.26	0.24	0.30	891	99.74
48		86.73	12.58	0.11	0.06	872	99.48
49		86.91	11.26	0.25	0.09	882	98.51
50		87.64	11.02	0.26	0.14	885	99.06
51	ТМО Змеиногорского месторождения	43.43	57.26	0.52	-	429	101.21
52		0.00	100.69	0.02	0.02	0	100.71
53		39.45	58.50	0.59	-	400	98.54
54		46.86	52.54	0.33	-	470	99.73
55		46.31	52.20	0.40	-	468	98.91
56		62.19	36.51	0.20	-	629	98.9
57		62.35	35.92	0.16	0.02	633	98.43
58		61.98	36.90	0.22	-	625	99.1
59		62.69	35.80	0.07	-	636	98.56
60		60.88	37.12	0.98	-	615	98.98
61		56.15	42.40	0.53	-	567	99.08
62		60.62	39.09	0.15	-	607	99.86
63		60.72	37.51	0.58	0.00	615	98.81
64		65.24	32.52	1.10	-	660	98.86
65		64.42	32.76	1.70	-	651	98.88
66		65.94	32.91	0.12	-	666	98.97
67		62.24	34.16	3.10	-	626	99.5
68		64.03	32.87	2.16	-	646	99.06
69		63.73	35.34	0.16	-	642	99.23
70		62.73	35.68	0.35	-	635	98.76
71		64.90	33.46	0.50	-	656	98.86
72		64.83	32.48	1.65	-	655	98.96
73		66.64	32.29	0.91	-	667	99.84
74		63.84	33.42	1.43	-	647	98.69
75		63.87	33.42	1.56	-	646	98.85
76		71.21	26.21	1.05	-	723	98.47
77		71.96	26.84	1.02	-	721	99.82
78		73.26	27.19	-	-	729	100.44
79		70.35	28.01	0.40	-	712	98.76
80		41.31	49.79	8.10	-	416	99.2
81		85.37	13.11	1.47	-	854	99.95
82		93.67	6.37	-	-	936	100.04
83		89.35	6.59	2.76	-	905	98.7
84		95.24	3.59	0.76	-	956	99.59
85		94.00	2.60	1.99	-	953	98.59
86		59.56	37.31	2.24	-	601	99.11
87		73.59	24.05	1.00	-	746	98.64
88		76.14	22.23	1.00	-	766	99.37

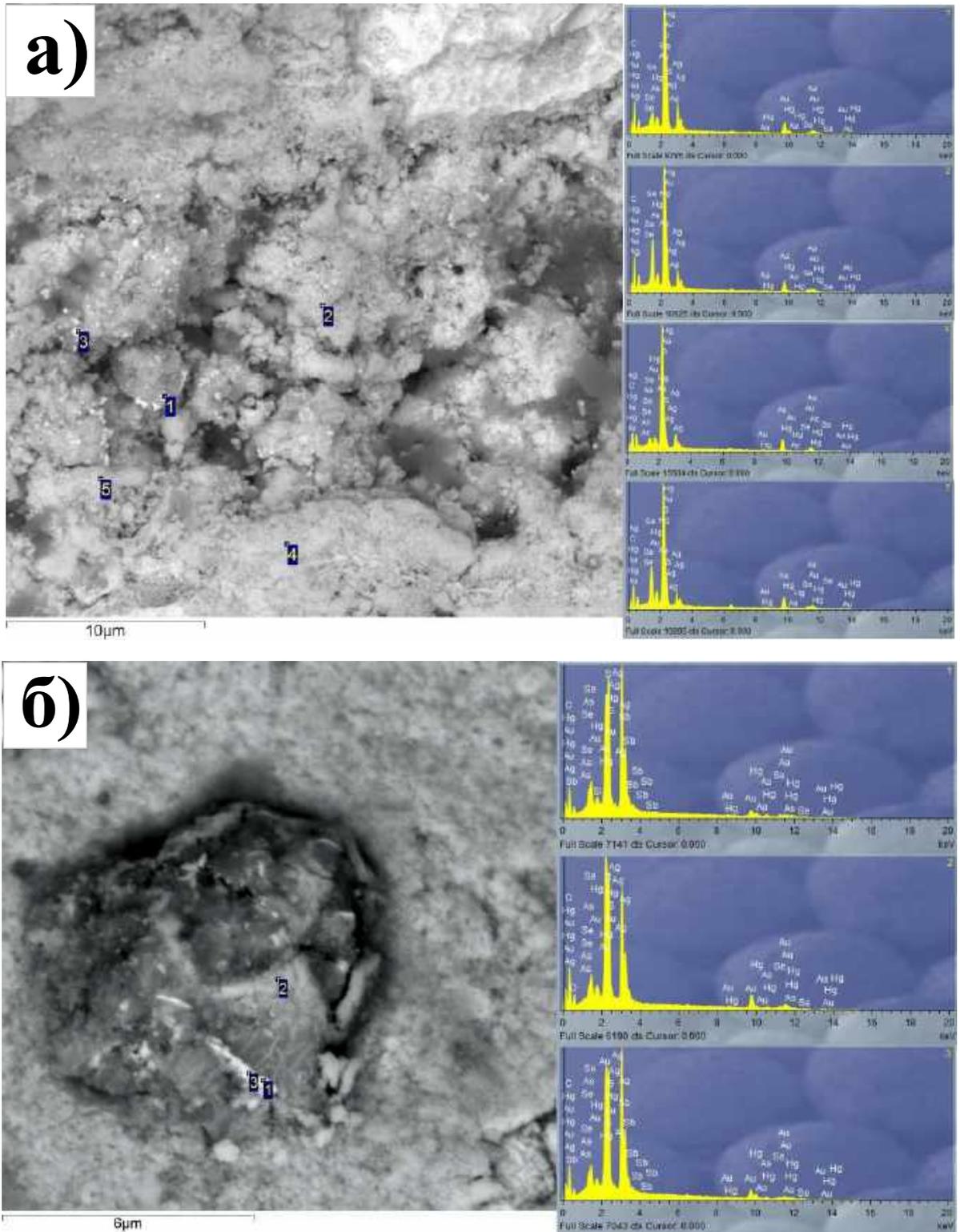
№ п/п	Объект	Au	Ag	Hg	Cu	Пробность Au, ‰	Сумма
89		76.77	22.59	-	-	773	99.36
90		74.67	23.20	1.99	-	748	99.86
91		74.50	25.10	0.03	-	748	99.63
92		75.04	25.22	-	-	748	100.26
93		48.79	52.76	0.42	-	478	101.97
94		84.84	13.39	1.40	-	852	99.63
95		57.42	42.98	0.62	-	568	101.02
96		72.64	27.27	-	-	727	99.91
97		49.11	49.39	1.94	-	489	100.44
98		76.39	24.63	-	-	756	101.02
99		37.70	58.54	2.79	0.01	381	99.03
100		57.18	38.72	3.20	0.02	577	99.13
101		38.41	57.49	3.09	0.01	388	99.00
102		44.40	47.93	8.03	-	442	100.37
103		52.60	41.21	5.85	-	528	99.66
104		29.05	67.21	4.73	-	288	101.00
105		31.49	65.53	4.16	-	311	101.18
106		29.15	66.12	4.14	-	293	99.41
107		29.00	67.61	4.71	-	286	101.32
108		50.62	43.03	6.66	-	505	100.31
109		61.02	39.10	0.34	0.01	607	100.47
110		58.16	41.94	0.49	0.01	578	100.61
111		60.43	39.43	0.33	0.01	603	100.19
112		60.19	40.36	0.34	0.01	597	100.90
113		58.77	40.60	0.42	0.02	589	99.81
114		57.31	42.26	0.45	-	573	100.02
115		60.87	38.12	0.26	0.00	613	99.25
116		60.48	40.34	0.39	0.01	598	101.22
117	Змеиногорск – рудное золото	26.70	70.11	2.58	-	269	99.39
118		28.88	69.40	2.82	-	286	101.11
119		35.25	62.45	3.37	-	349	101.07
120		25.47	72.27	2.80	-	253	100.54
121		26.66	69.04	5.14	0.00	264	100.84
122		57.74	41.82	0.50	0.00	578	99.86
123		22.75	75.60	1.71	-	227	100.06
124		34.13	63.57	1.49	-	344	99.19
125		37.01	61.67	2.34	0.05	366	101.07
126		31.32	65.51	3.30	0.01	313	100.14
127		68.83	32.22	0.08	0.00	681	101.14
128		70.05	29.77	0.04	-	702	99.85
129		67.39	31.88	0.07	0.01	678	99.36
130		67.14	31.76	0.07	-	678	98.97
131		72.09	27.15	0.33	0.00	724	99.56
132		72.60	26.67	0.08	-	731	99.35
133		65.97	32.93	1.27	0.00	659	100.17
134		71.92	27.31	0.24	-	723	99.46
135		71.45	27.93	0.72	-	714	100.09
136		76.11	24.61	0.08	-	755	100.80

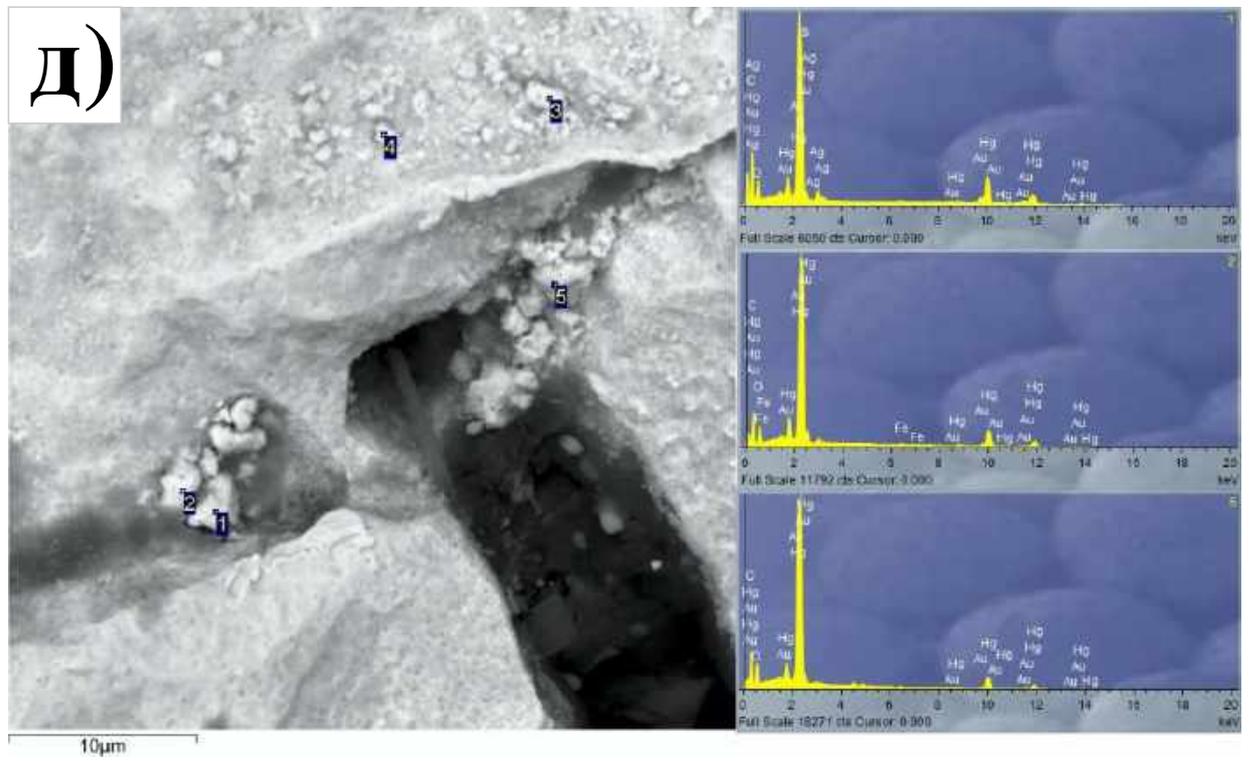
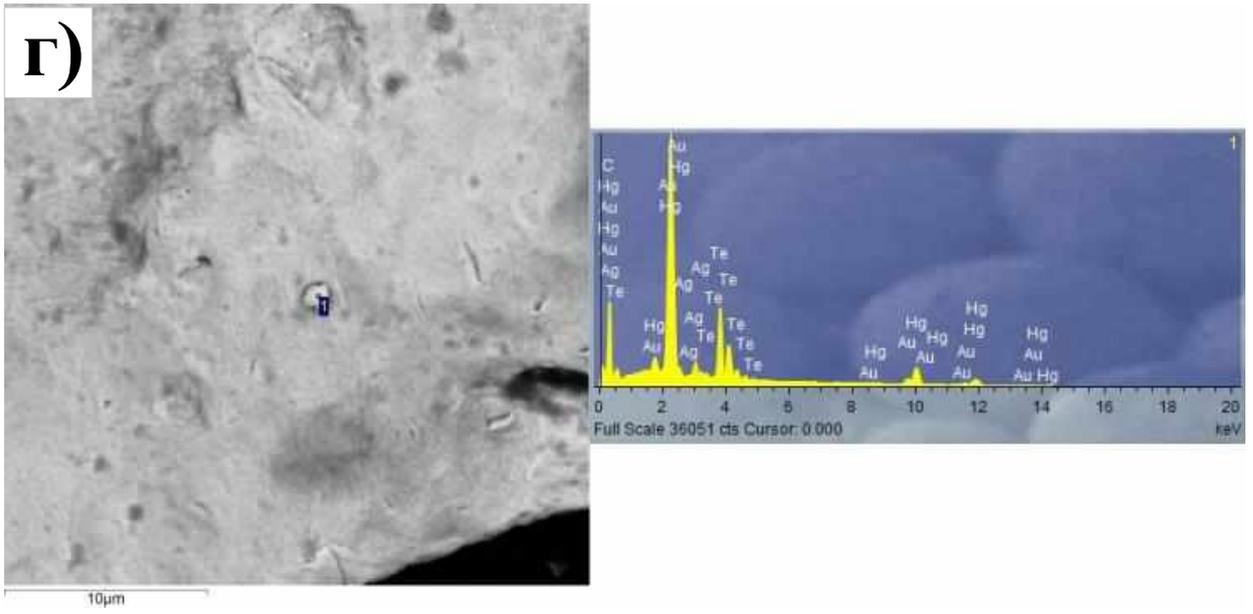
№ п/п	Объект	Au	Ag	Hg	Cu	Пробность Au, ‰	Сумма
137		72.84	26.88	0.33	0.00	728	100.09
138		73.33	25.66	0.25	-	739	99.24
139		62.27	37.66	1.52	-	614	101.45
140		74.63	24.42	0.09	0.01	753	99.16
141		75.32	24.54	0.07	0.01	754	99.94
142		71.43	27.63	0.44	0.01	718	99.50
143		74.89	24.43	0.16	-	753	99.47
144		72.00	26.98	0.43	-	724	99.41
145		73.69	25.57	0.29	-	740	99.55
146		68.19	29.41	0.11	-	698	97.71
147		65.35	34.39	0.18	-	654	99.92
148		70.15	30.61	0.08	-	696	100.84
149		69.40	30.61	0.10	0.01	693	100.12
150		68.32	31.83	-	0.01	682	100.15
151		69.67	29.85	0.08	-	699	99.60
152		71.43	26.63	0.07	0.01	728	98.14
153		67.47	31.52	0.48	-	678	99.48
154		49.23	48.61	1.79	-	494	99.63
155		71.45	28.16	0.07	0.01	717	99.68
156		69.06	30.46	0.09	0.02	693	99.62
157		70.83	27.98	0.03	-	717	98.84
158		67.87	31.54	0.07	0.02	683	99.41
159		66.83	31.67	0.04	0.00	678	98.54
160		68.71	30.62	0.09	-	691	99.42
161		68.05	31.90	0.11	-	680	100.06
162		69.39	30.52	0.09	-	694	100.00
163		67.67	32.21	0.09	0.00	677	99.97
164		67.39	32.56	0.15	-	673	100.10
165		71.60	27.66	0.14	0.00	720	99.40
166		71.60	27.40	0.09	0.01	723	99.10
167		38.84	54.90	5.53	-	391	99.26
168		41.46	55.14	3.53	-	414	100.13
169		74.85	24.27	0.06	-	755	99.19
170		75.77	23.40	0.06	0.00	764	99.24
171		75.80	23.94	0.08	-	765	99.09
172		78.97	20.46	0.24	0.01	792	99.68
173		79.32	20.81	0.12	-	791	100.25
174		77.39	21.21	0.59	0.00	780	99.19
175		79.34	20.70	0.12	-	792	100.16
176		79.10	20.73	0.10	0.01	791	99.94
177		77.91	20.70	0.21	-	788	98.82
178		78.64	20.98	0.24	-	788	99.86
179	Змеиногорск – золото из зоны окисления	41.54	56.05	1.57	0.01	419	99.23
180		35.41	61.95	1.11	0.01	359	98.59
181		30.59	68.75	2.21	-	301	101.55
182		55.38	44.22	0.66	0.01	552	100.26
183		56.63	42.51	0.63	0.00	568	99.77
184		40.85	56.74	1.71	-	411	99.36

№ п/п	Объект	Au	Ag	Hg	Cu	Пробность Au, ‰	Сумма
185		36.05	61.18	2.36	0.02	362	99.61
186		39.67	59.34	2.04	-	393	101.05
187		48.25	50.30	1.23	-	484	99.79
188		47.94	50.59	1.77	0.14	477	100.44
189		36.18	58.81	3.01	1.22	365	99.22
190		38.24	59.80	3.24	0.04	377	101.32
191		54.92	43.26	0.80	0.18	554	99.15
192		47.02	51.48	1.68	0.07	469	100.24
193		32.26	63.71	3.40	0.44	323	99.82
194		55.43	42.72	0.67	-	561	98.81
195		52.35	47.02	0.93	-	522	100.30
196		55.24	43.89	0.77	-	553	99.90
197		55.45	42.82	0.64	-	561	98.91
198		35.05	62.52	2.76	-	349	100.33
199		33.74	62.42	3.22	-	340	99.38
200		36.30	59.46	2.91	-	368	98.67
201		41.99	55.15	2.40	-	422	99.54
202		35.06	61.17	2.45	-	355	98.68
203		36.02	62.72	2.32	-	356	101.06
204		37.49	59.09	2.09	-	380	98.67
205		57.20	41.91	0.61	0.01	574	99.72
206		47.46	50.25	1.19	0.03	480	98.92
207		37.67	58.80		-	379	99.38
208		54.41	44.54	0.77	0.43	543	100.14
209	ТМО	94.61	4.63	0.02	0.25	951	99.51
210	месторождения	94.33	4.41	0.01	0.28	953	99.03
211	Даубай	95.30	4.49	-	0.22	953	100.01
212		84.58	14.15	1.53	-	844	100.26
213		84.25	14.28	1.68	-	841	100.22
214		83.48	14.01	1.79	-	841	99.29
215		83.43	14.25	1.59	-	840	99.27
216		84.20	14.30	1.59	-	841	100.09
217		88.50	11.61	1.84	-	872	101.51
218		88.03	11.70	1.88	-	866	101.62
219		85.84	11.59	1.62	-	867	99.05
220		86.51	11.89	1.52	-	866	99.91
221	Даубай – рудное	85.90	12.02	1.65	-	863	99.57
222	золото	89.38	9.57	0.93	-	894	99.88
223		89.48	10.44	0.68	-	889	100.6
224		88.85	10.24	0.80	-	889	99.90
225		88.06	9.44	1.94	-	886	99.43
226		89.45	9.51	1.87	-	887	100.83
227		88.51	9.49	1.7	-	888	99.70
228		87.05	9.52	1.94	-	884	98.51
229		89.25	9.74	1.93	-	884	100.92
230		84.52	12.69	2.82	-	875	100.04
231		84.45	12.78	2.75	-	845	99.98

№ п/п	Объект	Au	Ag	Hg	Cu	Пробность Au, ‰	Сумма
232		99.87	1.43	0.03	-	985	101.34
233	ТМО месторождения Акжал	99.74	-	0.05	-	998	99.89
234		100.11	-	0.05	-	999	100.15
235		77.83	20.69	0.13	-	789	98.65
236		78.40	20.32	0.12	-	793	98.84
237		78.50	21.00	0.05	-	789	99.55
238		78.65	20.97	0.08	-	787	99.90

Рисунок 17. Гипергенные новообразования на поверхности золота из отвала ТМО Ново-Урского месторождения (с отмечанными точками измерений и их спектрами).





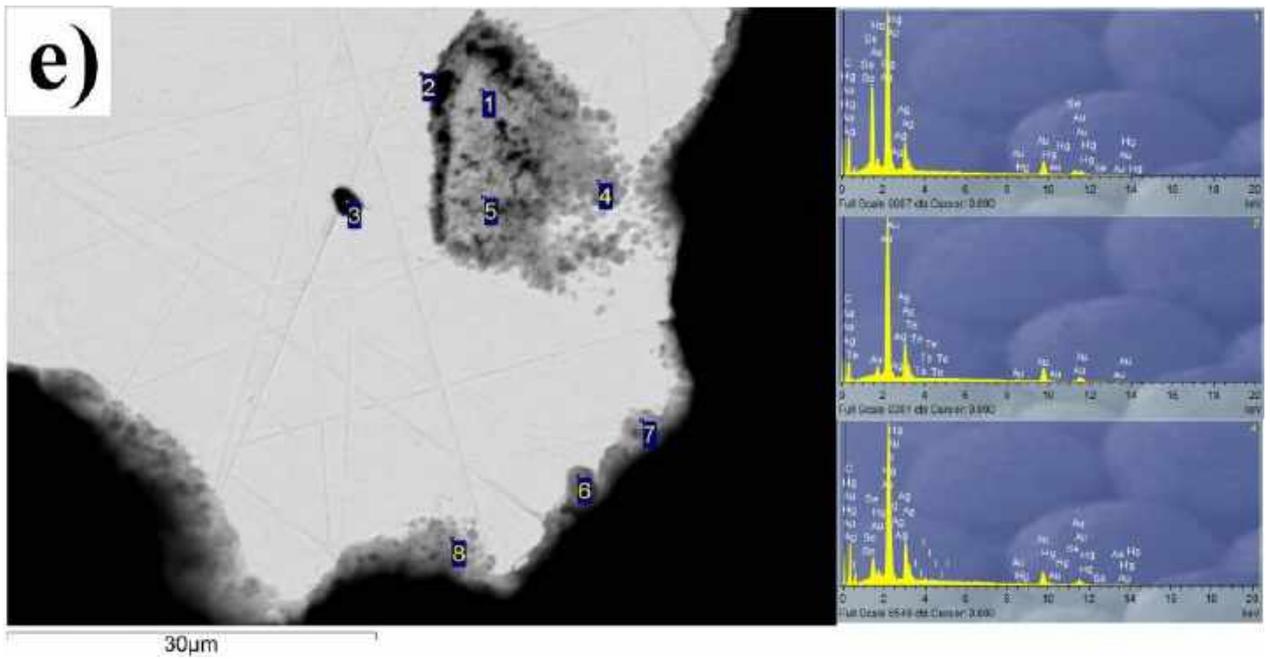


Таблица 2.

*Химический состав гиперенных новообразований**

Spectrum Label	S	Fe	As	Se	Ag	Au	Hg	Total
17a-1	6,03			2,49	18,67	58,69	14,12	100
17a-2				14,11	14,71	62,02	9,16	100
17a-3	5,88		1,49	2,32	12,97	73,32	4,02	100
17a-4	4,35	1,54		7,35	5,9	75,49	5,36	100
17a-5	6,19			10,93	10,96	66,18	5,74	100
Spectrum Label	S	As	Se	Ag	Sb	Au	Hg	Total
17б-1	10,88	3	4,4	47,83	1,6	18,42	13,45	100
17б-2	10,45	1,61	3,37	34,64		35,98	7,44	100
17б-3	9,31	2,63	3,77	45,78	1,32	23,7	13,49	100
Spectrum Label				Se	Ag	Au	Hg	Total
17в				24,34	46,97	28,69		100
Spectrum Label				Ag	Te	Au	Hg	Total
17г-1				4,76	28,86	12,74	47,6	93,96
Spectrum Label		O	S	Fe	Ag	Au	Hg	Total
17д-1		12,51	8,84		6,09	19,98	52,58	100
17д-2		12,63		0,57		8,56	78,24	100
17д-3		7,44				11,27	81,28	100
17д-4		10,54				12,9	76,56	100
17д-5		15,19				6,86	77,95	100
Spectrum Label	S	Se	Ag	Te	I	Au	Hg	Total
17е-1		19,24	16,48			61,11	3,17	100
17е-2			26,14	0,65		73,21		100
17е-4	3,86	4,89	22,61		2,48	59,17	7	100
17е-5		17,21	16,02			62,6	4,16	100
17е-6	4,15	2,8	13,11			76,82		100
17е-7			17,65			82,35		100

* - для иллюстрации (рис.17)

Типоморфные характеристики золота из ТМО Урского рудного поля

<i>Объекты</i>		<i>Ново-Урское</i>				<i>Белоключевское</i>			
<i>Параметры</i>		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 петровскаиту, 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 заполненные 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.			

Типоморфные характеристики золота Змеиногорского рудного поля

Объекты		Техногенные отложения (ТМО)				Первичные руды				Окисленные руды			
Параметры		Техногенные отложения (ТМО)				Первичные руды				Окисленные руды			
Содержание, г/т (среднее)		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			
Грануло- метрия	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 (микрозондовый 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. %.				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. %.			

<i>Объекты</i> <i>Параметры</i>	<i>Техногенные отложения (ТМО)</i>	<i>Первичные руды</i>	<i>Окисленные руды</i>
		3. В гидроксидных пленках – включения золота до 100 мас. %.	
Внутреннее строение (микроструктуры Au)	1. <i>Блоковое (мозаичное) строение (12%)</i> ; 2. <i>Однородный состав (88%)</i> ; 3. Каемки и прожилки мощностью до 10 мкм; 4. Сrostки гидроксидами Mn, Fe, баритом, мусковитом, включения кварца.	1. <i>Блоковое (мозаичное) строение (40 %)</i> ; 2. <i>Однородный состав (60 %)</i> . 3. Включения барита, кварца, бромаргентина, акантина, фенакита, аргиродита, титанита, сrostки со сфалеритом, гидроксидами Mn, Fe.	1. <i>Блоковое (мозаичное) строение (90 %)</i> , где между частями есть прожилки более высокопробного золота (~ 80-90 мас. %). 2. <i>Однородный состав (10 %)</i> . 3. Включения галенита, кальцита, сrostки и включения в золоте с платтнеритом.

Результаты моделирования растворения пирита

Temperature,C	25									
Total pressure,bar	1									
Fugacity of p.m.c.										
Oxygen,gas	-70	(lg p)	-68	(lg p)	-65	(lg p)	-55	(lg p)	-30	(lg p)
ОБЩИЙ СОСТАВ СИСТЕМЫ										
H ₂ O	1,00E+00	kg	1,00E+00	kg	1,00E+00	kg	1,00E+00	kg	1,00E+00	kg
Au	1,00E-02	mg	1,00E-02	mg	1,00E-02	mg	1,00E-02	mg	1,00E-02	mg
FeS ₂	1,00E-02	mol	1,00E-02	mol	1,00E-02	mol	1,00E-02	mol	1,00E-02	mol
===== Индивидуальные фазы =====										
Gold	5,08E-08	0,00%	5,08E-08	0,00%	5,08E-08	0,00%	5,08E-08	100,00%	5,08E-08	0,00%
Pyrite	1,00E-02	100,00%	1,00E-02	100,00%	9,94E-03	100,00%				
Goethite									5,68E-03	100,00%
Total	1,00E-02	(mol)	1,00E-02	(mol)	9,94E-03	(mol)	5,08E-08	(mol)	5,68E-03	(mol)
Общий состав, (моль)										
Au	1,00E-02	(mg)	1,00E-02	(mg)	1,00E-02	(mg)	1,00E-02	(mg)	1,00E-02	(mg)
Fe	5,58E+02	(mg)	5,58E+02	(mg)	5,55E+02	(mg)	0	(mg)	3,17E+02	(mg)
H	0	(mg)	0	(mg)	0	(mg)	0	(mg)	5,72E+00	(mg)
O	0	(mg)	0	(mg)	0	(mg)	0	(mg)	1,82E+02	(mg)
S	6,41E+02	(mg)	6,41E+02	(mg)	6,38E+02	(mg)	0	(mg)	0	(mg)
Total	1,20E+03	(mg)	1,20E+03	(mg)	1,19E+03	(mg)	1,00E-02	(mg)	5,05E+02	(mg)
Формы нахождения в растворе, (моль/л)					*каждый второй столбец - коэффициент активности частицы в растворе					
H ₂ O	1,00E+00	1	1,00E+00	1	1,00E+00	1	9,99E-01	1	9,99E-01	1
H ⁺	9,35E-08	0,99948	8,66E-07	0,99795	1,17E-04	0,97783	1,37E-02	0,85985	2,08E-02	0,86728
OH ⁻	1,08E-07	0,99948	1,17E-08	0,99794	9,05E-11	0,97705	1,05E-12	0,81937	6,73E-13	0,83185
O ₂	1,26E-73	1	1,26E-71	1	1,26E-68	0,99999	1,26E-58	0,99926	1,26E-33	0,99923
H ₂	2,24E-10	1	2,24E-11	1	7,07E-13	0,99999	7,07E-18	0,99926	2,24E-30	0,99923

H2S	2,47E-08	1	1,90E-08	1	4,08E-08	0,99999	2,02E-22	0,99926	4,18E-72	0,99923
HS-	2,72E-08	0,99948	2,26E-09	0,99794	3,75E-11	0,97705	2,15E-27	0,81937	2,85E-77	0,83185
S2--	4,79E-19	0,99792	3,32E-20	0,99179	3,01E-22	0,91175	1,37E-49	0,46557	0	0
S2O3--	1,45E-18	0,99792	1,00E-16	0,99179	2,88E-14	0,91175	1,31E-26	0,46557	2,24E-76	0,49266
SO2	5,28E-24	1	4,06E-21	1	2,76E-16	0,99999	1,37E-15	0,99926	8,94E-28	0,99923
SO3--	6,45E-19	0,99792	5,83E-18	0,99179	2,46E-17	0,91175	2,25E-20	0,46557	5,90E-33	0,49266
HSO3-	9,66E-19	0,99948	8,04E-17	0,99794	4,21E-14	0,97712	2,41E-15	0,82397	1,01E-27	0,83581
SO4--	9,66E-09	0,99792	8,73E-07	0,99179	1,16E-04	0,91148	1,09E-02	0,45582	9,00E-03	0,48384
HSO4-	8,03E-14	0,99948	6,68E-11	0,99794	1,11E-06	0,97719	6,30E-03	0,82834	8,36E-03	0,8396
Au+	4,53E-33	0,99948	1,33E-31	0,99794	1,01E-28	0,97719	3,88E-24	0,82834	1,04E-17	0,8396
AuOH	1,63E-21	1	5,14E-21	1	2,89E-20	0,99999	9,15E-18	0,99926	1,63E-11	0,99923
Au(OH)2-	1,04E-21	0,99948	3,56E-22	0,99794	1,54E-23	0,97719	5,58E-23	0,82834	6,38E-17	0,8396
AuHS	3,31E-16	1	8,04E-16	1	9,73E-15	0,99999	1,53E-26	0,99926	5,60E-70	0,99923
Au(HS)2-	9,64E-16	0,99948	1,95E-16	0,99794	3,91E-17	0,97719	3,48E-45	0,82834	0	0
Au2(HS)2S--	5,81E-21	0,99792	3,10E-22	0,99179	6,04E-24	0,91175	1,36E-65	0,46557	0	0
Au+++	6,20E-88	0,99533	1,57E-83	0,98162	7,87E-75	0,81228	1,24E-60	0,17822	2,21E-41	0,20262
Fe++	3,07E-08	0,99792	4,47E-07	0,9918	5,83E-05	0,91256	7,20E-03	0,49298	1,67E-03	0,51753
FeOH+	1,05E-10	0,99948	1,65E-10	0,99794	1,52E-10	0,97719	1,16E-10	0,82834	1,82E-11	0,8396
Fe(OH)2	9,03E-15	1	1,53E-15	1	1,04E-17	0,99999	6,59E-20	0,99926	6,80E-21	0,99923
Fe(OH)3-	3,24E-20	0,99948	5,95E-22	0,99794	3,13E-26	0,97719	2,26E-30	0,82834	1,50E-31	0,8396
FeSO4	4,67E-14	1	6,08E-11	1	8,94E-07	0,99999	2,80E-03	0,99926	5,96E-04	0,99923
Fe+++	5,25E-25	0,99533	2,26E-22	0,98162	2,44E-17	0,81228	2,41E-10	0,17822	1,41E-04	0,20262
FeOH++	3,66E-20	0,99792	1,69E-18	0,99179	1,24E-15	0,91175	5,12E-11	0,46557	2,09E-05	0,49266
Fe(OH)2+	1,31E-16	0,99948	6,52E-16	0,99794	3,39E-15	0,97719	8,20E-13	0,82834	2,28E-07	0,8396
Fe(OH)3	8,38E-14	1	4,49E-14	1	1,72E-15	0,99999	3,44E-15	0,99926	6,31E-10	0,99923
Fe(OH)4-	1,81E-18	0,99948	1,05E-19	0,99794	3,11E-23	0,97719	7,11E-25	0,82834	8,39E-20	0,8396
FeSO4+	5,51E-29	0,99948	2,10E-24	0,99794	2,35E-17	0,97719	2,82E-09	0,82834	1,62E-03	0,8396
Fe(SO4)2-	1,16E-35	0,99948	3,98E-29	0,99794	5,45E-20	0,97719	3,07E-10	0,82834	1,54E-04	0,8396
FeHSO4++	1,27E-35	0,99792	4,49E-30	0,99179	7,10E-21	0,91175	1,45E-10	0,46557	1,23E-04	0,49266
Au(SO3)-	6,96E-24	0,99948	1,83E-21	0,99794	5,40E-18	0,97719	9,72E-17	0,82834	7,25E-23	0,8396

Au(S2O3)-	1,69E-25	0,99948	3,42E-22	0,99794	6,86E-17	0,97719	6,12E-25	0,82834	2,98E-68	0,8396
Au(S2O3)2---	1,13E-27	0,99533	1,59E-22	0,98162	9,96E-15	0,81228	7,98E-35	0,17822	0	0
Au(S2O3)SO3---	6,32E-27	0,99533	1,16E-22	0,98162	1,07E-16	0,81228	1,73E-27	0,17822	2,08E-83	0,20262
AuS2O3(SO3)2-5	6,61E-28	0,98709	1,12E-22	0,94977	5,57E-16	0,56125	6,30E-29	0,00825	1,67E-97	0,0118
Au(OH)3	6,11E-60	1	1,93E-58	1	3,44E-56	0,99999	1,09E-48	0,99926	6,11E-30	0,99923
Au(OH)4-	1,87E-64	0,99948	6,40E-64	0,99794	8,77E-64	0,97719	3,18E-58	0,82834	1,15E-39	0,8396
I	0		0		0		0,046		0,038	
pH	7,029		6,063		3,941		1,929		1,743	
Eh	-0,222		-0,136		0,034		0,301		0,682	
Состав раствора (мг/л)										
Water	1,00E+06	(mg)	1,00E+06	(mg)	1,00E+06	(mg)	1,00E+06	(mg)	1,00E+06	(mg)
Au	2,55E-10	(mg)	1,97E-10	(mg)	4,03E-09	(mg)	2,09E-11	(mg)	3,20E-06	(mg)
Fe	1,72E-03	(mg)	2,50E-02	(mg)	3,31E+00	(mg)	5,58E+02	(mg)	2,41E+02	(mg)
H	2,81E-04	(mg)	9,26E-04	(mg)	1,19E-01	(mg)	2,02E+01	(mg)	2,96E+01	(mg)
O	2,35E-03	(mg)	5,61E-02	(mg)	7,57E+00	(mg)	1,28E+03	(mg)	1,28E+03	(mg)
S	1,97E-03	(mg)	2,87E-02	(mg)	3,80E+00	(mg)	6,41E+02	(mg)	6,41E+02	(mg)

Результаты моделирования растворения ассоциации пирита с элементарной серой

Temperature,C	25									
Total pressure,bar	1									
Fugacity of p.m.c.										
Oxygen,gas	-70	(lg p)	-68	(lg p)	-67	(lg p)	-65	(lg p)	-63	(lg p)
ОБЩИЙ СОСТАВ СИСТЕМЫ										
H ₂ O	1,00E+00	kg								
Au	1,00E+01	mg	1,00E+01	mg	1,00E+01	mg	1,00E+01	mg	1,00E+03	mg
NaCl	1,00E+01	mg								
FeS ₂	1,00E-01	mol								
Sulphur	1,00E-01	mol								
===== Индивидуальные фазы =====										
Sulphur	7,78E-02	17,20%	9,78E-02	20,70%	9,92E-02	20,94%	9,88E-02	20,89%	7,77E-02	16,31%
Gold	4,92E-05	0,07%	5,06E-05	0,07%	5,00E-05	0,07%	2,24E-05	0,03%	4,00E-03	5,16%
Pyrite	1,00E-01	82,73%	1,00E-01	79,23%	1,00E-01	78,99%	1,00E-01	79,09%	1,00E-01	78,54%
Total	1,78E-01	(mol)	1,98E-01	(mol)	1,99E-01	(mol)	1,99E-01	(mol)	1,82E-01	(mol)
Общий состав, (моль)										
Au	4,92E-05	(mol)	5,06E-05	(mol)	5,00E-05	(mol)	2,24E-05	(mol)	4,00E-03	(mol)
Fe	1,00E-01	(mol)								
S	2,78E-01	(mol)	2,98E-01	(mol)	2,99E-01	(mol)	2,99E-01	(mol)	2,78E-01	(mol)
Total	3,78E-01	(mol)	3,98E-01	(mol)	3,99E-01	(mol)	3,99E-01	(mol)	3,82E-01	(mol)
Формы нахождения в растворе, (моль/л)										
H ₂ O	1,00E+00	1	1,00E+00	1	1,00E+00	1	1,00E+00	1	9,99E-01	1
H ⁺	4,94E-05	0,98301	5,69E-05	0,9822	1,78E-04	0,97707	1,97E-03	0,94545	2,92E-02	0,86452
OH ⁻	2,12E-10	0,98257	1,85E-10	0,9817	5,96E-11	0,97623	5,78E-12	0,94042	4,85E-13	0,82735
O ₂	1,26E-73	0,99959	1,26E-71	0,99995	1,26E-70	0,99998	1,26E-68	0,99994	1,26E-66	0,99912
H ₂	2,24E-10	0,99959	2,24E-11	0,99995	7,07E-12	0,99998	7,07E-13	0,99994	7,07E-14	0,99912
H ₂ S	2,22E-02	0,99959	2,22E-03	0,99995	7,01E-04	0,99998	7,01E-05	0,99994	7,01E-06	0,99912

HS-	4,78E-05	0,98257	4,16E-06	0,9817	4,25E-07	0,97623	4,12E-09	0,94042	3,45E-11	0,82735
S2--	1,53E-12	0,93347	1,16E-13	0,92921	3,87E-15	0,90879	3,91E-18	0,78484	3,46E-21	0,48292
S2O3--	4,62E-12	0,93347	3,50E-10	0,92921	3,70E-10	0,90879	3,74E-10	0,78484	3,31E-10	0,48292
SO2	4,75E-18	0,99959	4,75E-16	0,99995	4,75E-15	0,99998	4,75E-13	0,99994	4,75E-11	0,99912
SO3--	2,29E-18	0,93347	1,74E-16	0,92921	1,84E-16	0,90879	1,86E-16	0,78484	1,64E-16	0,48292
HSO3-	1,70E-15	0,98261	1,48E-13	0,98175	4,77E-13	0,97631	4,63E-12	0,94091	3,86E-11	0,83153
SO4--	3,44E-08	0,93332	2,61E-05	0,92903	8,70E-05	0,9085	8,81E-04	0,78322	7,93E-03	0,47377
HSO4-	1,41E-10	0,98265	1,23E-07	0,98179	1,26E-06	0,97639	1,22E-04	0,9414	1,01E-02	0,83552
Cl-	1,71E-04	0,98253	1,71E-04	0,98166	1,71E-04	0,97615	1,71E-04	0,93991	1,71E-04	0,82296
HCl	9,60E-10	0,99959	1,10E-09	0,99995	3,42E-09	0,99998	3,52E-08	0,99994	4,17E-07	0,99912
Na+	1,71E-04	0,98261	1,71E-04	0,98175	1,71E-04	0,97631	1,71E-04	0,94091	1,68E-04	0,83153
NaOH	2,21E-14	0,99959	1,92E-14	0,99995	6,13E-15	0,99998	5,51E-16	0,99994	3,54E-17	0,99912
NaSO4-	2,75E-11	0,98265	2,08E-08	0,98179	6,77E-08	0,97639	5,89E-07	0,9414	3,15E-06	0,83552
NaCl	7,98E-11	0,99959	7,95E-11	0,99995	7,86E-11	0,99998	7,27E-11	0,99994	5,54E-11	0,99912
Au+	2,40E-30	0,98265	8,72E-30	0,98179	4,86E-29	0,97639	1,70E-27	0,9414	8,23E-26	0,83552
AuOH	1,63E-21	0,99959	5,14E-21	0,99995	9,14E-21	0,99998	2,89E-20	0,99994	9,15E-20	0,99912
Au(OH)2-	2,03E-24	0,98265	5,59E-24	0,98179	3,21E-24	0,97639	9,84E-25	0,9414	2,58E-25	0,83552
AuHS	2,98E-10	0,99959	9,41E-11	0,99995	5,29E-11	0,99998	1,67E-11	0,99994	5,29E-12	0,99912
Au(HS)2-	1,52E-06	0,98265	4,19E-08	0,98179	2,41E-09	0,97639	7,37E-12	0,9414	1,94E-14	0,83552
Au2(HS)2S--	1,67E-08	0,93347	1,27E-10	0,92921	1,33E-12	0,90879	1,35E-16	0,78484	1,19E-20	0,48292
AuCl2-	2,42E-28	0,98265	8,79E-28	0,98179	4,84E-27	0,97639	1,57E-25	0,9414	5,81E-24	0,83552
Au+++	1,01E-79	0,85692	4,92E-78	0,84775	8,79E-76	0,80636	4,74E-71	0,57961	1,12E-65	0,19367
AuCl4-	6,43E-69	0,98265	3,09E-67	0,98179	5,15E-65	0,97639	1,78E-60	0,9414	9,20E-56	0,83552
Fe++	1,10E-14	0,93393	1,46E-13	0,92973	4,57E-12	0,90965	6,03E-09	0,78957	1,72E-05	0,50868
FeOH+	6,87E-20	0,98265	7,91E-19	0,98179	7,83E-18	0,97639	8,69E-16	0,9414	1,33E-13	0,83552
Fe(OH)2	1,12E-26	0,99959	1,12E-25	0,99995	3,54E-25	0,99998	3,54E-24	0,99994	3,54E-23	0,99912
Fe(OH)3-	7,86E-35	0,98265	6,84E-34	0,98179	6,98E-34	0,97639	6,77E-34	0,9414	5,62E-34	0,83552
FeSO4	5,20E-20	0,99959	5,20E-16	0,99995	5,20E-14	0,99998	5,20E-10	0,99994	5,21E-06	0,99912
FeCl+	1,06E-18	0,98265	1,41E-17	0,98179	4,31E-16	0,97639	4,93E-13	0,9414	8,92E-10	0,83552
FeCl2	4,55E-27	0,99959	6,00E-26	0,99995	1,82E-24	0,99998	1,93E-21	0,99994	2,71E-18	0,99912

Fe+++	1,06E-28	0,85692	5,16E-27	0,84775	9,21E-25	0,80636	4,97E-20	0,57961	1,17E-14	0,19367
FeOH++	1,31E-26	0,93347	5,51E-25	0,92921	3,07E-23	0,90879	1,29E-19	0,78484	1,22E-15	0,48292
Fe(OH)2+	8,60E-26	0,98265	3,13E-24	0,98179	5,51E-23	0,97639	1,93E-20	0,9414	9,34E-18	0,83552
Fe(OH)3	1,04E-25	0,99959	3,28E-24	0,99995	1,85E-23	0,99998	5,84E-22	0,99994	1,84E-20	0,99912
Fe(OH)4-	4,39E-33	0,98265	1,21E-31	0,98179	2,20E-31	0,97639	6,73E-31	0,9414	1,77E-30	0,83552
FeCl++	1,01E-30	0,93347	4,88E-29	0,92921	8,42E-27	0,90879	3,64E-22	0,78484	4,07E-17	0,48292
FeSO4+	3,24E-32	0,98265	1,18E-27	0,98179	6,57E-25	0,97639	2,31E-19	0,9414	1,11E-13	0,83552
Fe(SO4)2-	2,27E-38	0,98265	6,26E-31	0,98179	1,14E-27	0,97639	3,48E-21	0,9414	9,16E-15	0,83552
FeHSO4++	4,08E-36	0,93347	1,71E-31	0,92921	3,02E-28	0,90879	1,27E-21	0,78484	1,20E-14	0,48292
Au(SO3)-	1,22E-20	0,98265	3,37E-18	0,98179	1,93E-17	0,97639	5,93E-16	0,9414	1,56E-14	0,83552
Au(S2O3)-	2,67E-16	0,98265	7,35E-14	0,98179	4,22E-13	0,97639	1,29E-11	0,9414	3,40E-10	0,83552
Au(S2O3)2---	6,08E-12	0,85692	1,28E-07	0,84775	7,90E-07	0,80636	2,84E-05	0,57961	1,08E-03	0,19367
Au(S2O3)SO3---	3,80E-17	0,85692	7,97E-13	0,84775	4,93E-12	0,80636	1,77E-10	0,57961	6,73E-09	0,19367
AuS2O3(SO3)2-5	1,72E-17	0,65166	2,78E-11	0,63206	1,94E-10	0,54998	1,10E-08	0,21971	1,60E-06	0,01041
AuCl3(OH)-	1,89E-67	0,98265	7,88E-66	0,98179	4,25E-64	0,97639	1,42E-60	0,9414	6,21E-57	0,83552
AuCl2(OH)2-	2,13E-66	0,98265	7,74E-65	0,98179	1,35E-63	0,97639	4,38E-61	0,9414	1,61E-58	0,83552
AuCl(OH)3-	1,15E-66	0,98265	3,63E-65	0,98179	2,04E-64	0,97639	6,45E-63	0,9414	2,01E-61	0,83552
AuCl3	1,63E-69	0,99959	7,80E-68	0,99995	1,30E-65	0,99998	4,50E-61	0,99994	2,37E-56	0,99912
AuCl2(OH)	1,27E-68	0,99959	5,30E-67	0,99995	2,86E-65	0,99998	9,59E-62	0,99994	4,26E-58	0,99912
AuCl(OH)2	4,96E-67	0,99959	1,80E-65	0,99995	3,14E-64	0,99998	1,02E-61	0,99994	3,83E-59	0,99912
Au(OH)3	6,11E-60	0,99959	1,93E-58	0,99995	1,09E-57	0,99998	3,44E-56	0,99994	1,09E-54	0,99912
Au(OH)4-	3,66E-67	0,98265	1,01E-65	0,98179	1,83E-65	0,97639	5,60E-65	0,9414	1,47E-64	0,83552
Au(OH)Cl-	2,30E-27	0,98265	7,27E-27	0,98179	1,29E-26	0,97639	4,08E-26	0,9414	1,27E-25	0,83552
pH	4,314		4,253		3,759		2,73		1,598	
Eh	-0,062		-0,028		0,016		0,106		0,203	
Состав раствора, (моль)										
Water	55,48622	(mol)	55,50619	(mol)	55,50764	(mol)	55,50732	(mol)	55,48879	(mol)
Au	1,56E-06	(mol)	1,70E-07	(mol)	7,92E-07	(mol)	2,84E-05	(mol)	1,08E-03	(mol)
Cl	1,71E-04	(mol)	1,71E-04	(mol)	1,71E-04	(mol)	1,71E-04	(mol)	1,71E-04	(mol)
Fe	1,10E-14	(mol)	1,46E-13	(mol)	4,62E-12	(mol)	6,55E-09	(mol)	2,24E-05	(mol)

H	4,44E-02	(mol)	4,50E-03	(mol)	1,58E-03	(mol)	2,23E-03	(mol)	3,93E-02	(mol)
Na	1,71E-04	(mol)								
O	1,38E-07	(mol)	1,06E-04	(mol)	3,58E-04	(mol)	4,18E-03	(mol)	7,86E-02	(mol)
S	2,22E-02	(mol)	2,25E-03	(mol)	7,93E-04	(mol)	1,19E-03	(mol)	2,24E-02	(mol)

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), окатывание, истирание, сковывание (P).	ТМО Тарданского месторождения;	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногорского 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, Змеиногорского и Даубайского месторождений
5. Образование скульптур растворения («шагреновая» поверхность и др.) и образование гладкой ровной поверхности частиц (KB, ZO).	-	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногорского месторождений
6. Изменение химического состава золотин и образование высокопробных кайм и прожилков, (KB, ZO, P).	ТМО Тарданского месторождения;	ТМО Змеиногорского месторождения
7. Укрупнение частиц (<i>преобладает в KB, ZO, меньше в P</i>).	ТМО Чернореченской россыпи, россыпей рр. Ис и Тура	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногорского месторождений
8. Диспергация частиц (KB, ZO, P).	ТМО Чернореченской россыпи, россыпей рр. Ис и Тура	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногорского месторождений
9. Образование частиц «нового» Au в виде кристаллов и их сростков (KB, ZO).	-	ТМО Ново-Урского, Белоключевского, Змеиногорского 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, Змеиногорского месторождений