

УДК 553.411

# Минералого-петрографические особенности и последовательность образования золото-сурьмяных руд Удере́йского месторождения (Красноярский край)

**О.В. Аликин, А.В. Чумаков, В.Н. Рудашевский**

ООО «ЦНТ Инструментс»

195279, Санкт-Петербург, ул. Шоссе Революции, 69 лит. И. E-mail: o.v.alikin@yandex.ru

(Статья поступила в редакцию 31 января 2023 г.)

Приводятся данные по петрографическим и минералогическим исследованиям исходных золото-сурьмяных руд Удере́йского месторождения и продуктов их обогащения. Охарактеризованы главные минеральные ассоциации руд, выявлены минеральные формы нахождения и оценено распределение Au, Pd, Ag. Уточнена и дополнена парагенетическая схема последовательности минералообразования. Важными минеральными формами нахождения золота являются преобладающие золотосодержащий арсенопирит и самородное золото (Au,Ag), а также редкие ауристибит  $AuSb_2$  и интерметаллиды – сурьмянистое золото (Au,Sb) и палладистое золото (Au,Pd). Выявленное многообразие форм нахождения благородных металлов и анализ их взаимоотношений с ассоциирующими сульфидами и нерудными минералами указывают на как минимум два контрастных этапа рудогенеза – ранний и поздний. В пределах раннего этапа выделены две стадии минерализации – ранняя кварц-пиритовая и поздняя колчеданная. В позднем этапе выделены три последовательные стадии минерализации: кварц-стибнитовая, пирит-стибнит-кварцевая и пирит-арсенопирит-стибнитовая.

Ключевые слова: самородное золото, ауристибит, палладистое золото, гидросепарация, Удере́йское месторождение, стибнит, арсенопирит, пирит, золото-сурьмяные руды.

DOI: 10.17072/psu.geol.22.1.51

## Введение

Удере́йское золото-сурьмяное месторождение расположено на юге заангарской части Енисейского кряжа и приурочено к восточному крылу Татарского антиклинория (рис. 1). Последний представляет собой сложно построенную тектоническую зону, ограниченную с северо-востока Ишимбинским, а с юго-запада – Татарским глубинными разломами, являющимися рудоконтролирующими для большинства известных золотоносных месторождений восточной части Енисейского кряжа (Мансуров, 2018; Сильянов, 2017), в том числе для рассматриваемого месторождения. В металлогеническом отношении Удере́йское месторождение принадлежит к Васильевско-Удере́йскому рудному полю Партизанского рудного узла Южно-Енисейского золоторудно-россыпного района. Как и все типичные кварц-стибнитовые месторождения, Удере́йское характеризуется довольно простым и однородным минеральным составом руд, даже несмотря на ослож-

нённость тектоническими нарушениями. В процессе минералообразования обычно выделяют два этапа и несколько стадий (Дистанов и др. 1977; Неволько и Борисенко, 2009; Власов и др. 2011). Главные рудные минералы обоих этапов – малосульфидного кварц-жильного и кварц-стибнитового: стибнит, бертьерит, пирит, арсенопирит, самородное золото; среди жильных нерудных преобладают кварц, гораздо реже карбонаты – анкерит и сидерит. В небольших количествах отмечаются кальцит, доломит, вторичный мусковит, гидрослюда, альбит, калиевые полевые шпаты и хлорит, более характерные для вмещающих оруденение филлитизированных углеродистых серицитовых сланцев.

Удере́йское месторождение – в первую очередь источник сурьмы. Содержания благородных металлов в его рудах относительно невысокие (г/т): Au~1–2, Ag ~0.1–0.4 и Pd~0.02–0.01. Минералогия и генезис благороднометалльной минерализации в объектах этого типа изучены недостаточно: самород-

ное золото тонкое, упорное, связано с сульфидами и сульфоарсенидами (Дистанов и др., 1977; Сазонов и др., 1990; Власов и др., 2011; Бутько, 2016 и др.), а палладий и вовсе не рассматривается как полезный компонент из-за его низких содержаний в исходных рудах.

Дискуссионным остается вопрос происхождения палладиевой минерализации. Примечательно, что ту же позицию занимает и сама сурьмяная минерализация: до сих пор однозначно не установлен источник привноса сурьмы – связан он с гранитным или базитовым магматизмом. Дистанов и др. (1977), опираясь на результаты исследований газожидких включений, отрицают возможность формирования ранней кварц-сульфидной и более поздней кварц-стибнитовой формаций в едином процессе рудообразования и относят их к самостоятельным этапам. Известно, что кварц-сульфидный и кварц-стибнитовый этапы разорваны во времени: 720–711 млн лет и 676–643 млн лет, соответственно (Неволько и Борисенко, 2009). Известно также, что эти этапы контрастны по параметрам минералообразующих флюидов:  $T=340-230^{\circ}\text{C}$ ,  $C_{\text{сол}}=7.5-4.1$  мас. %-экв. NaCl и  $T=190-140^{\circ}\text{C}$ ,  $C_{\text{сол}}=6.9-2.9$  мас. %-экв. NaCl, соответственно (Власов и др. 2011). Более поздние работы сводят образование кварц-сульфидных и кварц-стибнитовых формаций к полистадийности единого гидротермального процесса рудообразования (Бутько, 2016; Сильянов, 2017), интерпретируя значительные вариации составов газожидких включений и широкие диапазоны температур минералообразования.

Общеизвестно, что повышенные концентрации палладия, как и других ЭПГ, свойственны для основных и ультраосновных пород. В районе месторождения широко проявлен гранитоидный магматизм (Татарско-Аяхтинский комплекс), в меньшей степени – базитовый (Индыглинский и Исаковский комплексы) (Сазонов и др., 2010). По мнению Неволько (2009b), временные интервалы формирования золоторудной минерализации не совпадают с основными этапами развития гранитоидного магматизма и метаморфизма, а в большей мере коррелируются с периодами проявления дайковых комплексов базитового и щелочно-базитового состава. Тем не менее, по результатам геологических изысканий 2015 г., в Партизанском

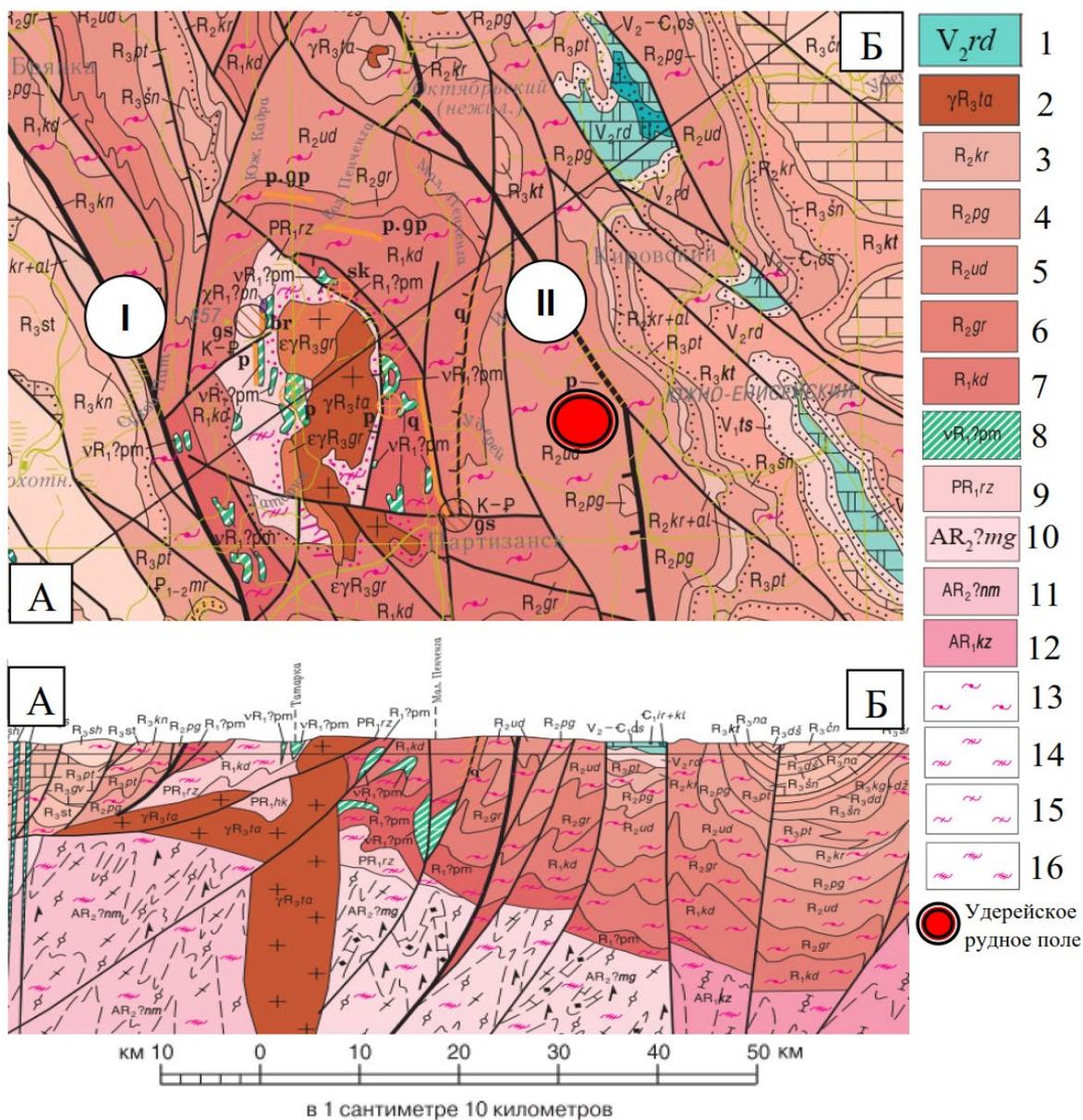
рудном узле прямая связь сурьмяной минерализации Удере́йского месторождения с конкретными комплексами основного состава не прослеживается.

Дополнительный аргумент в пользу той или иной модели формирования руд Удере́йского месторождения может дать более глубокое исследование парагенезиса минералов благородных металлов, которые несут в себе ключевую информацию о процессах рудообразования, являясь прямым следствием их проявления. В то же время исследование минералов благородных металлов, ввиду специфики их распределения и малой встречаемости, требует специального подхода в аналитической пробоподготовке.

Авторы выражают благодарности коллегам Новоангарского обогатительного комбината за предоставленные образцы – Роману Байкову и Илье Макарову. Глубокую признательность авторы выражают д.г.-м.н. Н.С. Рудашевскому за ценные рекомендации и замечания. Отдельную благодарность выражают Б.М. Осовецкому, А.В. Антонову, В.Д. Щербакову и Е.Г. Пановой за неоценимую помощь, оказанную в процессе электронно-микроскопических исследований и проведения микрорентгеноспектральных анализов. За помощь в исследованиях, замечания и поддержку авторы премного благодарны А.А. Горбунову, А.Ю. Пузику, М.А. Волковой, Е.М. Томилиной.

### Объекты и методы исследований

В фундаментальной статье по технологической минералогии золота Н.С. Рудашевского (2017) отмечены важные признаки, объединяющие руды благородных металлов месторождений различных геолого-промышленных типов, выражающиеся в том числе в сложных полиминеральных составах таких руд и обуславливающие необходимость интенсивного обогащения исследуемых руд по самым разным технологическим схемам. В обзоре McClenaghan (2014) подчеркивается, что полученные различными традиционными способами концентраты благородных металлов для дальнейшего детального минералогического анализа и использования, как правило, требуют дополнительного сокращения по объёму с помощью тяжёлых жидкостей.



**Рис. 1.** Выкопировка из Государственной геологической карты дочетвертичных отложений масштаба 1:1 000 000 и геологический разрез по линии А-Б (лист О-46, третье поколение). Глубинные разломы: I – Татарский II – Ишимбинский; Условные обозначения: 1 – Редколесная свита – песчаники олигомиктовые; 2 – Татарско-Аяхтинский комплекс гранитовый – граниты равномернозернистые биотитовые, гранодиориты порфировидные биотит-рогообманковые, лейкограниты слюдяные, дайки, жилы аплитовидных гранитов, аплитов, пегматитов; 3 – Свита Карточка – метаизвестняки, филлиты, брекчии; 4 – Погорюйская свита – сланцы, филлиты сероцветные; 5 – Удереysкая свита – сланцы, филлиты серицитовые углеродистые и альбит-хлорит-серицитовые в ритмичном переслаивании с метаалевролитами, метапесчаниками олигомиктовыми; 6 – Горбилокская свита – сланцы серицит-хлоритовые, альбит-эпидот-хлоритовые (метатUFFы базальтов) с магнетитом; 7 – Кординская свита – сланцы биотит-хлорит-серицит-кварцевые; 8 – Субвулканические образования – пикродолериты, метапикриты, щелочные метапикриты; амфиболизированные габбродолериты, субщелочные габбродолериты; 9 – Рязановская свита – кристаллосланцы биотитовые, биотит-амфиболовые, биотит-гранатовые, мраморы, кальцифиры, сланцы слюдисто-карбонатные; 10 – Абалаковская толща метаморфическая – ортоамфиболиты, реже кристаллосланцы и плагиогнейсы биотит-гранатовые; 11 – Немтихинская серия метаморфическая – плагиогнейсы биотитовые, гранат-силлиманитовые, биотит-амфиболовые; 12 – Кузеевская серия метаморфическая – гнейсы гранат-гиперстеновые. Фации регионального метаморфизма; 13 – Зеленосланцевая; 14 – Амфиболитовая; 15 – Эпидот-амфиболитовая; 16 – Гранулитовая.

В качестве альтернативы токсичным тяжёлым жидкостям в последнее время часто используется метод гидросепарации, на основе которого реализована универсальная минералогическая технология исследования пород, руд и технологических продуктов (Рудашевский и др., 2018), главные аспекты которой использованы в ходе настоящего исследования.

Работы по изучению вещественного состава в рамках исследования руд месторождения на обогатимость ведутся в лаборатории пробоподготовки ООО «ЦНТ Инструментс». По предварительным результатам изучения продуктов технологического передела опубликована первая на этом месторождении минералогическая находка палладистого золота (Рудашевский и др., 2019), где зафиксирована зональность зёрен палладистого золота, свидетельствующая о наложенном характере палладиевой минерализации на первичную золото-сульфидную. Всего изучено 5 проб технологических продуктов переработки исходных золото-сурьмяных руд, наработанных по регламенту Боголюбовской золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ) (рис. 2).

Дополнительно изучены штучные образцы, отобранные из отсева (>40 мм) композитной технологической пробы исходных руд, поступающих на обогащение. Из них изготовлены шлифы (10 шт.) и аншлифы (63 шт.), которые изучались методами оптической и электронной микроскопии с целью построения сводного разреза жильного оруденения во вмещающих сланцах, установления закономерностей сростания рудных и нерудных минералов, определения минеральных ассоциаций вмещающих горных пород, центральных частей жил, а также призальбандовых и зальбандовых участков жил. Полный перечень изученных технологических продуктов обогащения представлен в табл. 1.

С целью бережного вскрытия минералов-носителей благородных металлов проба исходной руды (НОК-3) измельчалась до крупности P100 <315 мкм стадийным дроблением. Материал продуктов флотации уже имел достаточную степень вскрытия и

дополнительному доизмельчению не подвергался.

Материал каждой технологической пробы разделялся мокрым ситованием на 8 размерных классов, диапазоны которых соответствуют границам рудоподготовки для разных технологических сценариев (в порядке уменьшения, мкм): >1000, 1000–500, 500–315, 315–200, 200–125, 125–71, 71–45, <45. Между разными пробами сита тщательно очищались в ультразвуковой ванне (не менее 10 часов) с применением поверхностноактивных веществ (ПАВ). Шламовая составляющая (<10 мкм) отделялась методом ультразвуковой седиментации из фракции <45 мкм.

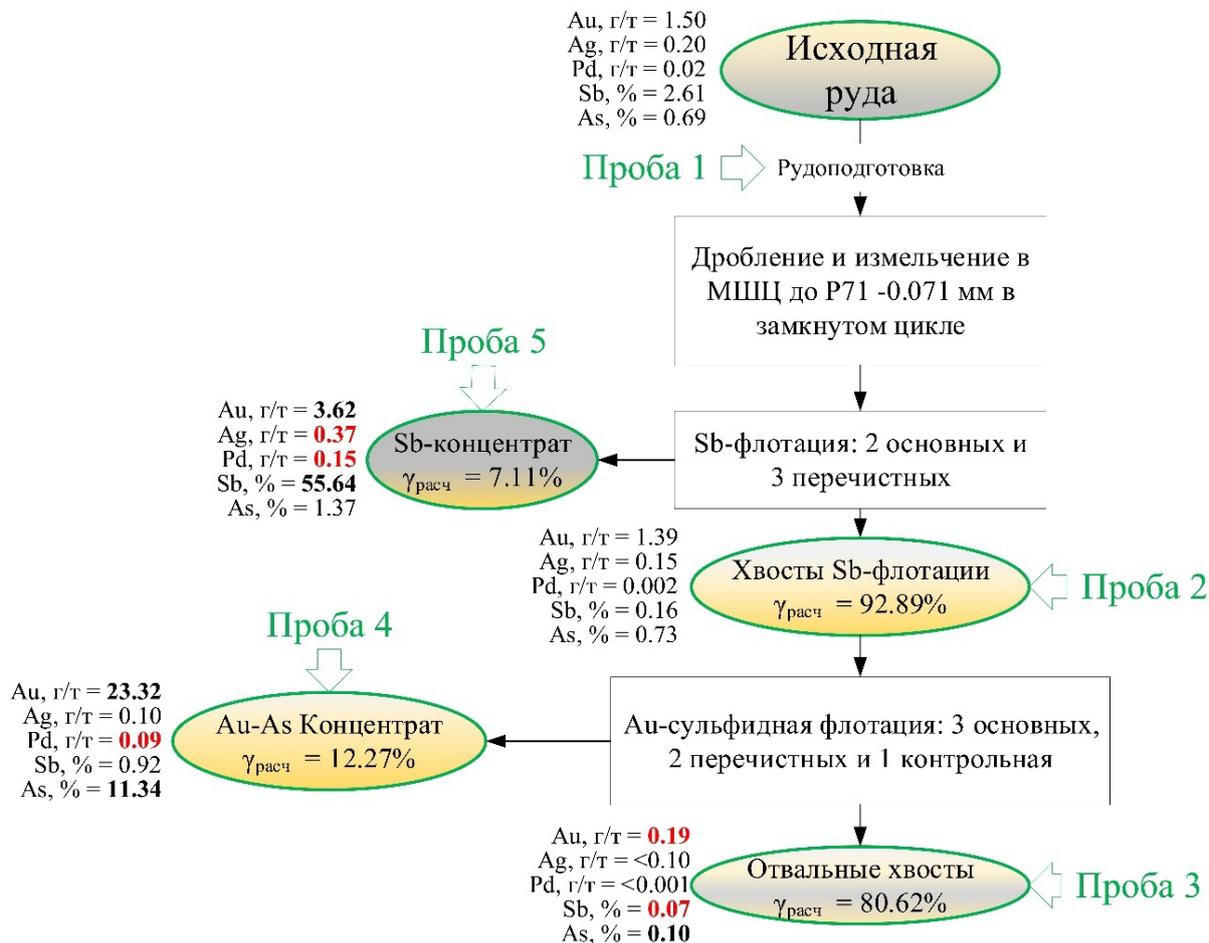
Во всех размерных классах менее 500 мкм, кроме ультратонкого (<10 мкм), методом гидросепарации (гидросепаратор CNT HS-11) материал промывался в три стадии с получением «лёгких» хвостов, промежуточного продукта, «тяжёлых» хвостов и HS-концентратов. Из них изготавливались однослойные полированные шлифы горячим прессованием с пластиком.

Оптические исследования включали: 1) исследования вмещающих кварц-карбонатно-глинистых сланцев в шлифах (в проходящем свете, микроскоп Olympus BX51, камера Leica DC 300, программный пакет Autopano Giga); 2) исследования рудных и околорудных жильных минералов в аншлифах; 3) исследования зёрен рудных и околорудных минералов в однослойных полированных шлифах HS-концентратов (в отраженном свете, стереомикроскоп MZ6, камера Leica DC 300, программный пакет Autopano Giga).

Для определения химических составов и изучения внутреннего строения минералов использовались: сканирующие электронные микроскопы CamScan MX2500 (аналитик А.В. Антонов, ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург), JSM 6390LV с ЭДС приставкой INCA ENERGY 350 (аналитик – Б.М. Осовецкий, ЦКП ПГНИУ, г. Пермь) и TESCAN VEGA-4 с ЭДС приставкой Ultim MAX-100 (аналитик А.А. Горбунов, TESCAN, г. Санкт-Петербург); рентгеновский микронзондовый анализатор CamebaxSX50 (аналитик В.Д. Щербаков, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва). Суммарно

определён химический состав 1142 зёрен минералов (>5000 качественных и количественных анализов), из них зёрен минералов-носителей благородных металлов – 133 (263 анализа). Для диагностики и количественной

оценки породообразующих минералов в пробах использованы порошковые препараты с дальнейшим анализом на портативном рентгеновском дифрактометре D2 PHASER (CuK $\alpha$ ) в диапазоне углов 2 $\theta$  от 5 до 90°.



**Рис 2.** Упрощенная блок-схема по обогащению Удерейских руд методом селективной флотации с точками пробоотбора для минералого-геохимического изучения

**Таблица 1.** Реестр изученных технологических продуктов обогащения золото-сурьмяных руд Удерейского месторождения

Наименование	Масса пробы, кг	Расшифровка
НОК-3	3.4	Композитная проба исходных руд, измельчённых до класса 100% <3 мм
Sb к-т	3.0	Сурьмяный флотоконцентрат
НОК ХСФ	3.8	Хвосты сурьмяной флотации
Au-sulf к-т	3.0	Золото-сульфидный флотоконцентрат
НОК ОХ	3.8	Отвальные хвосты
НОК-4 – НОК-60	4.6	Штуфные образцы из отсева класса >40 мм композитной пробы исходных руд

**Таблица 2.** Характеристика пород Удерейского месторождения по минеральному составу и золотоносности

Группа пород	Неизмененные и слабоизмененные рудовмещающие сланцы	Сульфидизированные метасоматиты минерализованной зоны	Рудные метасоматиты
Минеральный состав	Серицит, кварц, карбонаты, полевые шпаты, хлорит, мусковит, углеродистое вещество, пирит	Кварц, серицит, карбонаты, пирит, арсенопирит, стибнит, мусковит, углеродистое вещество	Желваковый кварц, стибнит, пирит, арсенопирит, джемсонит, буланжерит, галенит
Текстуры	Неясно-слоистая до массивной, бластическая, сланцеватая	Площчатая до полосчатой и массивной	Друзовые до прожилково-вкрапленных, массивных и брекчиевидных
Структуры	Микрокристаллическая лепидогранобластовая	Микрозернистая, как правило с ясно выраженной реликтовой слоистостью	От микрозернистых до крупнозернистых с реликтивными структурами исходных сланцев
Формы нахождения золота	Самородное золото	Золотосодержащий арсенопирит, самородное золото, палладистое золото	Самородное золото, сурьмянистое золото, ауристобит
Баланс золота	Незначительное (<1%)	Преобладающее (>60%)	Второстепенное (<40%)

Обработка дифрактограммы осуществлялась в программах DIFFRAC.EVA, TOPAZ.

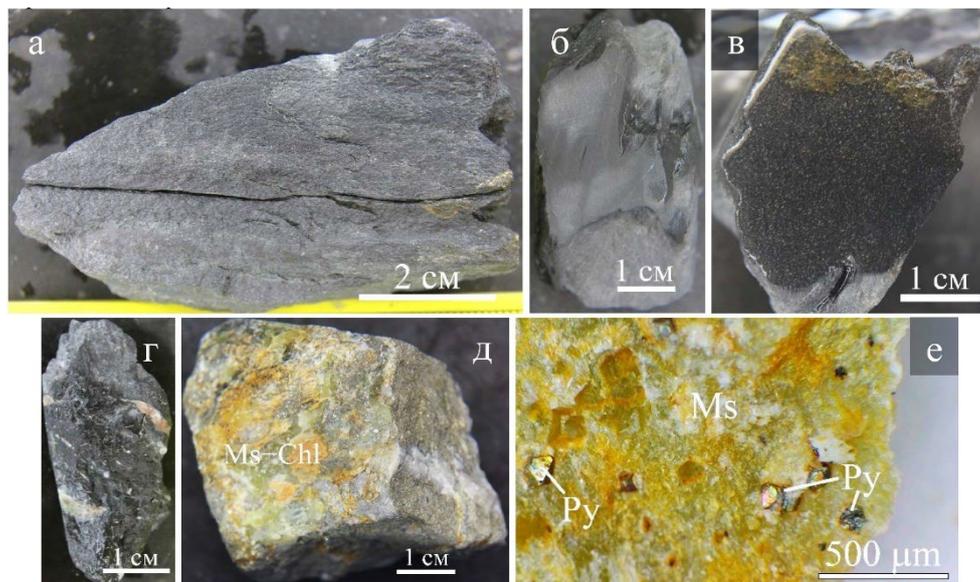
### Петрографическая характеристика исходных Удерейских руд

По результатам петрографических и минералогических исследований штучных образцов выделены три группы пород (табл. 2).

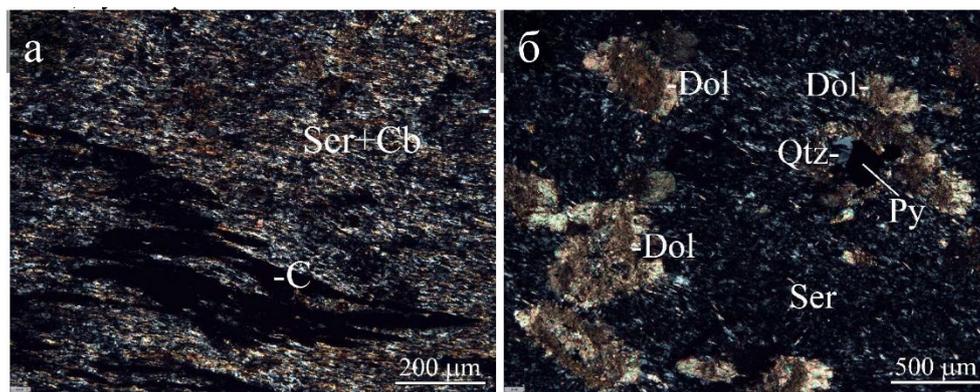
*Первая группа – сланцы* (рис. 3, а-б), вмещающие жильные кварц-сульфидное (арсенопирит+пирит) и кварц-стибнитовое оруденения, представляют метаморфические породы ранней зеленосланцевой фации, образовавшиеся при метаморфизме протолитов – аргиллитов, аргиллитизированных песчаников и алевролитов. Обладают серым цветом (от светлого до угольно-черного оттенков). Текстуры изменяются от неясно-слоистой (почти массивной) до слабовыраженной бластической сланцеватой. В сланцах наблюдаются трещинки кливажа разных направлений, прерывистые, сопровождаемые концентрациями углеродистого вещества (рис. 4, а), нередко заполненные гидроксидами железа.

Карбонаты, как правило, образуют гранобласты или дворики растяжений около сульфидов (рис. 4, б). Структура пород микрокристаллическая лепидогранобластовая, распределение зёрен равномерное. Главным образом вмещающие сланцы состоят из серицита (30–60%), кварца (20–40%), карбонатов (15–30%) и редких полевых шпатов (1–3%).

Слабоизменённые сланцы (рис. 3, в-д) имеют серый цвет и тонкую слоистость. Механическая сланцеватость – способность пород к делению на слои и микрочастицы из-за действия механических сил, вызываемых динамоморфизмом – при более поздних дислокационных процессах способствовала образованию линзовидных серицитовых прожилков, сложенных тонкими чешуйками мусковита с оторочками хлорита (рис. 3, г-д), нередко с вкраплениями метакристаллов пирита (рис. 3, е). В слабоокисленных образцах иногда наблюдаются листовидные вкрапления, а в сильноокисленных – тонкие прожилки гематита (рис. 5, б). Структура таких образцов – равномернозернистая лепидогранобластовая.



**Рис. 3.** Штуфные образцы, характерные для первой группы пород: а – неизменённый углеродистый карбонат-глинисто-сланцевидный филлитовидный сланец; б – углетизированный хлоритовый филлит; в – слабоизменённые карбонатно-глинисто-сланцевидные сланцы с зональностью окисления; г-д – слабоизменённые углеродистые карбонат-кварц-глинисто-сланцевидные сланцы с прожилками и просечками серицита и хлорита; е – метакристаллы пирита и их припечатки на серицитовом прожилке. Ms – мусковит, Py – пирит

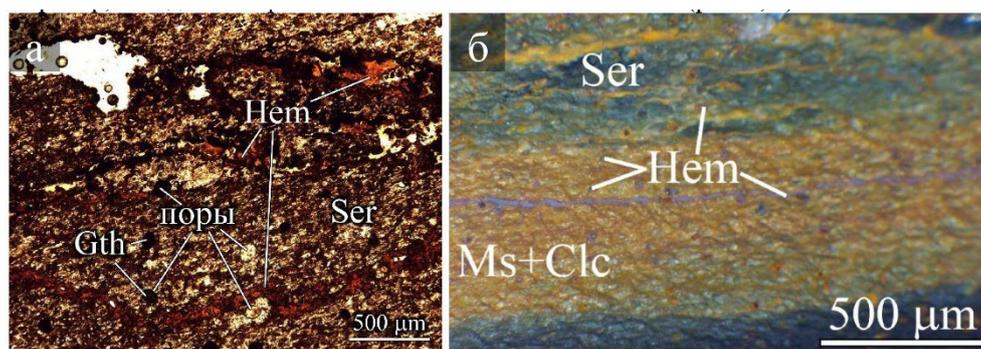


**Рис. 4.** Серицитовый филлитовидный сланец: серицит – 60%, кварц – 20 %, карбонаты – 15 %, рудные – 1–3%, углеродистое вещество 2–3%; илиф НОК-16, николи скрещены; а – трещинки, заполненные углеродистым веществом; б – стяжения доломита, приуроченные к зерну пирита. Ser – серицит, Dol – доломит, Qtz – кварц, Py – пирит, Cb – карбонаты, C – углеродистое вещество

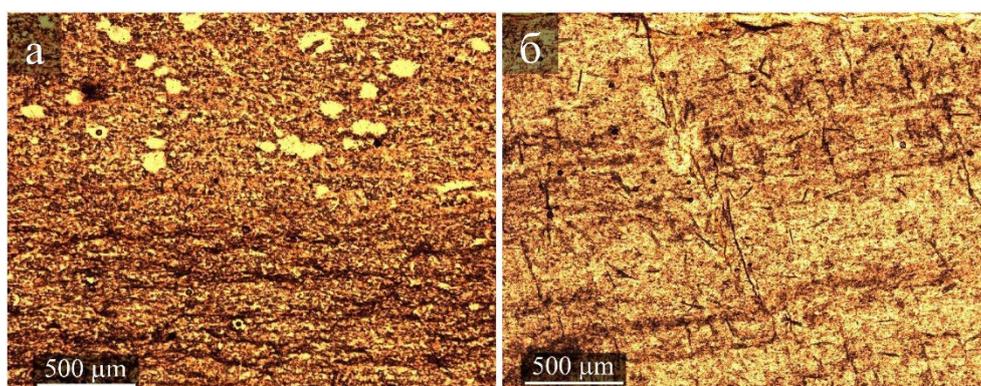
Главными породообразующими минералами являются кварц, серицит, карбонаты (доломит), хлорит. В слабоизменённых сланцах встречается рассеяновкрапленный микрозернистый пи-рит, крайне редко – в виде гнездовых скоплений микрокристаллов, доля сульфидов составляет не более 4–5%. Диагностированы также крупные (до 2–3 мм) метакристаллы пирита в серицитовых прожилках.

При гипергенном преобразовании плейчатость сланцев сменяется тонкозернистыми минеральными агрегатами буро-оранжевого

цвета без кристаллографических очертаний (рис. 5, а). Формы подобных агрегатов в основном изометричные, реже – волокнисто-игольчатые. Средний размер зерен ~0.015 мм. Среди оксидов-гидроксидов железа преобладает гематит, реже – гётит (по результатам Рамановской спектроскопии). Часто наблюдается выщелачивание сульфидных вкраплений из вмещающих сланцев с образованием микропор, иногда эти поры заполняются гематитом и гётитом (рис. 5, б).



**Рис. 5.** Минералы оксидов и гидроксидов железа, развивающиеся при гипергенном преобразовании, часто заполняющие полости, оставшиеся после разложения первичных сульфидов. а – в проходящем свете; б – макрофото; Шлиф НОК-11. Hem – гематит, Gth – гётит, Ser – серицит, Ms – мусковит, Clc – клинохлор

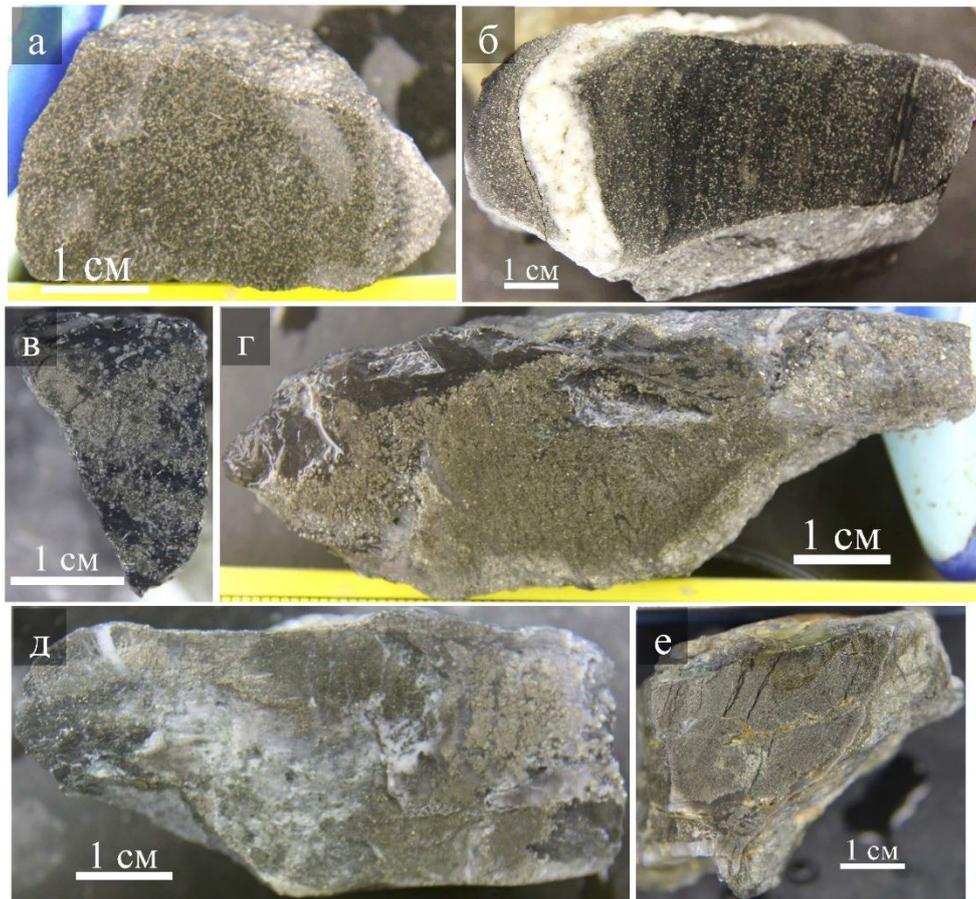


**Рис. 6.** Хлоритовый (а) и серицитовый (б) филлиты: хлорит (клинохлор); николи параллельны; шлифы НОК-1 и НОК-20

Образцы сланцев из зон дислокации (ближе к разломам) отличаются невысокой твёрдостью и значительным количеством пор (рис. 6, а), обладают микрокристаллической структурой, минералы имеют очень маленькие размеры зерен. Больше всего распространён хлорит (вероятно, клинохлор), представленный тонкими чешуйчатыми и удлинённо-волокнистыми агрегатами. Средний размер кристаллов хлорита <math><0.015\text{ мм}</math>. Зерна слагают цепочки с субпараллельной ориентировкой. Гораздо реже встречаются более плотные серицит-кварц-карбонатные разности (рис. 6, б). Серицит в таких образцах представлен волокнистыми удлинёнными кристаллами, расположенными субпараллельно друг другу, а средний размер зёрен  $\sim 0.05\text{ мм}$ .

Вторая группа – сульфидизированные метасоматиты минерализованной зоны сланцев, проявленные в углеродистых и карбонат-содержащих сланцах на контактах с жильным кварц-стибнитовым оруденением

и образующие вкрапления мелких кристаллов пирита и арсенопирита, нередко с прожилками и вкраплениями стибнита. Исходные углеродистые сланцы претерпели значительные гидротермальные преобразования. Текстуры – от пльчатой до полосчатой и массивной, цвета изменяются от угольно-черного и серого до грязно-желтого в зависимости от степени сульфидизации. Мощность сульфидных прослоев варьирует от долей мм до первых см. Макроскопически обнаруживаются крупные удлинённые кристаллы арсенопирита, ориентированные чаще субсогласно слоистости, а также спорадические скопления тонковкрапленного пирита. В образцах милонитизированных сланцев преобладает глобулярный пирит, центральная часть которого замещена кварцем, карбонатами, реже мусковитом. Структура микрозернистая, как правило, с ясно выраженной реликтовой слоистостью.



**Рис. 7.** Штуфные образцы, характерные для второй группы пород: а – густовкрапленный агрегат пирита в окварцованном сланце с неявной слоистостью; б – вкрапления пирита с ясно выраженной слоистостью в окварцованных сланцах на контакте с кварц-стибнитовой жилой; в – гнездо пирита с вкраплениями удлиненных кристаллов арсенопирита в углеродистом сланце; г – кварц-пиритовый агрегат с линзочками углеродистого вещества; д – густовкрапленный пирит с гнездами арсенопирита и прожилками кварца; е – массивный пирит с реликтовыми прожилками и просечками метаморфического серицита и хлорита

Основной состав породы представляют кварц, мусковит, серицит, карбонаты, хлорит, пирит и арсенопирит. Присутствуют аксессуарные игольчатый рутил и изометричные вкрапления апатита, общая доля которых не более 1–2%.

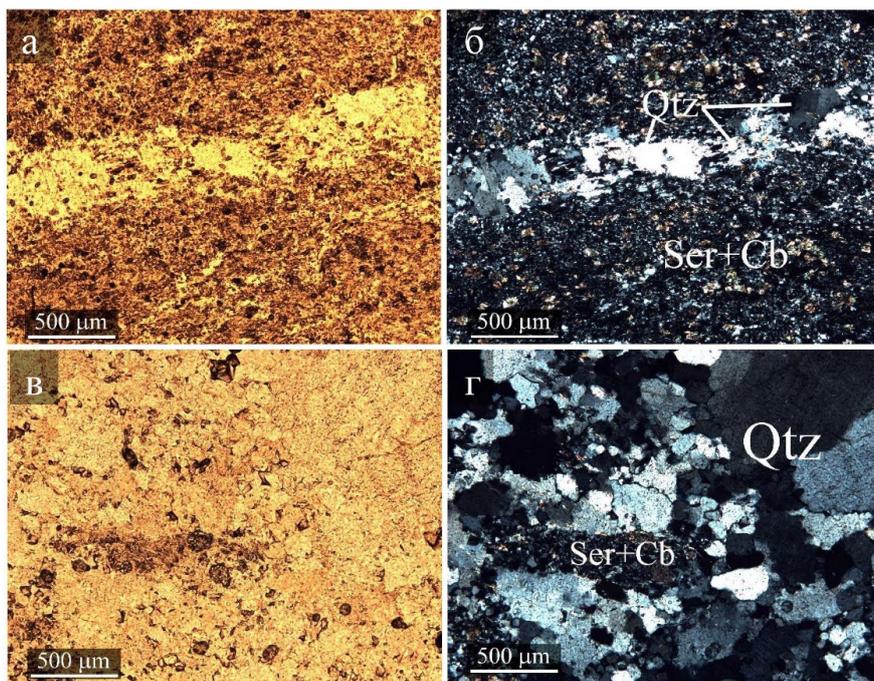
В зависимости от степени удалённости от рудных жил в пространственном отношении в сланцах установлены слабо (рис. 7, а-в) и сильно (рис. 7, г-е) окварцованные разности.

В образцах слабо окварцованных сланцев кварц, как правило, представлен микропрожилками (рис. 8, а-б) и линзочками часто с микрозернистой структурой, секущими серицитовые сланцы по трещинкам кливажа. В сильно окварцованных сланцах кварц прак-

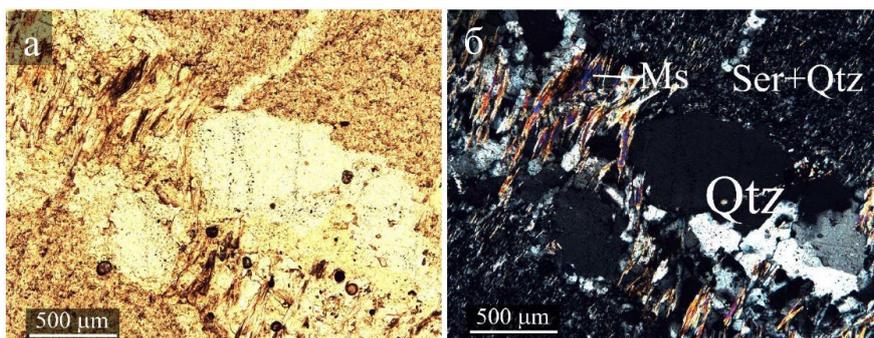
тически полностью замещает исходную карбонат-глинисто-серицитовую массу с редкими реликтовыми линзами углеродистого вещества и остаточным серицитом (рис. 8, в-г).

В образцах из зон дислокации в дроблённом кварце наблюдается перекристаллизованный листовидный мусковит (рис. 9).

Характер трещиноватости, присутствие включений вмещающих пород и формы контактов кварц-стибнитовых жил определяют разнообразие текстур сульфидизированных вмещающих сланцев. Прожилковые и прожилково-вкрапленные текстуры развиты повсеместно. Реже наблюдаются полосчатые текстуры: полосы пирита или арсенопирита ориентированы параллельно контактам жил.



**Рис. 8.** Карбонат-кварцевые метасоматиты с серицитом: а-б – слабокварцованный; в-г – сильно-окварцованный. Средний состав: кварц – 50%, карбонат – 35–40%, серицит – 10–15%; а, в – без анализатора; б, г – с анализатором



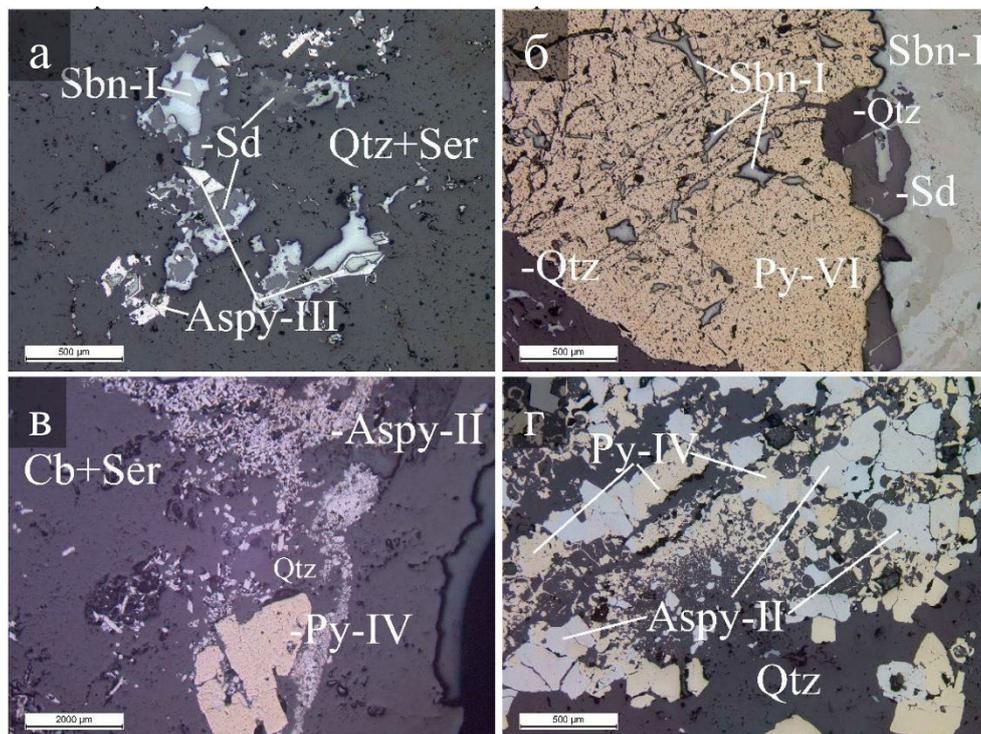
**Рис. 9.** Кварцевый филлит: кварц – 70%, серицит/мусковит – 30%, рудный минерал <1%; а – без анализатора; б – с анализатором. Шлиф НОК-30

Сульфидизация вмещающих оруденение пород проявляется в образовании кристаллов пирита и арсенопирита, образующих от рассеянокрапленных до густокрапленных и массивных агрегатов по мере приближения к кварц-стибнитовым жилам.

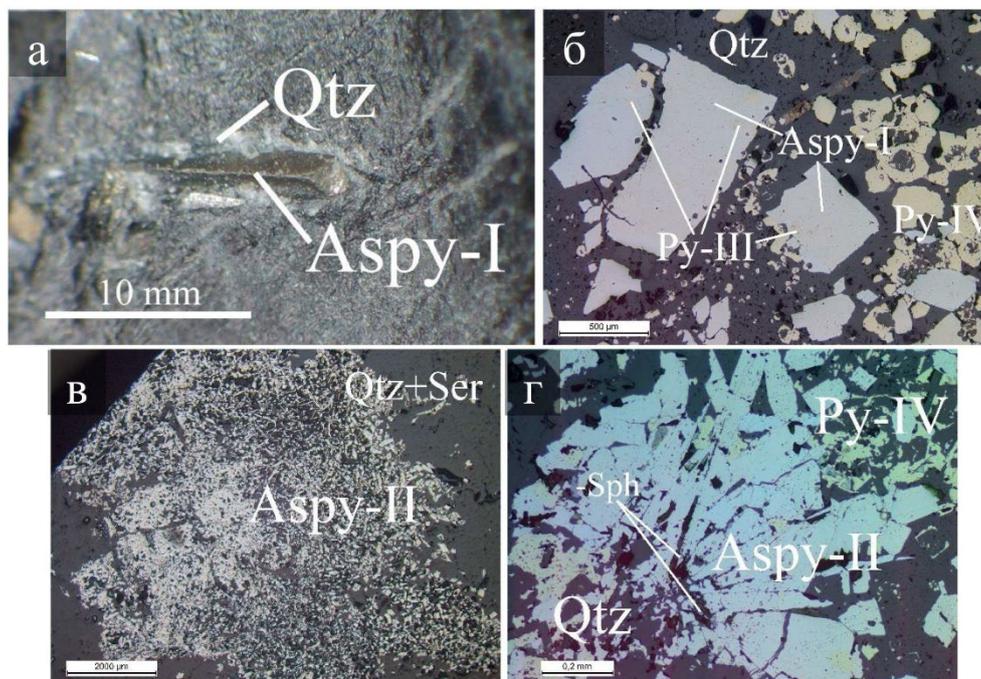
В целом арсенопиритизация указывает на присутствие значительных количеств мышьяка в рудоносных растворах. Арсенопирит развивается во вмещающих филлитовидных глинисто-сланцевых сланцах, обычно в ассоциации с пиритом, но более локально – непосредственно в зонах контакта с кварцевыми и кварц-стибнитовыми жилами (рис. 10, в). Форма зерен его игольчатая, при толщине иголок от 0.05 до 3 мм и длине до

11 мм, с поперечным ромбическим сечением кристаллов.

Часто удлинённые кристаллы арсенопирита обрастают агрегатами кварца, очевидно в процессе метасоматоза (рис. 11, а-б). Местами арсенопирит образует, кроме рассеянной вкрапленности, зоны послойного обогащения, гнезда, массивные прожилки и желваки (рис. 11, в-г). Нередко остроугольные неправильной формы обломки вмещающих пород с крупными кристаллами сульфидов (до 10 мм) заключены в кварц-стибнитовой рудной массе и пересекаются в виде корродированных зёрен пирита, ассоциирующем с арсенопиритом.



**Рис. 10.** Характерные сростания арсенопирита в приконтактовых и приальбандовых зонах кварц-стибнитовых жил: а – арсенопирит на контакте со стибнитовым прожилком, стибнит замещает арсенопирит; б – корродированный кристалл пирита с участками замещения стибнитом; в – густая вкрапленность арсенопирита по трещинкам отрыва карбонатно-глинистых сланцев; г – поздний арсенопирит, развивающийся по дроблёному и выщелоченному пириту



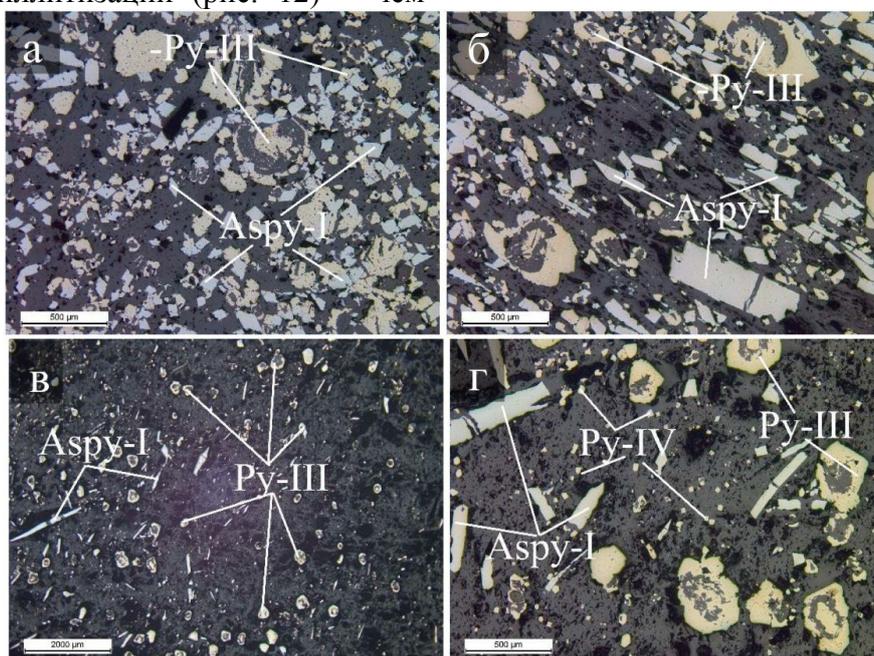
**Рис. 11.** Характерные сростания арсенопирита: а – макрофото арсенопирита в кварцевой «рубашке» в кварц-карбонат-серичитовом сланце; б – тот же кристалл в отражённом свете; в – мелкозернистый густовкрапленный, практически массивный арсенопирит, переходящий в рассеянную вкрапленность; г – гнездообразное сростание удлинённых кристаллов арсенопирита, с участками замещения кварцем в центре и прожилками сфалерита

В связи с прослеживанием (по результатам геологических изысканий) контроля оруденения локальными разломами отдельного внимания требуют обогащённые сульфидами образцы, приуроченные к зонам локального проявления дислокационных деформаций – филлитизированные сланцы и филлиты, которые сильно варьируют по содержанию сульфидов.

Чешуйки глинисто-слюдистых минералов (клинохлор, мусковит) «обволакивают» окатанные зёрна пирита. Доля зонально замещённых зёрен пирита, как и общее содержание сульфидов в руде, зависит от степени проявления филлитизации (рис. 12) – чем

более проявлено волочение глинистых минералов, тем больше проявляется зональность зёрен пирита, а общая доля сульфидов резко снижается. Кристаллы арсенопирита разноориентированы и преимущественно катаклазированы.

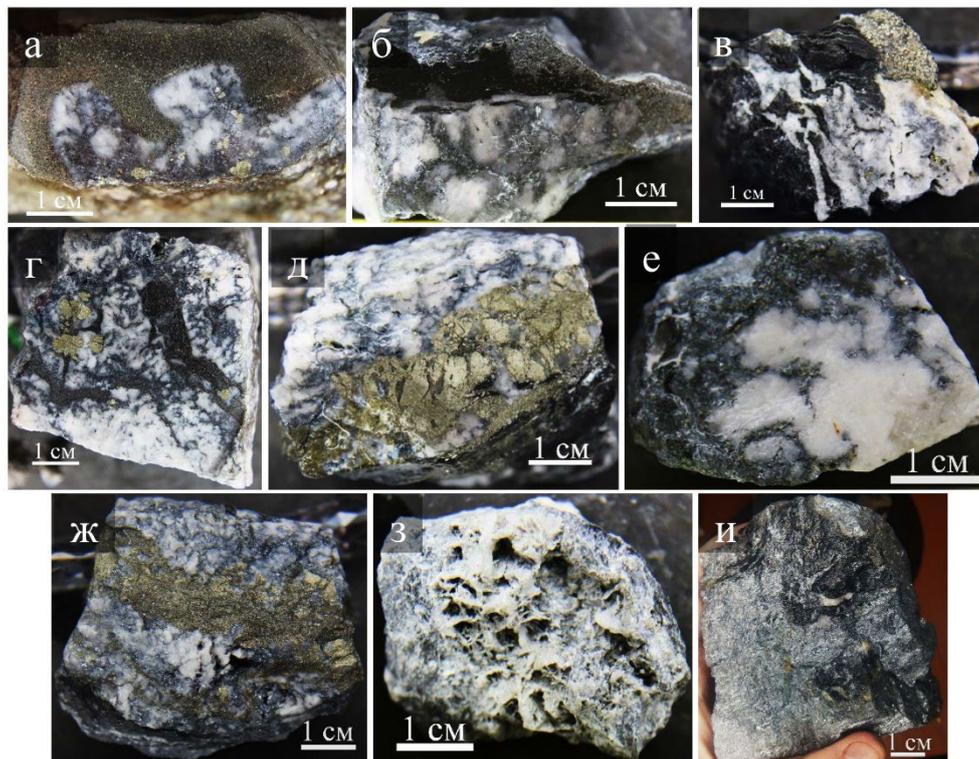
Как правило, с кристаллами арсенопирита отмечается тонкокристаллический пирит и окаймляющие его серицит и мелкозернистый кварц. Иголочки арсенопирита ориентированы преимущественно беспорядочно (рис. 12, а, в-г), реже вытянуты вдоль направления сланцеватости породы (рис. 12, б).



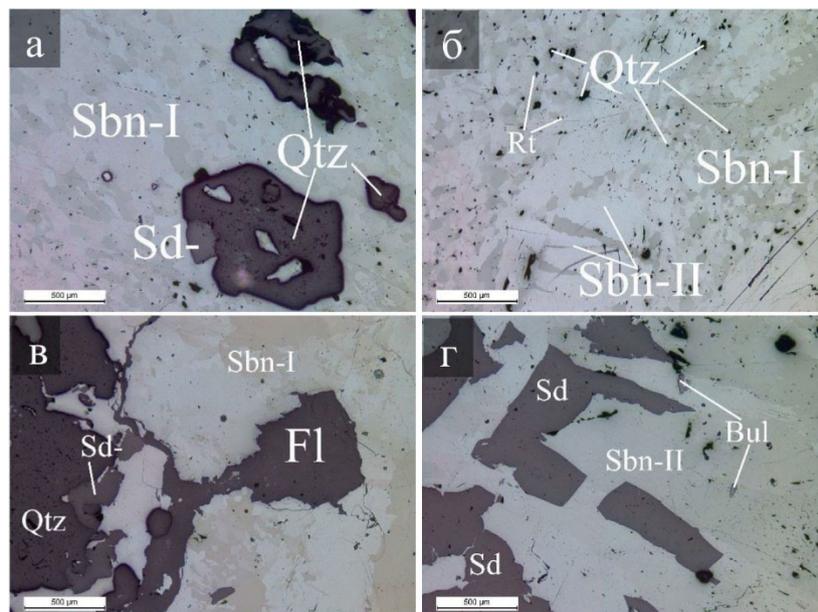
**Рис. 12.** Сульфидное оруденение в филлитизированных сланцах – катаклазированный арсенопирит, ориентированный субпараллельно рассланцованности, и пирит, также катаклазированный и замещённый кварцем в ядерной части кристаллов, иногда замещающий арсенопирит: а – слабопроявленная филлитизация, анишлиф вкрест сланцеватости; б – слабопроявленная филлитизация, анишлиф параллельно сланцеватости; в, г – сильнопроявленная филлитизация, неясная слоистость

Третья группа – рудные метасоматиты жильных формаций (рис. 13), представляющие зальбандовые, призальбандовые и центральные части кварц-стибнитовых жил. Текстуры – от друзовых и прожилково-вкрапленных до массивных (сливной стибнит) и брекчиевидных, цвет определяется количеством стибнита и других сульфидов: от стально-серого (стибнит) и грязно-жёлтого (пирит+арсенопирит) до молочного белого (кварц). Нередко присутствуют ре-

ликты вмещающих углеродистых и карбонат-содержащих сланцев. Структуры – от микрозернистых до крупнозернистых с реликтовыми структурами исходных сланцев. Состав пород определяют кварц, стибнит, пирит, мусковит, арсенопирит и карбонаты (сидерит и анкерит), а также аксессуарный флюорит (<1%), выполняющий прожилки в дроблёном кварце, а также в виде включений в сливном стибните.



**Рис. 13.** Штуфные образцы, характерные для третьей группы пород: а-г – агрегаты кварца с прожилково-вкрапленными сульфидами на контакте с сульфидизированными вмещающими сланцами; д – агрегат дроблённого пирита, залеченного кварцем из призальбандовой зоны кварц-стибнитовых жил; е – желваки кварца с проникающим оруденением от прожилково-вкрапленного до сливного стибнита; ж-з – каверны выщелачивания карбонатов (?) из кварц-пиритовых (ж) и кварц-стибнитовых агрегатов (з); и – сливной стибнит с безкварцевым контактом дроблённых вмещающих углетизированных сланцев

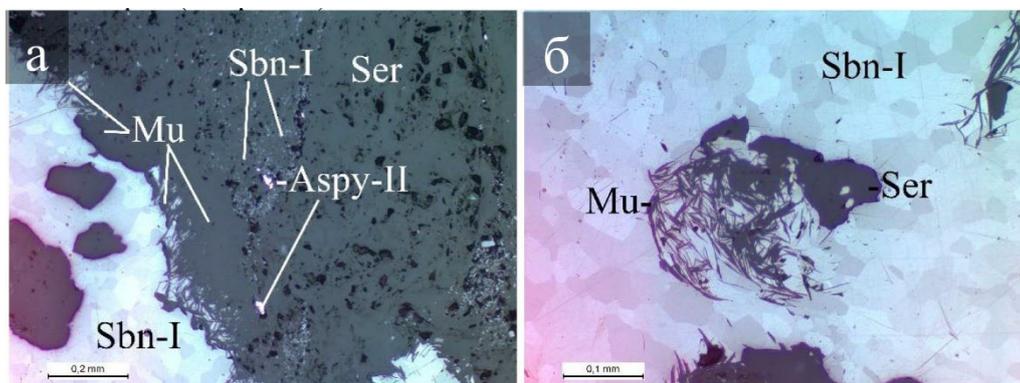


**Рис. 14.** Участки анилифов сливных стибнитовых руд с характерными ассоциациями нерудных минералов: а, б – включения кристаллов кварца; в – флюорит, залечивающий трещинки в стибните и заместивший первичный сульфидный минерал; г – крупные кристаллы сидерита и микровключения буланжерита в интерстициях стибнита. Оптические изображения в отражённом свете

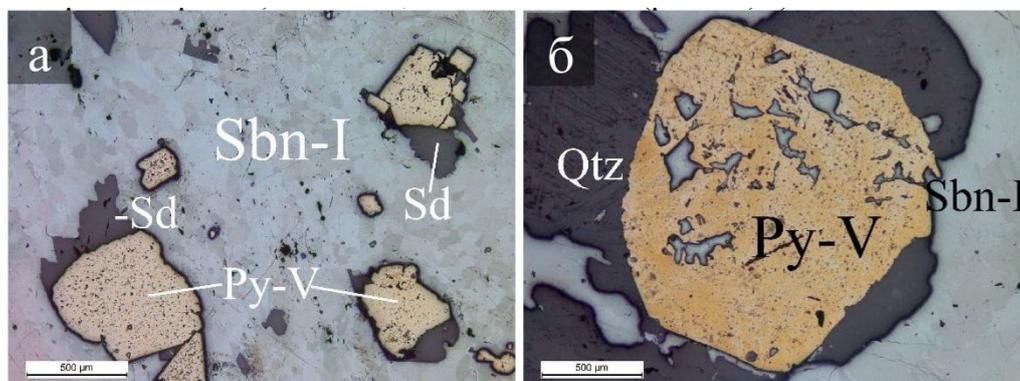
В массивном (сливном) стибните наблюдаются многочисленные вкрапления нерудных минералов (рис. 14): от крупных индивидов до микрозернистого рассеяно-вкрапленного кварца, кристаллы карбонатов железа, а также флюорит, замещающий сульфиды и залечивающий трещины. Нередко в призальбандовых частях в массивном стибните обнаруживаются микровключения тиоантимонатов свинца и железа – джемсонита, цинкениита и буланжерита. Иногда встречаются контактовые зоны рудных метасоматитов с вмещающими сланцами, в которых отсутствует кварц. При этом в агрегатах сливного стибнита обнаруживаются тонкие листовидные агрегаты (рис. 15), в срезе напоминающие волосы, сложенные мусковитом. Очевидно, мусковит претерпевал перекристаллизацию в местах контакта сурьма-несущих растворов, что подтверждается наблюдением схожих контактов в шлифах (рис. 4).

Помимо этого, в агрегатах сливной руды наблюдаются частые включения сульфидов – пирита и арсенопирита (рис. 16). Нередко к ним приурочены агрегаты гипидиоморфных кристаллов карбонатов и обособления кварца. В микротрещинках сливного стибнита иногда встречаются джемсонит и галенит.

Кристаллы пирита, связанного с ранними гидротермальными процессами, ассоциируют с крупночешуйчатым серицитом, а также с перистым и аллотриоморфнозернистым кварцем. Иногда изометричные образования пирита имеют зональные футлярообразные формы, подчеркнутые зонами кварц-мусковитового состава. Размеры зерен пирита составляют от 0.05 до 5 мм. Зёрна пирита часто корродированы жильными более поздними минералами, проникающими в центральные части зёрен в виде заливов и прожилков. Реже наблюдаются сrostки пирита и арсенопирита с отчётливым разъеданием зёрен арсенопирита.



**Рис. 15.** Листьевидные агрегаты мусковита на контактах вмещающих сланцев с массивным стибнитом: а – контакт стибнитовой прожилки и вмещающих углеродистых сланцев; б – кварц-серицитовое включение в сливных стибнитовых рудах. Оптические изображения в отражённом свете



**Рис. 16.** Включения кристаллов пирита с обрастающими их карбонатами в перекристаллизованном стибните: а – корродированные кристаллы пирита с обособлениями карбонатов железа в сливном стибните; б – замещение пирита стибнитом

В призальбандовых частях жил пирит встречается чаще и образует либо более крупные кристаллы, либо гроздьевидные агрегаты (рис. 16, а). Пирит часто пористый, поры заполнены кварцем, реже – карбонатами. В отличие от пирита вмещающих пород он не прорастает арсенопиритом, но замещается стибнитом (рис. 16, б).

Околорудные изменения вмещающих глинисто-сланцев на Удерейском месторождении выражены в окварцевании, серицитизации, сульфидизации (образовании пирита и арсенопирита) и локальной гидрослюдизации в призальбандовых участках стибнитовых и кварц-стибнитовых жил и сложных гнездово-прожилковых рудных зон.

Окварцевание, серицитизация и сульфидизация сопровождают как ранний золото-сульфидный прожилково-вкрапленный этап минерализации, так и поздний рудный жильный золото-кварц-стибнитовый этап. Гидрослюдизация проявлена заметно в виде прожилковых скоплений гидрослюды в призальбандовых участках сланцев, скорее всего, в завершающей стадии рудного процесса или даже позже.

Часто в межзерновых пространствах крупнозернистого агрегата кварца происходит перекристаллизация его в мелкозернистый агрегат. В ассоциации с кварцем постоянно, но в небольших количествах, отмечаются серицит и кальцит. Кальцит образует отдельные зерна неправильных очертаний. Серицит в виде разноориентированных чешуйчатых агрегатов тяготеет к межзерновым пространствам кварца, встречается иногда в виде прожилковидных скоплений и образует обогащенные участки в призальбандовых частях прожилков. Наряду с нерудными минералами в кварцевых прожилках отмечаются пирит, антимонит и редко арсенопирит. Пирит встречается в виде редких гипидиоморфных зерен и агрегатов. Сибнит в форме тонких прожилков, просечек и гнезд проникает между зернами кварца, выделяясь как наиболее поздний минерал этой ассоциации. Спорадически окварцевание сопровождается выделением пирита и арсенопирита.

Серицитизация развивается одновременно с окварцеванием. Серицит в виде отдельных чешуек и чешуйчатых агрегатов кристаллизуется вместе с поздними обособлениями мелкозернистого кварца и образует скопле-

ния в призальбандовых частях прожилков. В мелких кварцевых просечках серицит часто располагается поперек прожилков. Он отличается от тонкочешуйчатого серицита в феллитизированных сланцах более крупнокристаллическим характером, разноориентированным «свободным» расположением чешуйчатых агрегатов. Серицит глинисто-сланцев имеет метаморфогенный характер, чешуйки его расположены ориентированно по сланцеватости пород и находятся в иной парагенетической ассоциации. Масштабы собственно околорудной серицитизации незначительны.

Окварцевание отмечено в виде сети тонких кварцевых прожилков мощностью от долей до нескольких миллиметров в трещинках отрыва и послойных срывах в подробленных, вмещающих рудные зоны, сланцах. Окварцованные породы имеют аллотриоморфнозернистое строение с зубчатым характером контактов зерен кварца.

Гидрослюдизация проявлена нешироко, хотя минералы группы гидрослюды (преимущественно мусковит) как породообразующие входят в значительном количестве в состав вмещающих оруденение глинисто-сланцев (по данным рентгенофазового анализа). В штучных образцах отмечаются прожилковые мономинеральные скопления скрытокристаллических агрегатов гидрослюды бледного желтовато-зеленого (оливкового) цвета. Мощность прожилков – от долей миллиметра до 2–3 см. Они выполняют трещины отрыва, обусловленные механической сланцеватостью кварц-карбонатных углеродистых сланцев и поздними дислокационными процессами. Иногда гидрослюда образует примазки по плоскостям сланцеватости.

При исследовании аншлифов среди форм нахождения благородных металлов диагностирован только золотосодержащий арсенопирит, золото в нём присутствует в виде дискретных микровключений, а также в составе арсенопирита (до 2.4 мас. % Au).

Гораздо более богатая информация о благороднометалльной минерализации получена при изучении технологических продуктов обогащения – измельчённых исходных руд, концентратов и хвостов.

### Минеральный состав продуктов обогащения

По результатам рентгено-дифрактометрических исследований определены содержания нерудных минералов усредненной пробы исходных руд (рис. 17), а также во флотоконcentратах. Главные нерудные минералы – кварц, мусковит, полевые шпаты, хлорит и карбонаты. Среди полевых шпатов в исходных рудах резко преобладает ортоклаз, однако во флотоконцентратах диагностированы также плагиоклазы (1.8–1.9 мас. %), доля ко-

торых в исходных рудах остаётся ниже пределов обнаружения методами порошковой дифрактометрии. Аналогично исключительно в концентратах флотации отмечается еще один минерал группы гидрослюд – каолинит (1.3–2.3 мас. %). Главных рудных минералов, по наблюдениям в аншлифах, а также в полированных шлифах «тяжелых» HS-концентратов, только три: пирит, арсенопирит и стибнит. Средние химические составы установленных рудных минералов близки к стехиометрическим (табл. 3).

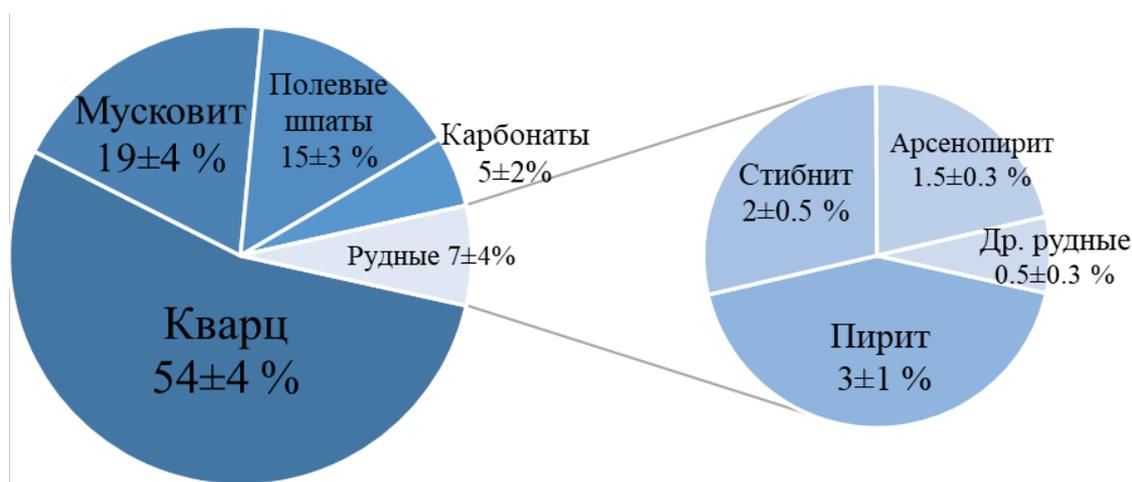


Рис. 17. Минеральный состав и соотношения главных минералов усреднённой технологической пробы Удерейских руд

Таблица 3. Средние химические составы главных рудных минералов Удерейского месторождения

Количество определений, n		S	Fe	As	Sb	Сумма	Элементы-примеси*
Пирит FeS <sub>2</sub>							
35	Мас. %	52.53	47.23			99.8	-
	К. ф.	1.94	1.00			2.94	
Мышьяковистый пирит FeS <sub>2</sub>							
70	Мас. %	52.14	45.37	1.76		99.3	Sb, Cu, Co, Ni, Se, Hg
	К. ф.	2.00	1.00	0.03		3.03	
Арсенопирит FeAsS							
117	Мас. %	20.32	35.35	44.08		99.76	Co, Ni, Sb, Au, Cu, Pb, Hg
	К. ф.	1.00	1.00	0.93		2.93	
Стибнит Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>							
117	Мас. %	27.3			72.1	99.4	As, Cu, Zn
	К. ф.	2.88			2.00	4.88	

\* В ряде химических анализов рудообразующих сульфидов отмечены следовые концентрации элементов-примесей (доли мас. %)

«Тяжелые» HS-концентраты всех изученных продуктов – пирит-арсенопиритовые (рис. 18), обогащенные и другими рудными

минералами, в том числе минералами благородных металлов. В основном наблюдаются мономинеральные зёрна, часто с мик-

ровключениями кварца, мусковита и различных рудных минералов.

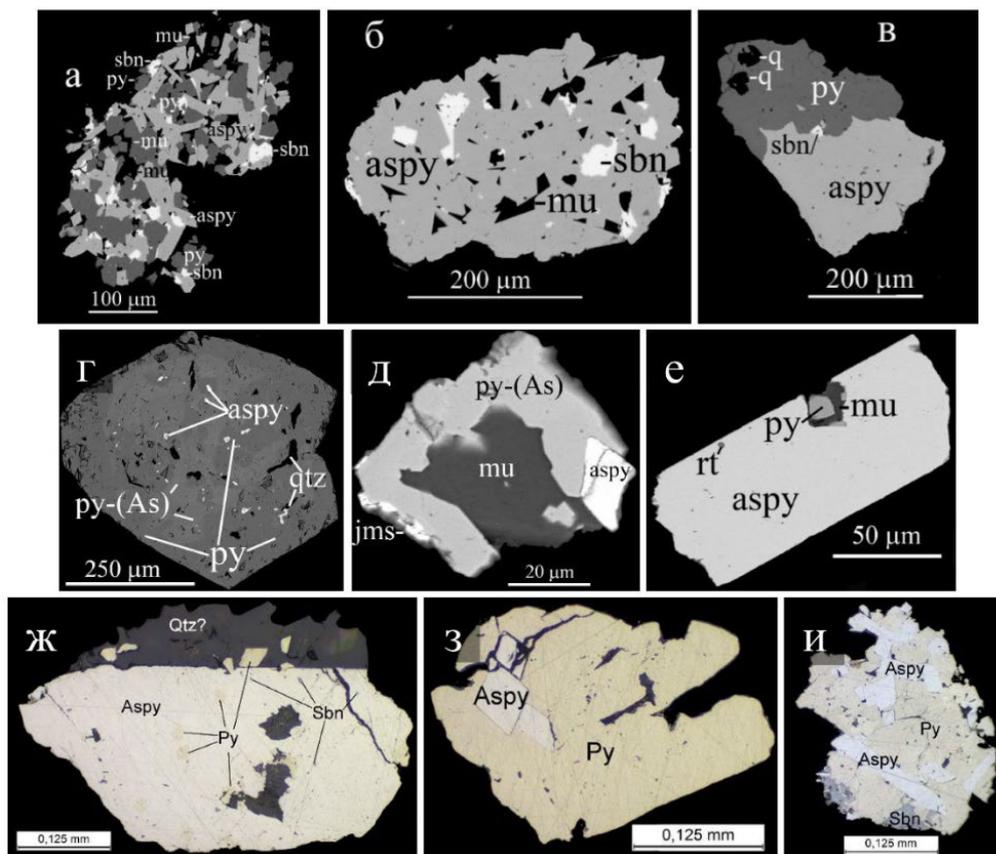
Для зерен пирита характерно присутствие в химическом составе примеси мышьяка (до 1,5% и более), в меньшем количестве – меди, кобальта и никеля.

Наиболее характерными минеральными включениями в пирите являются арсенопирит, тетраэдрит, блеклая руда, стибнит

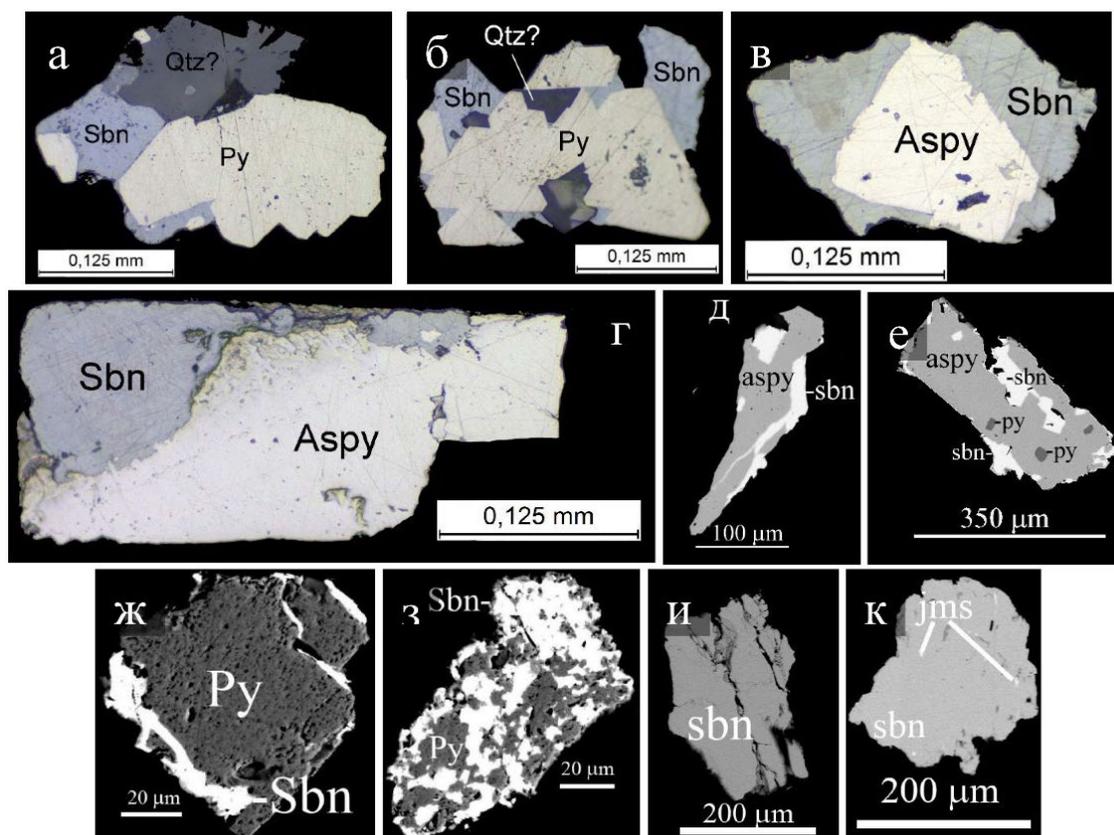
В составе зерен арсенопирита микросондовый анализ указывает на присутствие золота, что с учетом многократного повторения его фиксации свидетельствует о реальном его нахождении в минерале. Характерно, что золото в арсенопирите нередко сопровождается следовыми концентрациями свинца, в единичных случаях – ртутью. Другими элементами-примесями в арсенопирите являются сурьма, никель, кобальт.

Меньшая гидравлическая крупность стибнита (в сравнении с более тяжёлыми пиритом и арсенопиритом) обуславливает преимущественное его накопление в промежуточных и лёгких хвостах гидросепарации. Из этих продуктов также изготавливались шлифы. Среди рудных минералов основную часть зерен в таких продуктах составляют мономинеральные зёрна стибнита (рис. 19). В подчиненном количестве присутствует пирит. Очень редко обнаруживается арсенопирит. На зернах пирита часто присутствуют наружные каемки и налеты стибнита. Иногда пирит почти полностью замещается стибнитом (рис. 19, з).

В зёрнах стибнита часто наблюдаются микровключения минералов свинца – галенита, джемсонита и буланжерита.



**Рис. 18.** Характерные зёрна-сростки в «тяжёлых» HS-конcentратах Удерейских руд; полированные шлифы «тяжелых» концентратов; а-е – BSE-фото; ж-и – в отражённом свете. aspy – арсенопирит, py – пирит, sbn – стибнит, mu – мусковит, q – кварц, jms – джемсонит, py-(As) – мышьяковистый пирит



**Рис. 19.** Характерные сростки сульфидов в тяжёлых концентратах продуктов сурьмяной флотации: а, б – полиминеральные открытые сростки стибнита и пирита с кварцем; в – закапсулированный кристалл арсенопирита в стибните; г, д – удлинённые кристаллы арсенопирита, частично замещённые стибнитом; е – арсенопирит с плёнками стибнита и микровключениями пирита; ж – плёнки стибнита на кристалле пирита; з – почти полностью замещённый стибнитом пирит; и – трёхлобоватое мономинеральное зерно стибнита; к – стибнит с микровключениями джемсонита

### Благородные металлы в рудах Удере́йского месторождения и продуктах их обогащения

В «тяжелых» концентратах продуктов обогащения удерейских руд задокументированы более 140 индивидов самородного золота, из них 59 – в форме свободных зёрен и в открытых сростках с сульфидами. В то же время преобладающей формой нахождения золота во всех изученных пробах является золото в составе арсенопирита (до 2,4 мас. %, среднее 0,5–1,2 мас. %,  $n = 204$ ).

По химическому составу выделено четыре разных типа собственных минералов золота.

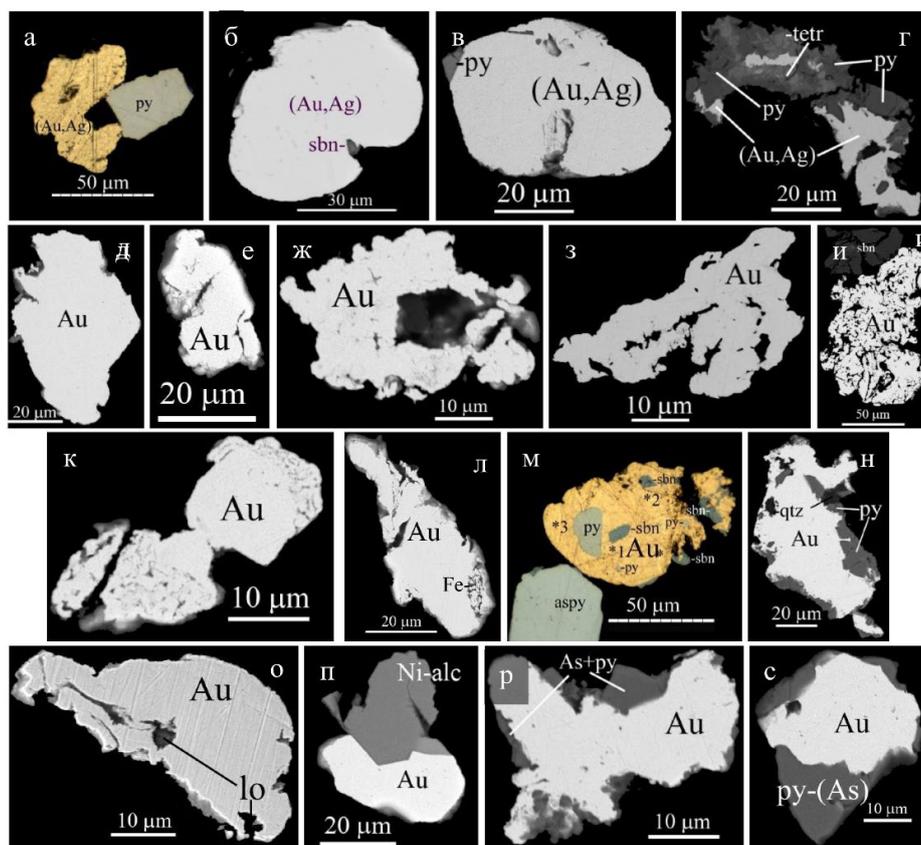
Первый тип – самородное золото (Au,Ag) – зерна, широко варьирующие по содержанию Au (рис. 20). Содержания Au широко варьируют как в различных зернах самородного золота в интервале 76–100 мас. %, так и в пределах одного зерна. В последнем случае, как правило, наблюдается зональность:

первичный состав минерала замещается высокопробным золотом до практически чистого металла от краев зерна и распределяется почти по всему его объёму. В единичных случаях в краевых участках диагностированы примеси меди (Cu 0,3–2,0 мас. %,  $n=4$ ). Нередко зёрна самородного золота этого типа содержат включения-обломки первичных сульфидов удерейских руд – пирита и стибнита-I (рис. 20, б, м-н). Таким образом, зерна самородного золота первого типа имели двухстадийное формирование: 1) первичная кристаллизация богатого Ag самородного золота; 2) вынос Ag и образование высокопробного (до 100% Au) самородного золота.

Второй тип – интерметаллиды золота: 1) палладистое золото (Au,Pd) – представлено отдельными участками состава (Au,Pd), до 8 мас. % Pd в пределах зёрен самородного золота, подробно описанные в соответствующей работе (Рудашевский и др., 2018); 2) сурьмянистое золото – локализованное в

краевых частях зёрен аурустибита; 3) медистое золото (Au,Ag,Cu) – диагностированное в единичных случаях в составах микровключений золота в пирите (до 14 мас. % Cu), а

также в краевых участках свободных зёрен золота из материала отвальных хвостов (0.2–2.3 мас. % Cu).



**Рис. 20.** Свободные зерна самородного золота, установленные в «тяжелых» концентратах различных технологических продуктов обогащения руд Удерейского месторождения; полированные шлифы; Au – высокопробное золото, (Au, Ag) – первичное самородное золото, tetr – тетраэдрит, py – пирит, sbn – стибнит, Fe – железистая плёнка, As+py – мышьяковистый пирит, Ni-alc – никелистый аллоклазит, lo – лёллингит, qtz – кварц

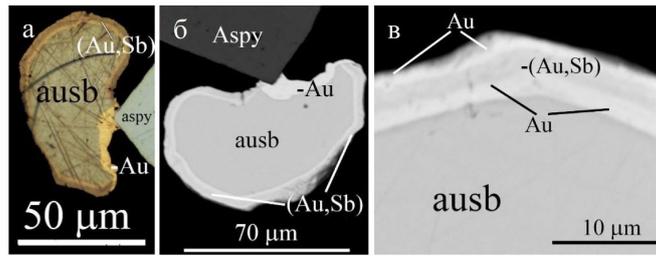
Третий тип минералов золота в удерейских рудах пробы НОК-3 представлен зернами аурустибита  $AuSb_2$  с тонкими зональными каймами сурьмянистого и высокопробного самородного золота (рис. 21). Сурьмянистое золото при этом варьирует по содержанию сурьмы ( $Sb = 3-6$  мас. %). Химический состав аурустибита постоянен и близок к стехиометрическому  $AuSb_2$  ( $Au - 44.7\%$ ,  $Sb - 55.3\%$ ).

Четвертый тип – многочисленные тонкие (доли микрометра – 10 мкм) неправильной формы включения высокопробного (практически чистого до 100%) золота в арсенопирите (рис. 22), реже в мышьяковистом пирите и стибните (рис. 22, в-г).

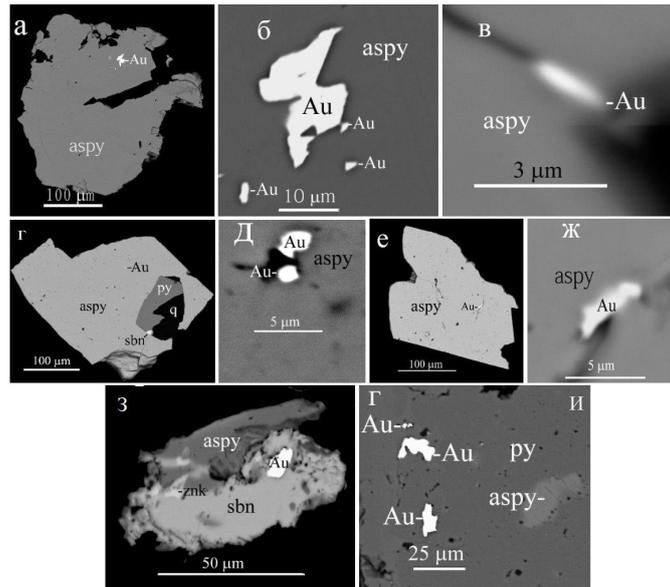
По результатам анализа составов различных форм нахождения золота, а также раз-

меров их обособлений построена треугольная диаграмма (рис. 23), отражающая закономерность наиболее широких вариаций составов для крупных (более 70 мкм) индивидов золота. В то же время более мелкие индивиды вносят больший вклад в баланс золота в изученных рудах и обладают более постоянным составом самородного золота, ближе к высокопробному.

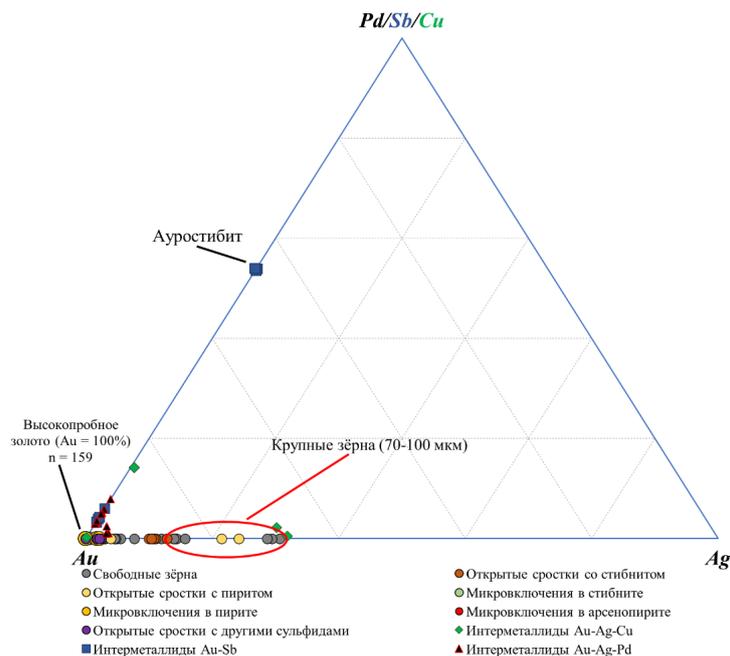
Наибольший вклад в баланс золота вносит золотосодержащий арсенопирит, в меньшей степени – крупные зёрна (22–67 мкм, среднее – 51 мкм,  $n=67$ ) самородного золота различной пробности ( $Au - 76-100$  мас. %), наименьший вклад вносят аурустибит  $AuSb_2$  и интерметаллиды – сурьмянистое ( $Au, Sb$ ) и палладистое ( $Au, Pd$ ) золото.



**Рис. 21.** Зерно аурустибита (*ausb*) с тонкими каймами сурьмянистого (*Au,Sb*) и высокопробного (*Au*) самородного золота; полированный илиф «тяжелого» концентрата руды, проба НОК-3; а – оптическое изображение в отраженном свете; б, в – BSE-фото



**Рис. 22.** «Тонкое» золото в рудах, проба НОК-3, полированные илифы «тяжелых» концентратов, BSE-фото; а – включения золота в арсенопирите; б – деталь фото (а); в-г, е – золото, локализованное по трещинам в арсенопирите; д – деталь (г); ж – деталь (е); *Au* – самородное золото, *aspy* – арсенопирит, *py* – пирит, *sbn* – стибнит, *q* – кварц



**Рис. 23.** Треугольник составов минералов золота в удерейских рудах

## Рудные минералы

Ниже приводится описание главных рудных минералов, обнаруженных в рудах Удгейского месторождения и технологических продуктах их обогащения.

**Пирит** является преобладающим рудообразующим минералом всех наблюдаемых типов руд. Он представлен несколькими генерациями и является сквозным практически для всех этапов и стадий рудообразования.

*Пирит-I* является наименее распространённым среди всех генераций ввиду раннего его формирования и представлен мелко- и тонкозернистым пиритом, сформированным метасоматически в процессе диагенеза. Характеризуется рассеянной вкрапленностью, приуроченной к неизменённым и слабоизменённым сланцам, а также отсутствием неизменённых реликтов.

*Пирит-II* развивается по пириту-I за счёт перекристаллизации. Часто локализуется внутри гнёзд и карбонатных микропорфиробластов или на их контактах с основной кварц-серицитовой массой. При этом, как правило, пирит в центральных частях порфиробласт карбонатов более крупный, имеет кристаллографические очертания в сравнении с краевыми образованиями, имеющими тонкозернистое обломочное строение.

*Пирит-III* представлен крупнозернистыми агрегатами, нередко глобулярно-сфероидальной формы, внутренняя часть которых часто выполнена нерудными минералами – заливным или замещающим кварцем и мелкозернистым мусковитом, редко встречаются включения кордиерита. В центре зональных зёрен пирита-III прослеживается частично перекристаллизованный пирит-II, что определяется различием химических составов – пирит-III часто мышьяковистый (As ~4 мас. %) и замещается арсенопиритом. Иногда в краевых частях таких агрегатов образуется переотложенный пирит-IV. Наиболее проявлен пирит-III в образцах, приуроченных к зонам дислокации, с явно выраженными текстурами волочения серицитовых слоек. В зонах активной арсенопиритизации пирит-III ассоциирует с арсенопиритом-I и золотом-II. Присутствие примесей мышьяка в октаэдрических метакристаллах

пирита, локализованных в серицит-хлоритовых прожилках, секущих слабоизменённые сланцы, указывает на его связь с генерацией пирита-III.

*Пирит-IV* в основном проявлен в виде массивных и густовкрапленных агрегатов вдоль сланцеватости и является главным рудным минералом малосульфидного кварц-жильного этапа минерализации. В отражённом свете установлены срастания пирита-IV практически со всеми рудными минералами, однако основной состав ассоциации определяют пирит-IV-сфалерит-арсенопирит-II. Иногда наблюдаются интенсивно деформированные массивные агрегаты сульфидов, трещины в которых залечены кварцем.

*Пирит-V* встречается в кварцевых и кварц-карбонатных жилах с прожилково-вкрапленным стибнитом. Макроскопически это правильной формы кубические кристаллы размерами 0.1–0.8 см, имеют спорадический характер проявления и не превышают 5–10% от общей массы жильного оруденения. Микроскопически обнаруживается коррозия зёрен поздними карбонатами и стибнитом. Пирит-V ассоциирует с арсенопиритом-III, стибнитом-I и бертьеритом-I, в нём отсутствуют примеси мышьяка и встречаются микровключения высокопробного золота.

*Пирит-VI* встречается в виде редких включений (размерами 0.2–0.7 см) в сливном стибните и гроздьевидными образованиями на контактах сливного стибнита с желваками жильного кварца. Характерны отсутствие ассоциаций с арсенопиритом, зональное замещение и разъедание стибнитом.

*Пирит-VII* представлен крупными кубическими кристаллами (до 1 см), локализованными в кавернах выщелачивания желвакового и массивного кварца. На таких кристаллах отсутствуют плёнки окислов, что указывает на пострудный характер минерализации, а идиоморфные очертания без коррозии – на их свободный рост после или совместно с удалением сернистыми растворами железистых карбонатов.

**Арсенопирит** является вторым главным минералом после пирита, и его распространённость ограничена развитием кварц-сульфидной и кварц-стибнитовой минерализацией. В основном проявлен в виде субсо-

гласно разноориентированных, удлинённых идиоморфных зёрен во вмещающих сланцах, а также в зальбандах и призальбандовых частях жил. На основе наблюдений выделены три генерации арсенопирита.

*Арсенопирит-I* приурочен к поздней стадии малосульфидной кварц-жильной минерализации, чаще всего наблюдается в виде удлинённых кристаллов, а также в трещинах пирита, где замещает мышьяковистый пирит вплоть до полных псевдоморфоз. Арсенопирит образует столбчатые и игольчатые с ромбовидным поперечным сечением зёрна, редко с зональным строением. Размеры зёрен – от 0.2 до 11 мм в длину и 0.05–0.7 мм в ширину. Содержание арсенопирита – от единичных вкраплений до 50% в массивных арсенопирит-пиритовых агрегатах. Характерной особенностью является кварцевая оторочка вокруг кристаллов арсенопирита, определяющая высокую интенсивность метасоматоза в процессе сульфидизации. В образцах из зон дислокации кристаллы пронизаны трещинами, залеченными кварцем. Чаще всего арсенопирит-I имеет примеси кобальта, никеля и цинка. В золотосодержащих разностях золото диагностируется исключительно в составе арсенопирита без видимых дискретных включений.

*Арсенопирит-II* образует как послойные срастания друг с другом, так и гнёзда в ассоциации с пиритом-IV и сфалеритом. Формы выделений в целом аналогичны арсенопириту-I. Обнаруженные в этом арсенопирите микровключения лёллингита, Ni-аллоклазита, кобальтина совместно с дискретными микровключениями высокопробного самородного золота свидетельствуют о том, что арсенопирит-II является продуктом перекристаллизации арсенопирита-I с образованием реликтовых минералов Ni, Co и Zn.

*Арсенопирит-III* относится к наименее развитой группе и образует спорадические высыпания игольчатых кристаллов как на контакте сланцев с кварц-стибнитовыми прожилками, так и в пределах бертьерит-стибнитовых прожилков в кварце. Такой арсенопирит имеет укороченные зёрна с разноориентированным направлением. При бескварцевом контакте вмещающих сланцев со стибнитовыми жилами арсенопирит-III про-

никает в сливной стибнит и замещается последним, образуя скелетные кристаллы. Предположительно арсенопирит-III является наиболее сильно изменённым и перекристаллизованным арсенопиритом первой генерации вследствие наложенного кварц-стибнитового оруденения.

**Стибнит** является главным минералом сурьмы в исследуемых золото-сурьмяных рудах. В основном образует совместно с бертьеритом либо прожилки и вкрапления в зальбандах, либо массивные (сливные) агрегаты в пределах центральных частей кварц-стибнитовых жил. Иногда, при бескварцевом контакте стибнитовых жил с вмещающими сланцами, иголки стибнита проникают в кварц-карбонат-серицитовую массу вкrest направления сланцеватости. Содержание стибнита варьирует в зависимости от локализации по отношению к участку жил, в центральных частях (массивные руды) до 90–98%, при размере зёрен от 0.1 до 1 см (в сечении), а в прожилково-вкрапленных – до 10–15% и размере зёрен – 0.01–0.5 см. Устойчиво выделяются три генерации стибнита.

*Стибнит-I* приурочен к прожилково-вкрапленным рудам, локализующимся в зальбандах жил. Характерны смешанные лепидо-нематобластовые и аллотриоморфно-зернистые агрегаты стибнита, а на контакте с кварцем – игольчатые. Стибнит-I ассоциирует с бертьеритом, макроскопически это проявляется как неравномерная зернистость. Иногда иголки стибнита проникают в массу серицитовых сланцев при бескварцевом контакте жил, замещая ранее образованные кристаллы пирита и арсенопирита.

*Стибнит-II* представлен реликтами первичных зернистых агрегатов стибнита, имеющих удлинённую форму зёрен, и заключённых в массивные перекристаллизованные нематобластовые агрегаты стибнита-III. Нередко в реликтовых зёрнах наблюдаются полисинтетические двойники давления различной ширины, перпендикулярные длинной оси.

*Стибнит-III* является милонитизированной, или перекристаллизованной, разновидностью стибнита первых двух генераций. Процессы изменения первичного стибнита обусловлены широким развитием поструд-

ных тектонических деформаций, которые нарушали целостность как вмещающих сланцев, так и кварц-сульфидных и кварц-стибнитовых жил, в результате чего образовывались также рудные брекчии стибнит-пирит-серицит-кварцевого состава. Стибнит-II и стибнит-III совместно образуют сливные руды, несущие в себе множество тончайших включений нерудных минералов – незаметные обломки кристаллов кварца и сидерита, чешуйки серицита, залечивающие трещины спайности флюорит и кальцит, а также редкие игольчатые кристаллы рутила (рис. 19). Для массивного стибнита наиболее характерна лепидо-нематобластовая структура с подчиненным развитием аллотриоморфных и гипидиоморфных зернистых и игольчатых агрегатов.

**Бертьерит**  $\text{FeSb}_2\text{S}_4$  в рудах развит подчиненно в сравнении со стибнитом. Как правило, он приурочен к краевым участкам прожилково-вкрапленных кварц-стибнитовых жил, где образует неравномерную вкрапленность. Содержание бертьерита в общей массе руд незначительно (до 5%). Он образует агрегаты зёрен неправильной, изометричной или линзовидной формы. По времени образования бертьерит сингенетичен стибниту первых двух генераций и также претерпевает наложенные метаморфизмом деформационные преобразования.

**Сфалерит** проявлен слабо – в отдельных аншлифах его содержание не превышает 10%. Развит главным образом в карбонат-кварц-стибнитовых прожилках в виде агрегатов зёрен неправильной формы с редкими двойниками роста, размер образований – от 0.2 до 15 мм. Нередко замещается стибнитом и ассоциирует с пиритом-IV- и арсенопиритом-II. Второстепенно ассоциирует с прожилково-вкрапленными стибнитом и бертьеритом в сопровождении микрокристаллов халькопирита.

**Халькопирит** является мало распространённым минералом. В основном наблюдается в ассоциации с бертьерит-стибнитовыми и карбонатными прожилками в кварце, заполняя промежутки между другими рудными минералами в виде аллотриоморфных микрокристаллов размерами до 0.08 мм. В целом можно выделить две генерации.

*Халькопирит-I* находится в ассоциации с пиритом-IV в пределах сфалеритовых включений в виде характерной для последнего эмульсионной вкрапленности.

*Халькопирит-II* диагностируется в аншлифах в бертьерит-стибнитовых прожилковых рудах, чаще в виде микровключений в карбонатах, иногда совместно с минералами группы блёклых руд.

**Минералы группы блёклых руд** относятся к редким минералам, их размеры значительно варьируют, но редко превышают 0.2 мм. По химическим составам преобладают разновидности, близкие к тетраэдриту, устойчивых закономерностей в распространении мышьяковистых или сурьмянистых разновидностей в зависимости от типа сульфидизации не наблюдается. Крайне редко наблюдается замещение блёклых руд стибнитом-I.

*Блёклая руда-I* проявлена в интенсивно деформированных агрегатах пирита-IV и замещает его по трещинам, образуя пластинчатые или неправильные формы зёрен.

*Блёклая руда-II* диагностирована в виде единичных самостоятельных каплеобразных скоплений в прожилках кварца, часто цементирует пирит-арсенопиритовые агрегаты.

**Джемсонит**  $\text{Pb}_4\text{FeSb}_6\text{S}_{14}$  очень редок и наблюдается в виде игольчатых кристаллов размерами до первых десятков микрометров в интерстициях зёрен бертьерита.

**Цинкениит**  $\text{Pb}_9\text{Sb}_{22}\text{S}_{42}$  и **Буланжерит**  $\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$  проявлены аналогично джемсониту, но исключительно в интерстициях кристаллов стибнита.

**Ульманнит**  $\text{NiSbS}$  крайне малораспространён и в основном наблюдается в ассоциации с арсенопиритом-II и пиритом-V в виде изометричных микровключений в кристаллах сульфидов, а также на их контакте с карбонатами. Размер зёрен не превышает 0.01 мм.

**Галенит** в основном представлен в виде тончайших вкраплений и прожилков в интерстициях массивного стибнита, размер которых редко превышает первые микрометры. Схожий характер присутствия галенита, буланжерита и джемсонита позволяет предположить их сингенетичное образование. Крайне редко встречаются гипидиоморфные

кристаллы галенита, размерами до 0.1 мм в пределах карбонатов, сопровождающих стибнит.

**Халькостибит** крайне редко наблюдается в виде единичных призматических кристаллов и их тонкозернистых агрегатах в ассоциации со стибнитом, бертьеритом и халькопиритом в кварце прожилково-вкрапленных руд.

**Кобальтин** встречается как в кварц-стибнитовой, так и в кварц-сульфидной ассоциации. Чаще находится в сростаниях с пиритом-V, образует идиоморфные изометричные зёрна, размерами не превышающими первые десятки микрометров.

**Минералы золота** представлены золото-содержащим арсенопиритом, самородным золотом, палладистым и сурьмянистым золотом и аурустибитом. На основе наблюдений характера сростаний минералов золота с сульфидами в рудах Удере́йского месторождения выделены четыре генетически обусловленные минеральные ассоциации золота (Аликин, 2021):

*Золото-I* (Au,Ag) – серебросодержащее, в виде включений в пирите-I и пирите-II в ассоциации с сульфосолями свинца и блёклыми рудами-I;

*Золото-II* – высокопробное самородное золото (98–100 мас. % Au) в виде тончайших включений в арсенопирите-II, часто в ассоциации с кобальт-никелевыми минералами и мышьяковистом пирите-III, а также золото в составе арсенопирита-I;

*Золото-III* – вторая генерация серебросодержащего золота в ассоциации с пиритом-V + сурьмянистое золото и аурустибит AuSb<sub>2</sub>, находящиеся в прожилках стибнита и бертьерита в кварце, а также палладистое золото в ассоциации с пиритом и арсенопиритом-III;

*Золото-IV* – наиболее позднее переотложенное высокопробное золото, тяготеющее к краевым частям зёрен золота-II и характеризующееся повышенной зернистостью и микропористостью, нередко поры заполнены оксидами железа.

С учётом всех полученных в ходе минералогических и петрографических исследований данных была дополнена и уточнена схема последовательности минералообразования в рудах Удере́йского месторождения,

которая представлена в работе (Дистанов и др., 1977). Минеральные виды и фазы, впервые обнаруженные на месторождении или ранее неучтённые, также добавлены в схему (рис. 24).

## Обсуждение результатов

Согласно схеме и с учётом задокументированных взаимоотношений рудных минералов, прослеживается многостадийная благороднометалльная минерализация.

Выявленное многообразие форм нахождения благородных металлов и анализ их взаимоотношений с ассоциирующими сульфидами и нерудными минералами указывают на как минимум два контрастных этапа рудогенеза – ранний и поздний. В пределах первого этапа выделяются две стадии минерализации – ранняя кварц-пиритовая, характеризующаяся преобладанием пирита ранних генераций, и поздняя колчеданная, где возрастает роль арсенопирита в формировании руд.

Между ранним и поздним этапами наблюдается некоторый разрыв во времени, подтверждаемый как геохронологическими данными (Неволько и Борисенко, 2009), так и контрастными минеральными ассоциациями. При этом поздний этап в целом представляет кварц-стибнитовую минерализацию. В её пределах выделяются несколько стадий: 1) кварц-стибнитовая, во время которой происходил активный привнос сурьмы среднетемпературными гидротермальными растворами;

2) пирит-стибнит-кварцевая, при которой преобладали процессы перекристаллизации первичных сульфидов (пирита и арсенопирита), их замещения стибнитом; при этом снижалась концентрация растворов, содержащих сурьму, свинец, никель, кобальт и др.;

3) пирит-арсенопирит-стибнитовая стадия, во время которой новое вещество уже не привносилось и происходили почти исключительно процессы перекристаллизации и перераспределения отложенных рудных компонентов.

Металлогенетические эпохи		Позднепрерифейская					Альпийская	
Этапы минерализации		Предрудный	Ранний рудный		Поздний рудный		Пострудный	
Стадии минерализации		Метаморфическая	Кварц-пиритовая	Кварц-арсенопиритовая	Кварц-стибнитовая	Пирит-стибнит-кварцевая	Пирит-арсенопирит-стибнитовая	Гипергенная
Парагенезисы		Кварц-полевошпатовый, кальцит-хлорит-серцитов-пиритовый	Кварц-пиритовый	Колчеданный	Кварц-пирит-стибнитовый	Стибнит-пирит-полиметаллический	Арсенопирит-пирит-стибнитовый	Гематит-скородитовый
Кварц	SiO <sub>2</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Мусковит	KAl <sub>3</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Хлорит	(Mg,Fe) <sub>3</sub> Al(Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Рутил	TiO <sub>2</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Анкерит	Ca(Fe <sup>2+</sup> ,Mg)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Сидерит	FeCO <sub>3</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Кальцит	CaCO <sub>3</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Флюорит	CaF <sub>2</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Пирит	FeS <sub>2</sub>	I ——— II	III ——— IV	—————	V ——— VI	—————	VII ———	—————
Арсенопирит	FeAsS	—————	I ———	—————	II ——— III	—————	—————	—————
Стибнит	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	—————	—————	—————	I ——— II ——— III	—————	—————	—————
Бертьерит	FeSb <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Джемсонит	Pb <sub>4</sub> FeSb <sub>6</sub> S <sub>14</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Буланжерит	Pb <sub>5</sub> Sb <sub>8</sub> S <sub>11</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Цинкениит	Pb <sub>9</sub> Sb <sub>27</sub> S <sub>42</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Галенит	PbS	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Сфалерит	ZnS	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Халькопирит	CuFeS <sub>2</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Халькостибит	CuSbS <sub>2</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Теннантит	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Тетраэдрит	Cu <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Сульфиды Ni-Co*		—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Кобальтин	CoAsS	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Самородное золото	(Au,Ag,Cu)	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Высокопробное золото	Au	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Палладистое золото	(Au,Pd)	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Сурьмянистое золото	(Au,Sb)	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Ауростибит	AuSb <sub>2</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Гематит	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Скородит	Fe <sup>3+</sup> AsO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	—————	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Околорудные изменения вмещающих пород		-	Окварцевание Серцитизация Сульфидизация		Окварцевание Сульфидизация		Гематитизация Гидросульфидизация	
Форма залегания горных пород		Слои и пласты кварц-карбонатных углеродистых сланцев с вкраплениями пирита	Плоскообразные субогласные тела в сланцах		Жильные образования в пределах зон сульфидизации	Сложносетчатая система прожилков	Мелкие прожилки и вкрапления	Каверны, зоны окисления и выщелачивания

Рис. 24. Уточнённая парагенетическая схема последовательности минералообразования в рудах Удерейского месторождения (по Дистанов и др. 1977)

Первичные самородное золото (Au,Ag) и высокопробное золото, образовавшиеся в ранний кварц-пиритовый этап, претерпевали многостадийные наложенные процессы метасоматического преобразования и перекристаллизации при позднем кварц-стибнитовом этапе. Палладистое золото образовывалось путём осаждения палладия в краевых участках первичных золотин из среднетемпературных гидротермальных растворов во время реализации ранней кварц-пирит-стибнитовой формации. Существенной миграции палладия способствовала насыщенность первичных сурьмя-несущих растворов летучими хлоридными соединениями.

Характер сростаний и преобладающая позиция высокопробного золота свидетельствуют об интенсивных процессах ремобилизации, перекристаллизации и переотложения золота в связи с выносом изначальных

примесей Ag и Cu. Ауростибит и сурьмянистое золото являются наиболее поздними минеральными фазами золота. Ауростибит формировался метасоматически, замещая первичное (Au,Ag) и высокопробное золото при их контакте со стибнитом, а сурьмянистое золото образует тонкие реакционные каймы по ауростибиту в завершающих стадиях кварц-стибнитового этапа минералообразования и в начале гипергенеза – при окислении и выветривании пород.

### Заключение

Изучены и оценены минералоготехнологические особенности руды Удерейского золото-сурьмяного месторождения с позиций современных представлений об изучении вещественного состава минерального сырья в соответствии с общепринятыми

методиками и оригинальными разработками. Исследования образцов руды и специально подготовленных препаратов методами растровой электронной микроскопии позволили выделить на месторождении новые минеральные фазы, что в комплексе с изучением взаимоотношений минералов дало возможность уточнить и дополнить схему стадийности образования минералов благородных металлов и сопровождающих их других рудных минералов.

Наиболее важные результаты:

1. Выявлены минеральные формы нахождения и оценено распределение Au, Pd, Ag в руде Удере́йского месторождения и продуктах её обогащения. Важными минеральными формами нахождения золота являются преобладающие золотосодержащий арсенопирит и самородное золото (Au,Ag), а также редкие аурустибит  $\text{AuSb}_2$  и интерметаллиды (Au,Cu), (Au,Sb) и (Au,Pd).

2. Установлены особенности химических составов минералов-концентраторов Au, Pd и Ag. Содержания Au широко варьируют как в различных зернах самородного золота в интервале 76–100 мас. %, так и в пределах одного зерна. Первичное самородное золото (Au,Ag) замещается высокопробным золотом до практически чистого Au 100% от краев зерна и распределяется почти по всему его объему. В кристаллах аурустибита установлены признаки метасоматического изменения, выраженные зональными корочками сурьмянистого золота с меняющимися содержаниями Sb (3–6 мас. %) и практически чистого самородного золота. Химический состав аурустибита близок к стехиометрическому (Au – 44.7%, Sb – 55.3%). Палладистое золото, являющееся одним из наиболее ценных компонентов руд Удере́йского месторождения, представлено обособленными участками преимущественно в краевых частях зерен золота, величиной 40–60 мкм.

3. Установлены особенности химических составов главных рудообразующих минералов – стибнита, арсенопирита и пирита. Среди зерен пирита часто наблюдается его мышьяковистая разновидность (As ~1.76 мас. %). При этом совместно с мышьяком иногда обнаруживаются следовые концентрации Sb, Cu, Co и Ni (доли мас. %), в единичных случаях прослежены первые до-

ли мас. % селена и ртути. Состав арсенопирита в среднем близок к стехиометрическому, реже в качестве примесных элементов встречаются кобальт, никель, сурьма, еще реже золото (до 2.4 мас. % Au,  $Au_{\text{ср}} = 0.7$  мас. %,  $n = 35$ ) и медь, в единичных зёрнах диагностированы первые доли мас. % ртути. Состав стибнита в целом близок к стехиометрическому ( $Sb_{\text{ср}} = 71.68$  мас. %,  $S_{\text{ср}} = 28.32$  мас. %,  $n = 117$ ), тем не менее иногда в зёрнах стибнита встречаются тонкие прожилки сульфосолей и сульфидов свинца, что приводит к повышенному содержанию тяжёлых металлов в нем. Кроме свинца встречаются также примеси мышьяка, цинка и меди.

Выявленное многообразие форм нахождения благородных металлов указывает на как минимум два контрастных этапа рудогенеза. Последующий анализ условий формирования каждой выявленной минеральной ассоциации золота и сопоставление с опубликованными данными параметров рудоносных растворов и расчётных температур минералообразования позволит установить принадлежность каждой формации к конкретным этапам и стадиям рудообразования и окончательно определить происхождение сурьмяной минерализации Удере́йского месторождения.

### Библиографический список

Аликин О.В. Минеральные ассоциации золота в рудах Удере́йского золото-сурьмяного месторождения (Красноярский край) / Новое в познании процессов рудообразования. М.: ИГЕМ РАН, 2021. С. 41–44.

Антипов И.В. Отчет о геологоразведочных работах на Удере́йском золото-сурьмяном месторождении с оценкой запасов золота и сурьмы по состоянию на 01.01.2011 г. Отчет. Красноярск, 2010. 244 с.

Бутько Е.Р. Генезис золото-арсенопирит-пиритовых руд Удере́йского месторождения (Енисейский край) / Мельниковские чтения-2016. Благовещенск: ФГБОУ ВПО АмГУ, 2016. С. 40–43.

Власов Е.А., Бакшеев И.А., Нагорная Е.В., Прокофьев В.Ю., Аплеталин А.В., Свинтицкий И.Л. Минеральная зональность и условия формирования Au-Sb месторождения Удере́й, Красноярский край / Минеральное разнообразие – исследование и сохранение. София, 2011. С. 85–90.

Дистанов Э.Г., Оболенский А.А., Кочеткова К.В., Борисенко А.С. Удереysкое сурьмяное месторождение в Енисейском краже / Геология и генезис рудных месторождений юга Сибири. Новосибирск: АН СССР. Сиб. отд. Тр. ин-та геологии и геофизики, 1977. С. 5–32.

Жариков М.Г. Месторождения сурьмы / Рудные месторождения СССР. М.: Недра, 1978. С. 269–284.

Журавлева А.А., Стреляев В.И. Структура, вещество и история Удереysкого блока Ильинского выступа (Татарский антиклинорий, Енисейский краж) / Структура, вещество история литосферы Тимано-Североуральского сегмента. Сыктывкар: Геопринт, 2013. С. 56–58.

Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах / Ред. Курбанов Н.К. М.: ЦНИГРИ, 1999. 175 с.

Нарсеев В.А. Промышленная геология золота. М.: Научный мир, 1996. 243 с.

Неволько П.А., Борисенко А.С. Этапы формирования золотого и сурьмяного оруденения Енисейского кража и их корреляция с периодами проявления магматизма / Металлогения древних и современных океанов. Миасс: ИМин УрО РАН, 2009. С. 37–42.

Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука. 1983. 287 с.

Оболенский А.А., Гуцина Л.В., Борисенко А.С., Боровиков А.А., Неволько П.А. Компьютерное термодинамическое моделирование переноса и

отложения сурьмы и золота при формировании Au-Sb месторождений // Геология и геофизика, 2009. Т. 50. № 11. С. 1227–1245.

Петровская Н.В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). М.: Наука, 1973. 348 с.

Рудашевский В.Н., Рудашевский Н.С., Антонов А.В., Набиуллин Ф.М., Пастухов Д.М. Технологическая минералогия золота // Записки Российского минералогического общества. 2017. № 1. С. 103–125.

Рудашевский Н.С., Горбунов А.А., Антонов А.В., Аликин О.В., Рудашевский В.Н., Боброва О.В. Палладистое золото (Au, Pd) в золото-сурьмяных рудах Удереysкого месторождения, Енисейский краж // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 492–496.

Сазонов А.М., Ананьев А.А., Полева Т.В., Хохлов А.Н., Власов В.С., Звягина Е.А., Федорова А.В., Тишин П.А., Леонтьев С.И. Золоторудная металлогения Енисейского кража: геолого-структурная позиция, структурные типы рудных полей // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. 2010. Т. 3. № 4. С. 371–395.

Сильянов С.А., Некрасова Н.А. Термодинамические обстановки рудообразования месторождений золота Енисейского кража // Тр. Всерос. ежегод. семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. М.: ГЕОХИ РАН, 2018. С. 232–235.

## Mineralogical and Petrographic Features and Mineral Formation Sequence of Gold-Antimony Ores from Udereyskoe Deposit (Krasnoyarsk Region)

O.V. Alikin, A.V. Chumakov, V.N. Rudashevsky

CNT Instruments LLC, 69 Shosse Revolutsii Str., lit. I, Saint Petersburg 195279, Russia.

E-mail: o.v.alikin@yandex.ru

The article presents results of petrographic and mineralogical studies of gold-antimony ores of the Udereyskoe deposit and their concentration products. The main mineral associations of ores are characterized, mineral forms of occurrence are revealed, and distribution of Au, Pd, Ag is estimated. The paragenetic scheme of mineral formation sequence was clarified and supplemented. The important mineral forms of gold occurrence are gold-bearing arsenopyrite and native gold (Au,Ag), as well as rare aurostibite AuSb<sub>2</sub> and intermetallides such as antimony gold (Au,Sb), and palladium gold (Au,Pd). The revealed diversity of forms of noble metals and analysis of their relationships with associating sulfides and nonmetallic minerals indicate at least two contrasting early and late stages of ore genesis. Early quartz-pyrite and late pyrite, which are two stages of mineralization, are determined within the early stage. Three consecutive stages of mineralization are established in the late stage: quartz-stibnite, pyrite-stibnite-quartz, and pyrite-arsenopyrite-stibnite.

Key words: native gold; aurostibite; palladium gold; hydroseparation; Udereyskoe deposit; stibnite; arsenopyrite; pyrite; gold-antimony ores.

## References

- Alikin O.V.* 2021. Mineralnye assotsiatsii zolota v rudakh Udereyskogo zoloto-surmyanogo mestorozhdeniya (Krasnoyarskiy kray) [Mineral associations of gold in the ores of the Udereyskoe gold-antimony deposit (Krasnoyarskiy kray)]. *In: Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya*. Moskva, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, pp. 41–44. (in Russian)
- Antipiev I.V.* 2010. Otchyot o geologorazvedochnykh rabotakh na Udereyskom zoloto-surmyanom mestorozhdenii s otsenkoy zapasov zolota i surmy po sostoyaniyu na 01.01.2011 [Report on geological exploration at the Udereyskoe gold-antimony deposit with an assessment of reserves of gold and antimony as of 01.01.2011]. Krasnoyarsk, p. 244. (in Russian)
- Butko E.R.* 2016. Genezis zoloto-arsenopirit-piritovykh rud Udereyskogo mestorozhdeniya (Eniseyskiy kryazh) [Genesis of gold-arsenopyrite-pyrite ores of Udereyskoe deposit (Yeniseyskiy ridge)]. *In: Melnikovskie chteniya – 2016, Blagoveshchensk, AmSU*, pp. 40–43. (in Russian)
- Dystanov E.G., Obolenskiy A.A., Kochetkova K.V., Borisenko A.S.* 1977. Udereyskoe surmyanoe mestorozhdenie v Eniseyskom kryazhe [Udereyskoe antimony deposit in the Yeniseyskiy ridge]. *In: Geology and genesis of ore deposits in southern Siberia*. Novosibirsk: Siberian Branch of USSR Academy of Sciences. Institute of Geology and Geophysics, pp. 5–32. (in Russian)
- Zoloto-sulfidnye mestorozhdeniya v yglerodistoterrigennykh tolshchakh* [Gold-sulfide deposits in carbonaceous-terrigenous strata]. *Ed. Kurbanov N.K.* Moscow, Central Research Geological Exploration Institute of Non-Ferrous and Noble Metals, p. 175. (in Russian)
- Narseev V.A.* 1996. Promyshlennaya geologiya zolota [Industrial geology of gold]. Moskva, Nauchnyy mir, p. 243. (in Russian)
- Nekrasov I.Ya.* 1983. Geokhimiya, mineralogiya i genesis zolotorudnykh mestorozhdeniy [Geochemistry, mineralogy and genesis of gold deposits]. Moskva, Nauka, p. 287. (in Russian)
- Nevolko P.A., Borisenko A.S.* 2009. Etapy formirovaniya zolotogo i surmyanogo orudneniya Eniseyskogo kryazha i ikh korrelyatsiya s periodami proyavleniya magmatizma [Stages of formation of gold and antimony mineralization of the Yenisey ridge and their correlation with periods of magmatism]. *In: Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov*. Miass, Institute Mineralogii, Urals Branch, RAS, pp. 37–42. (in Russian)
- Obolenskiy A.A., Gushchina L.V., Borisenko A.S., Borovikov A.A., Nevolko P.A.* 2009. Kompyuternoe termodinamicheskoe modelirovanie perenosa i otlozheniya surmy i zolota pri formirovanii Au-Sb mestorozhdeniy [Computer thermodynamic modeling of antimony and gold deposition during formation of Au-Sb deposits]. *Geologiya i Geofizika*, pp. 1227–1245. (in Russian)
- Petrovskaya N.* 1973. Samorodnoe zoloto (obshchaya kharakteristika, tipomorfizm, voprosy genezisa) [Native gold (general characteristics, typomorphism, genesis problems)]. Moskva, Nauka, p. 348. (in Russian)
- Rudashevskiy V.N., Rudashevskiy N.S., Antonov A.V., Nabiullin F.M., Pastukhov D.M.* 2017. Tekhnologicheskaya mineralogiya zolota [Technological gold mineralogy]. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*, pp. 103–125. (in Russian)
- Rudashevskiy N.S., Gorbunov A.A., Antonov A.V., Alikin O.V., Rudashevskiy V.N., Bobrova O.V.* 2019. Palladistoe zoloto (Au, Pd) v zoloto-surmyanykh rudakh Udereyskogo mestorozhdeniya, Eniseyskiy kryazh [Palladium gold (Au, Pd) in gold-antimony ores of the Udereyskoe deposit, Yenisey ridge]. *In: Trudy Fersmanovskoy nauch. sessii GI KNTs RAN*, pp. 492–496. (in Russian)
- Sazonov A.M., Ananyev A.A., Poleva T.V., Khokhlov A.N., Vlasov V.S., Zvyagina E.A., Fedorova A.V., Tishin P.A., Leontev S.I.* 2010. Zolotorudnaya mineralizatsiya Eniseyskogo kryazha: geologo-strukturnaya pozitsiya, strukturnye tipy rudnykh poley [Gold metallogeny of the Yenisei Ridge: geological and structural position, structural types of ore fields]. *Zhurnal Siberskogo Federalnogo Universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, pp. 371–395. (in Russian)
- Silyanov S.A., Nekrasova N.A.* 2018. Termodinamicheskie obstanovki rudoobrazovaniya mestorozhdeniy zolota Eniseyskogo kryazha [Thermodynamic conditions of ore formation of gold deposits of the Yenisei Ridge]. *In: Trudy Vseros. ezhegod. seminarov po eksperim. mineralogii, petrografii i geokhimii*. Moskva, Institute after Vernadskiy RAN, pp. 232–235. (in Russian)
- Vlasov E.A., Baksheev I.A., Nagornaya E.V., Prokofev V.Yu., Svintitskiy I.L.* 2011. Mineralnaya zonalnost i usloviya formirovaniya Au-Sb mestorozhdeniya Uderey, Krasnoyarskiy kray [Mineral zoning and formation conditions of Au-Sb deposit Uderey, Krasnoyarskiy kray]. *In: Mineralnoe*

raznoobrazie – issledovanie i sokhranenie. Sofiya, pp. 85–90 (*in Russian*).

*Zharikov M.G.* 1978. Mestorozhdeniya surmy [Antimony Deposits]. In: Rudnye mestorozhdeniya USSR. Moskva, Nedra, pp. 269–284. (*in Russian*)

*Zhuravleva A.A., Strelyaev V.I.* 2013. Struktura, veshchestvo i istoriya Udereyskogo bloka Ilinskogo

vystupa (Tatarskiy antiklinoriy, Eniseyskiy kryazh) [Structure, substance and history of the Uderey block of the Ilyinsky flange (Tatar anticlinorium, Yenisey Ridge)]. In: Struktura, veshchestvo i istoriya litosfery Timano-Severouralskogo segmenta. Syktyvkar, Geoprint, pp. 56–58. (*in Russian*)