

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД ЗОЛОТОНОСНЫХ МЕТАСОМАТИТОВ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУТЫН (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)© 2022 г. А. М. Азарян^{1, 2, *}, д. чл. Е. В. Баданина¹, И. С. Анисимов²¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия²АО “Полиметалл Инжиниринг”,
просп. Народного Ополчения, 2, Санкт-Петербург, 198216 Россия

*e-mail: adel-sagitova@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.09.2021 г.

После доработки 13.04.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

В статье приведены первые результаты минералогических исследований золотоносных кварц-карбонат-серицитовых метасоматитов месторождения Кутын, Хабаровский край. Изучены минеральные ассоциации с самородным золотом, вариации его форм, размеров и химического состава. Установлено, что самородное золото пробностью 650–780 ‰ ассоциирует со Sb-содержащим арсенопиритом, пиритом, блеклыми рудами, галенитом, гесситом. Более высокопробное золото (810–850 ‰) выполяет трещинки в арсенопирите. Пробность золота из кварцевых прожилков составляет 730–770 ‰. Теллуридная минерализация представлена гесситом, алтаитом, петцитом, штютцитом, теллурантимоном, колорадоитом. На основании анализа состава минералов, их морфологии, характера взаимоотношений, а также примесного состава пирита (до 6.9 мас. % As) и арсенопирита (до 2.8 мас. % Sb и до 5.4 мас. % Te) – сквозных минералов для данной системы, выделяются четыре последовательные рудные ассоциации гидротермально-метасоматического этапа: пирит-арсенопиритовая, золото-тетраэдрит-арсенопиритовая, золото-пиритовая, теллуридная. Гипергенный этап заключается в развитии гётит-арсенатной ассоциации с образованием субмикронных включений самородного золота при окислении золотосодержащих пирита и арсенопирита. На основе хлоритового геотермометра (Cathelineau, Nieva, 1985) установлено, что температура раннего проявления метасоматического процесса соответствует интервалу 229–278 °С. В соответствии с диаграммой стабильности системы Au–Ag–Te (Бортников и др., 1988) температура образования золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации не может быть ниже 170 °С. Впервые оценены узкие вариации значений фугитивности серы ($\lg S_2$ от –16.8 до –15.0) и теллура ($\lg Te_2$ от –16.5 до –15.2) при 200 °С, соответствующие образованию изученной золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации.

Ключевые слова: месторождение Кутын в Хабаровском крае, самородное золото, золото-теллуридная минерализация, пирит, арсенопирит, кварц-карбонат-серицитовые метасоматиты

DOI: 10.31857/S0869605522030017

ВВЕДЕНИЕ

Месторождение Кутын расположено в Тугуро-Чумиканском районе Хабаровского края России, в южной части Тугурского полуострова между Тугурским и Ульбанским заливами, в 113 км к северо-востоку от Албазинского золоторудного месторождения.

Месторождение было открыто геологами Дальневосточного территориального геологического управления в 70-ые годы XX в. и считается перспективным для разработки на золото (Забродин и др., 2007). Однако публикации об этом месторождении единичны и касаются в основном анализа его геолого-структурных особенностей (Малых, 2014), общего минерального состава руд (Малых, 2015). В работе (Трушин и др., 2021), посвященной магматогенным рудоносным системам месторождений золота Ульбанского террейна, месторождение Кутын рассматривается как гипабиссальная интрузивно-купольная магматогенная рудоносная система.

В настоящей статье приводятся результаты изучения типоморфизма и химического состава сульфидов, сульфосолей, теллуридов, самородного золота месторождения Кутын. На основании исследования рудной минерализации выделяются парагенетические рудные ассоциации и оцениваются условия их образования.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Золоторудное месторождение Кутын расположено в северо-западной части Ульбанского турбидитового террейна Монголо-Охотского орогенного пояса (Ханчук, Иванов, 1999; Шевченко и др., 2014). Согласно районированию золотоносных площадей юга Дальнего Востока, оно относится к Нижнеамурской зоне Сихотэ-Алинской провинции Тихоокеанского золотоносного пояса (Эйриш, Сорокин, 2005).

Вмещающими породами месторождения являются юрские терригенные породы (В.И. Савинков, 2013 г.) (рис. 1). Нижнеюрские отложения представлены кутынской и алгатинской толщами. Кутынская толща сложена разномерными песчаниками, алевролитами с линзами кремнистых и глинисто-кремнистых пород, седиментационными брекчиями и конгломератами. Алгатинская толща представляет собой среднезернистые песчаники с гравийными обломками, с редкими прослоями и линзами седиментационных брекчий, алевролитов. Залегающая выше среднеюрская тропинкинская толща представлена песчаниками и алевролитами с прослоями кремнистых и глинисто-кремнистых пород. Породы толщ смяты в линейные складки северо-восточного простирания.

Выше с угловым несогласием залегают меловые вулканиты, представленные андезибазальтами, андезитами, дацитами, их туфами, лавобрекчиями, туффитами.

Интрузивные породы месторождения относятся к Ульбанской вулcano-плутонической ассоциации. Позднемеловой Биранджинский интрузив представлен тремя фазами: I фаза – габбродиориты, диориты, диоритовые порфиры; II фаза – кварцевые диориты, гранодиориты, гранодиорит-порфиры; III фаза – граниты, гранит-порфиры, дайки аплитов. Наибольшее распространение получили гранодиориты второй фазы, которыми на территории месторождения сложен штокообразный массив площадью около 12,5 км² (рис. 1). Эти гранодиориты подверглись интенсивной метасоматической переработке, с которой связана рудная минерализация. Вмещающие породы ороговикованы. Дайковый комплекс представлен позднемеловыми базальтами, андезитами, дацитами, риолитами. Дайки андезитов занимают секущее положение по отношению к гранодиоритам, распространены в частности и в пределах Геофизической рудной зоны, где на них также накладываются метасоматические изменения.

На месторождении Кутын выделено 10 основных рудных зон, расположенных в эндо- и экзоконтактах Биранджинского массива. В серицит-кварцевых метасоматитах, развивающихся по песчаникам, локализованы рудные зоны Седловинная, Итыльская, Юбилейная, Южная, Открытая, Родниковая, Дельбинская, по гранодиоритам – Геофизическая, Джутаты, Перевальная. В центральных частях зон метасоматитов размещаются линейные штокверки прожилков кварц-серицит-карбонатного состава и брекчии с кварцевым цементом, характеризующиеся высоким содержанием золота

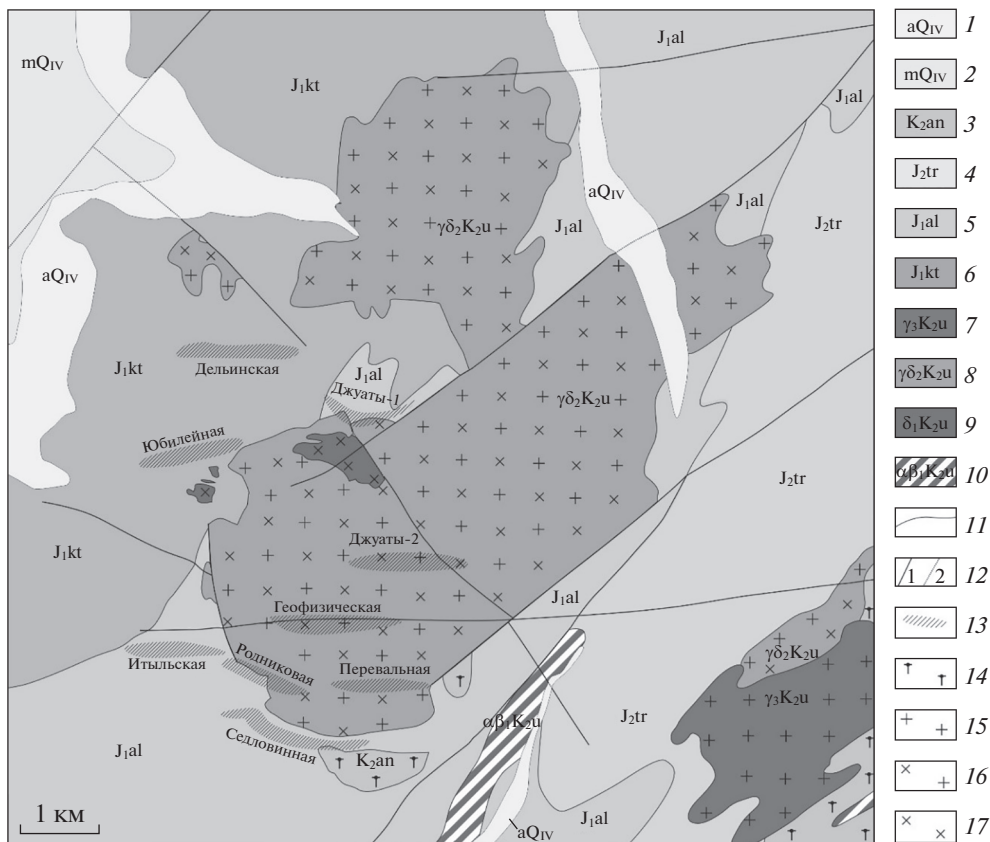


Рис. 1. Схематическая геологическая карта месторождения Кутын (по В.И. Савинкову, 2013 г.).

1 – aQ_{IV} аллювиальные, морские галечники, валунники, пески, иловые супеси; 2 – mQ_{IV} морские, аллювиально-морские галечники, пески, глины; 3 – K_{2an} андезитовая толща: андезиты, андезибазальты, дациты, туфы, лавобрекчии, туффиты; 4 – J_{2tr} тропинковская толща: песчаники и алевролиты с прослоями и линзами кремнистых и кремнисто-глинистых пород; 5 – J_{1al} алгатинская толща: песчаники среднезернистые с гравийными обломками, с редкими прослоями и линзами седиментационных брекчий, алевролитов; 6 – J_{1kt} кутынская толща: песчаники разнозернистые, алевролиты с линзами кремнистых и кремнисто-глинистых пород, седиментационные брекчии, конгломераты; 7 – γ₃K_{2u} граниты, гранит-порфиры и дайки аплитов; 8 – γδ₂K_{2u} гранодиориты, кварцевые диориты, гранодиорит-порфиры; 9 – δ₁K_{2u} диориты, габбродиориты, диоритовые порфиры; 10 – αβ₁K_{2u} андезиты, андезибазальты; 11 – геологические границы между разновозрастными образованиями; 12 – разрывные нарушения: 1 – установленные, 2 – перекрытые рыхлыми отложениями; 13 – основные рудные зоны; 14 – андезиты; 15 – граниты; 16 – гранодиориты; 17 – диориты.

Fig. 1. Schematic geological map of the Kutyn deposit (according to V.I. Savinkov, 2013).

1 – aQ_{IV} alluvial, marine pebbles, boulders, sands, silt sandy loams; 2 – mQ_{IV} marine, alluvial-marine pebbles, sands, clays; 3 – K_{2an} Andesite strata: andesites, andesibasalts, dacites, tuffs, lavobreccias, tuffites; 4 – J_{2tr} Tropinkovskaya strata: sandstones and siltstones with interlayers and lenses of siliceous and siliceous-clayey rocks; 5 – J_{1al} Algatinskaya strata: medium-grained sandstones with gravel fragments, with rare interlayers and lenses of sedimentation breccias, siltstones; 6 – J_{1kt} Kutynskaya strata: sandstones of various grains, siltstones with lenses of siliceous and siliceous-clay rocks, sedimentation breccias, conglomerates; 7 – γ₃K_{2u} granites, granite porphyries and dikes of aplites; 8 – γδ₂K_{2u} granodiorites, quartz diorites, granodiorite porphyries; 9 – δ₁K_{2u} diorites, gabbrodiorites, diorite porphyrites; 10 – αβ₁K_{2u} andesites, andesibasalts; 11 – geological boundaries of different ages; 12 – faults: 1 – distinguished, 2 – overlain by loose deposits; 13 – main ore zones; 14 – andesites; 15 – granites; 16 – granodiorites; 17 – diorites.

(Трушин и др., 2021). Многие разновидности руд брекчированы, катаклазированы, окислены. Среднее содержание золота в руде составляет 3.0 г/т.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения рудной минерализации из руд Седловинной, Геофизической, Джуаты-2, Перевальной, Родниковой, Итыльской зон были отобраны представительные образцы серицит-карбонат-кварцевых метасоматитов по песчаникам и гранодиоритам с различной степенью развития кварцевого и карбонат-кварцевого прожилкования. Образцы представлены керном с глубин до 140 м и включают как существенно окисленные, так и незатронутые гипергенными процессами руды. Коллекцию метасоматитов дополняют образцы слабо измененных гранодиоритов и песчаников.

Исследования полированных аншлифов в отраженном свете и шлифов в проходящем свете выполнены на поляризационном микроскопе Zeiss Axiolmager 2 Axioplan. Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре Bruker D8 Advance, минеральные фазы идентифицировались в программе EVA, количественный анализ методом Ритвельда проведен в программе Topas. Исследования особенностей внутреннего строения и состав минералов и руд проведены на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max 20 с Si полупроводниковым детектором в ресурсном центре “Геомодель” СПбГУ. Условия съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока зонда 1.8 нА, продолжительность непосредственного накопления спектра составляла 30 секунд (аналитик Н.С. Власенко).

МИНЕРАЛОГИЯ ЗОЛОТОНОСНЫХ МЕТАСОМАТИТОВ

Метасоматические изменения гранодиоритов, наблюдаемые в шлифах, представлены хлоритизацией роговой обманки и биотита, карбонатизацией роговой обманки и плагиоклаза (№ 40), серицитизацией плагиоклаза, биотита, в меньшей мере – калиевого полевого шпата и хлорита. В агрегатах серицитизированного биотита отмечаются рутил и пирит, развивающийся согласно спайности биотита. Реликтовый кварц корродирован, при этом появляется новообразованный тонкозернистый кварц. Слюды представлены тонкочешуйчатым серицитом, в котором отсутствует парагонитовая составляющая, реликтовые слюды отвечают магнезиальному анниту. В метасоматитах увеличивается количество аксессуарных рутила, апатита, монацита, торита, сохраняется реликтовый циркон, в виде единичной находки выявлен диссакасит-(Ce).

Метасоматиты по песчаникам представлены тонкозернистым карбонат-серицит-кварцевым агрегатом с реликтивными обломочными зернами кварца и полевых шпатов. Здесь встречается турмалин ряда шерл–дравит, образующий радиально-лучистые агрегаты и слагающий прожилки. В крупных кристаллах турмалина отмечена осцилляторная зональность, связанная с вариациями содержаний Fe и Mg. В наименее метасоматически измененных песчаниках отмечается вкрапленность и прожилки хлорита.

Широко распространено карбонат-кварцевое прожилкование. Прожилки разноориентированные, мощностью от 1 мм до первых сантиметров, с четкими контактами. Для прожилков характерны полосчатые, гребенчатые, иногда крустификационные и стилолитовые текстуры, редко в центральных частях прожилков наблюдаются полости, выполненные кварцевыми щетками. Кварц прожилков изменяет свой цвет от прозрачного до молочно-белого и серого, иногда он зональный. При густой сети прожилков можно говорить о жильных гидротермальных брекчиях. В таких брекчиях обломки гранодиоритов или песчаников неокатаны, неупорядочены по размеру, отношение обломков к жильному цементу существенно варьирует. Часть брекчий катаклазирована, что приводит к разрыву прожилков с образованием карбонат-кварцевых обломков, при этом обломки пород уменьшаются в размере, окатываются.

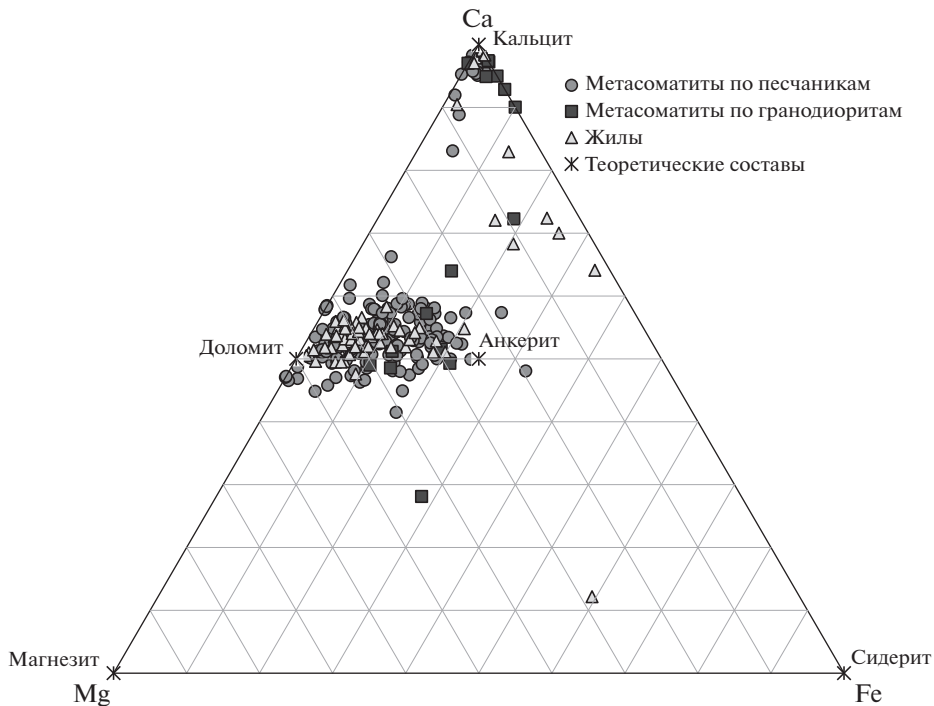


Рис. 2. Вариации состава карбонатов месторождения Кутын.

Fig. 2. Variations in the composition of carbonates of the Kutyn deposit.

Карбонаты. Карбонаты широко распространены как в метасоматитах, так и в прожилках. Наиболее широко представлены карбонаты ряда доломит–анкерит (рис. 2), которые ассоциируют с минералами пирит–арсенопиритовой, золото–тетраэдрит–арсенопиритовой, золото–пиритовой и теллуридной ассоциаций, часто идиоморфны, наблюдаемая в них осцилляторная зональность обусловлена вариациями содержаний Fe и Mg. Содержание Fe в карбонатах ряда доломит–анкерит варьирует от нижепороговых значений до 19.7 мас. %, Mg – от 5.4 до 15.2 мас. %, Ca – от 18.6 до 28.5 мас. %.

Менее распространен кальцит, который здесь обычно образует прожилки с кварцем, иногда цементирует обломки кристаллов более раннего доломита–анкерита. Встречаются тонкие каймы кальцита вокруг выделений доломита. Сидерит отмечен в прожилках с хлоритом и кальцитом. В кварц–кальцитовом прожилке наблюдались ксеноморфные выделения родохрозита, единичные – стронцианита.

Хлорит. Хлорит метасоматизированных гранодиоритов образует мелко- и среднечешуйчатые агрегаты, развивается по биотиту и актинолиту, ассоциирует с кварцем, альбитом, серицитом, рутилом, апатитом, монацитом, торитом, галенитом. По составу он отвечает шамозиту, реже встречается клинохлор. Температура, рассчитанная по этому хлориту (Cathelineau, Nieva, 1985), варьирует от 229 до 278 °С, в среднем составляя 257 °С (14 точек анализа) (табл. 1).

Хлорит метасоматитов по песчаникам представлен чешуйчатыми агрегатами, вкрапленниками с пиритом и рутилом, реже прожилками с сидеритом, иногда обрастает углеродистое вещество. По составу минерал соответствует шамозиту, причем во вкрапленниках краевые зоны относительно обеднены железом. Температура, рассчи-

Таблица 1. Химический состав хлорита (мас. %), его структурная формула и рассчитанная по нему температура (по Cathelineau, Nieva, 1985)

Table 1. The chemical composition of chlorite (wt %), structural formulae and calculated temperature (Cathelineau, Nieva, 1985)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	Сумма	Si _{IV}	Al _{IV}	Al _{VI}	Fe ²⁺	Mg ²⁺	6-Σ _{IV}	T, °C
Хлорит-г	27.62	20.07	27.20	13.86	88.75	2.88	1.12	1.35	2.37	2.16	0.12	256
Хлорит-г	28.41	18.05	22.69	18.21	87.36	2.95	1.05	1.16	1.97	2.82	0.05	242
Хлорит-п	29.22	18.45	29.55	11.90	89.12	3.03	0.97	1.30	2.60	1.87	0.23	225
Хлорит-п	29.60	18.30	31.27	12.51	91.68	3.00	1.00	1.22	2.70	1.93	0.15	230

Примечание. Хлорит-г – хлорит метасоматизированных гранодиоритов, хлорит-п – хлорит метасоматизированных песчаников.

танная по этому хлориту (Cathelineau, Nieva, 1985), варьирует от 213 до 236 °C (4 точки анализа) (табл. 1).

ХАРАКТЕРИСТИКА РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

На месторождении Кутын распространены руды с вкрапленными, прожилково-вкрапленными, прожилковыми текстурами. Количество рудных минералов составляет 1–5%, преобладают пирит и арсенопирит, отмечены марказит, пирротин, сфалерит, халькопирит, галенит, аллоклазит, молибденит, станнин, стибнит, акантит. Сульфосоли представлены тетраэдритом, бурнонитом. Обнаружены теллуриды благородных металлов, свинца, сурьмы, ртути: гессит, петцит, штюцит, алтаит, теллурантимон, колорадоит. Среди гипергенных минералов установлены гематит, гётит, скородит, Са–Fe-арсенат, ярозит, ковеллин.

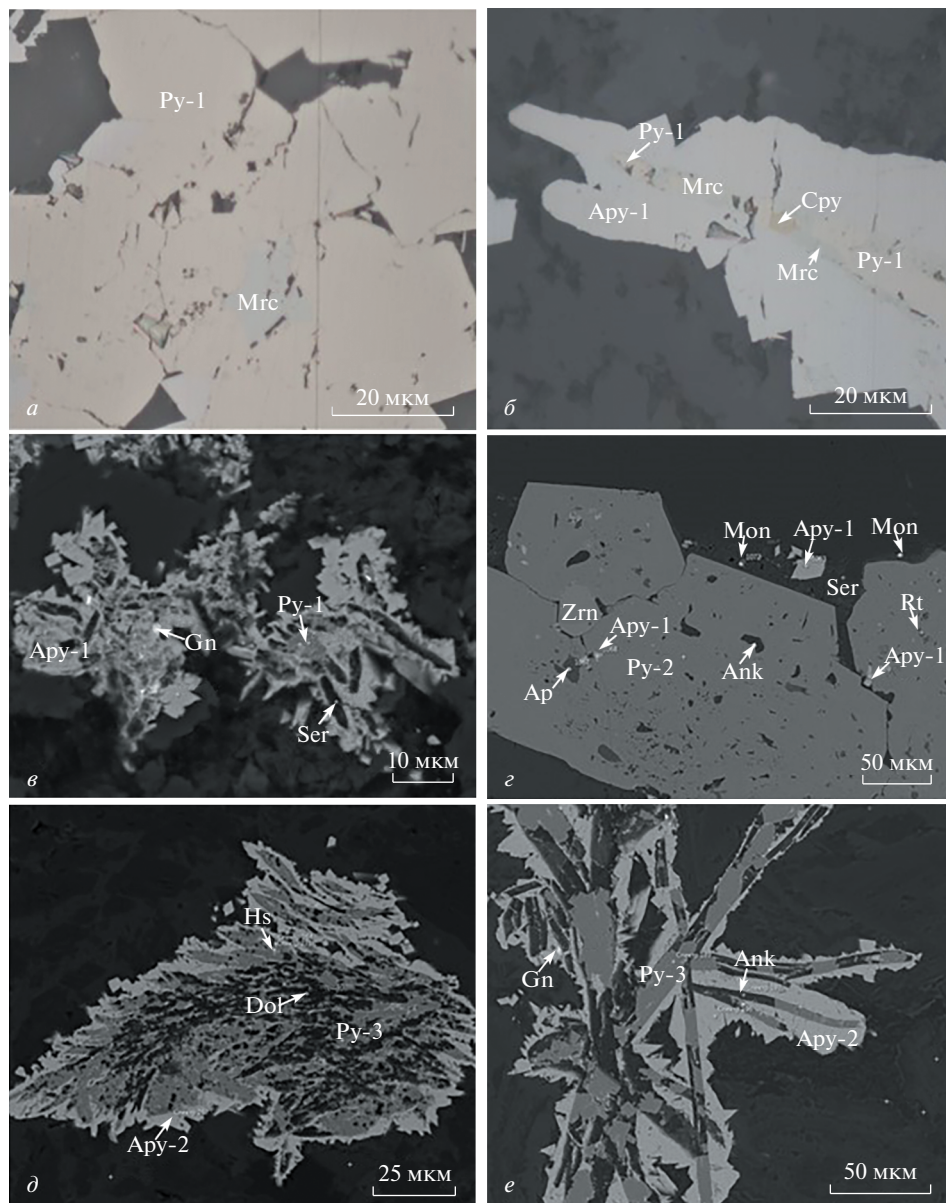
В результате изучения морфологии и состава минералов, их взаимоотношений с породообразующими и рудными были выделены парагенетические минеральные ассоциации.

В метапесчаниках отмечается тонкая рассеянная вкрапленность *пирита*. Кристаллы пирита мелкие, идиоморфные, кубического габитуса, размером до 20 мкм.

Рис. 3. Парагенезисы пирит-арсенопиритовой (*a–e*) и золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциаций (*d, e*). *a* – включение марказита (Mrc) в пирите-1 (Py-1); *b* – развитие марказита по пириту-1, обрастание этого агрегата арсенопиритом-1 (Apy-1), включение халькопирита (Cpy); *c* – развитие арсенопирита-1 (Apy-1) по пириту-1 и серициту (Ser), включения галенита (Gn); *e* – прожилок пирита-2 (Py-2) с включениями арсенопирита-1, апатита (Ap), циркона (Zrn), анкерита (Ank), рутила (Rt) в серицитовой оторочке с монацитом (Mon); *d* – развитие Te-содержащей разновидности арсенопирита-2 (Apy-2) по перьевидному агрегату пирита-3 (Py-3) и доломита (Dol) с включением гессита (Hs); *e* – замещение анкерита пиритом-3 в прожилках, их обрастание Sb-содержащей разновидностью арсенопирита-2. *a, b* – изображения в отраженном свете; *c–e* – изображения в отраженных электронах.

Fig. 3. The paragenesis of pyrite-arsenopyrite (*a–e*) and gold-tetrahedrite-arsenopyrite and gold-pyrite (*d, e*) assemblages.

a – inclusion of marcasite (Mrc) in pyrite-1 (Py-1); *b* – replacement of pyrite-1 by marcasite, growing of this aggregate with arsenopyrite-1 (Apy-1), inclusion of chalcopyrite (Cpy); *c* – growth of arsenopyrite-1 (Apy-1) by pyrite-1 and sericite (Ser), inclusions of galena (Gn); *e* – veins of pyrite-2 (Py-2) with inclusions of arsenopyrite-1, apatite (Ap), zircon (Zrn), ankerite (Ank), rutile (Rt) in a sericite rim with monazite (Mon); *d* – development of a Te-containing variety of arsenopyrite-2 (Apy-2) by a feathery aggregate of pyrite-3 (Py-3) and dolomite (Dol) with the inclusion of hessite (Hs); *e* – replacement of ankerite with pyrite-3 in veins, their fouling with Sb-containing variety of arsenopyrite-2. *a, b* – images in reflected light; *c–e* – BSE images.



Хороший идиоморфизм пирита, вероятно, указывает на его катагенетическое происхождение.

Пирит-арсенопиритовая минеральная ассоциация (рис. 3, *a–г*) развита в метасоматах по песчаникам и гранодиоритам. Преобладающими минералами являются пирит-1 и -2, арсенопирит-1, характерны халькопирит, марказит, пирротин, сфалерит, стannин, аллоклазит, галенит.

Пирит-1 – идиоморфный, кубического габитуса, размер его вкрапленников до 50 мкм, он развивается по спайности биотита при его серицитизации, а также образу-

ет вкрапленность, прожилки. Состав пирита-1 близок к стехиометричному (табл. 2). В ассоциации с пиритом-1 присутствуют марказит (определен в отраженном свете), халькопирит, пирротин, причем марказит развивается по пириту (рис. 3, *a*), а халькопирит и пирротин образуют в нем включения. Пирротин также иногда встречается в виде массивных зерен размером до 100 мкм с включениями арсенопирита, халькопирита, сфалерита. Тонкие сростания пирротина и пирита, их включения друг в друге свидетельствуют о близковременном образовании двух минералов.

Пирит-2 отличается от пирита-1 пентагондодекаэдрическим габитусом и более крупными размерами выделений – до 300 мкм. Он слагает гнезда и прожилки (рис. 3, *z*), его состав также близок к стехиометричному (табл. 2). Для пирита-2 характерно обилие включений идиоморфного арсенопирита-1, апатита, циркона, рутила, карбонатов ряда доломит–анкерит. Иногда пирит-2 окаймлен серицитовой оторочкой с монацитом.

Арсенопирит-1 образует идиоморфные удлинённо-ромбические, призматические кристаллы размером 10–20 мкм, обрастает пирит-1, а также пирит-марказит-пирротиновые гнезда (рис. 3, *b*), лейсты серицита (рис. 3, *в*). Отношение As/S варьирует от 0.89 до 1.07, составляя в среднем 0.97 (табл. 2).

Сфалерит-1 редок, размер его ксеноморфных выделений достигает 40 мкм, он ассоциирует с галенитом и кварцем, максимальное содержание примеси железа в нем составляет 4.2 мас. % (табл. 2).

Халькопирит редок, обычно встречается в виде включений размером до 10 мкм в пирротине, пирите, арсенопирите (рис. 3, *b*). В одном образце отмечено скопление ксеноморфных выделений халькопирита, выполняющих интерстиции между кварцем, калиевым полевым шпатом, хлоритом. Состав минерала стехиометричный (табл. 2). В сростках с халькопиритом единичны находки станнина.

Аллоклазит (Co, Fe)AsS встречен в виде субмикронного включения в арсенопирите, а также в хлорите. Содержит примесь никеля (4.5 мас. %) (табл. 2).

Галенит образует мелкие субмикронные включения в арсенопирите (рис. 3, *в*), пирите, халькопирите.

Редко в ассоциации со слюдами отмечаются пластинки *молибденита* (табл. 2) размером до 200 мкм.

Золото-тетраэдрит-арсенопиритовая минеральная ассоциация (рис. 3, *d–e*, рис. 4, *a–z*) развита в метасоматитах по песчаникам и гранодиоритам. Основными минералами являются пирит и арсенопирит, характерны самородное золото, блеклые руды, сфалерит, галенит, в арсенопирите в виде включений отмечаются алтаит и гессит.

Пирит-3 кубического габитуса, размером около 10 мкм, его кристаллы замещают анкерит и серицит в прожилках и гнездах (рис. 3, *d–e*). Состав близкий к стехиометричному (табл. 2).

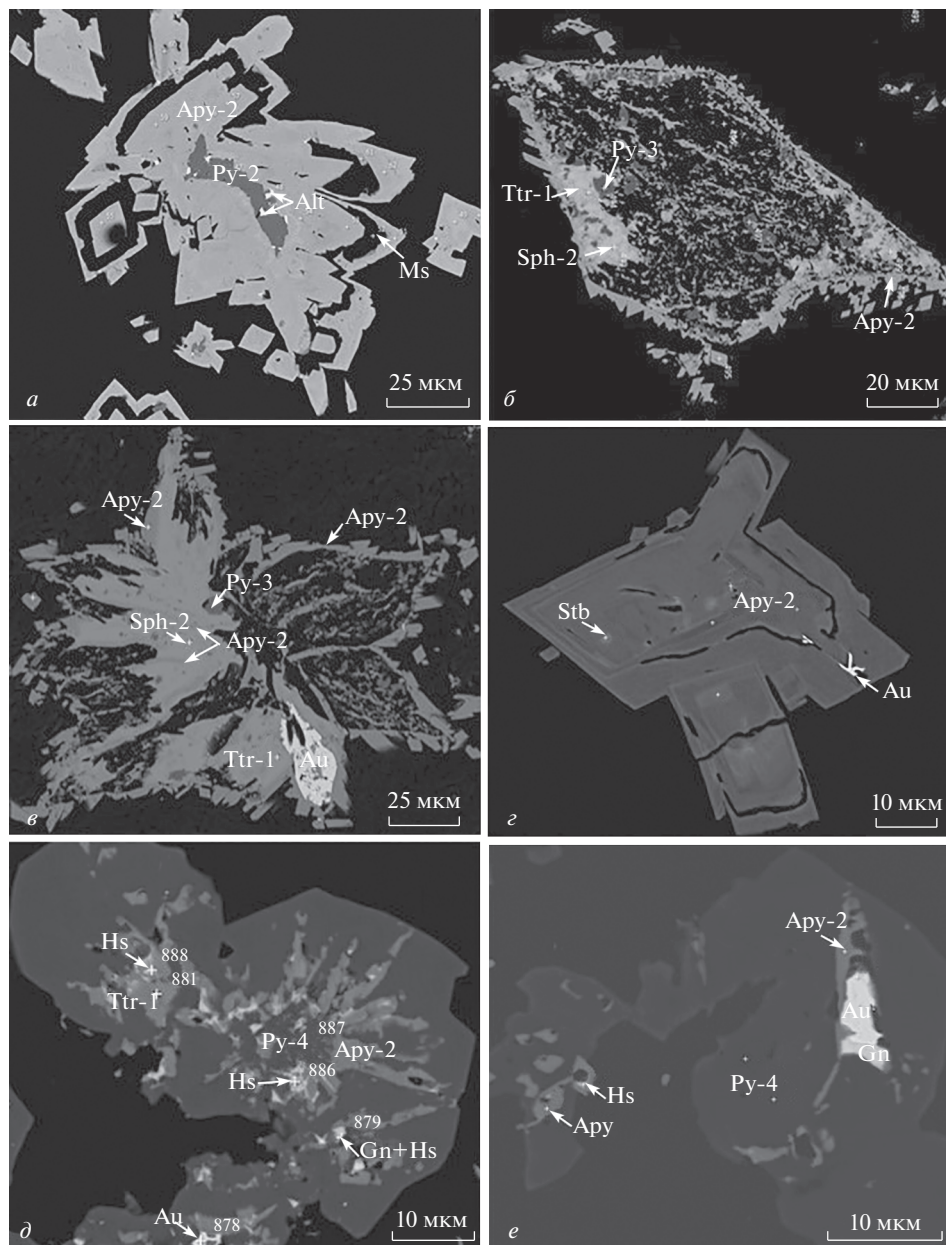
Арсенопирит-2 представлен идиоморфными призматическими и уплощенно-ромбическими кристаллами размером до 50 мкм, образует гнезда, прожилки вместе с кварцем и карбонатами, обрастает удлинённые выделения пирита-3 и анкерита, образуя ветвистые агрегаты (рис. 3, *d–e*). Арсенопирит-2 тесно ассоциирует с золотом. В единичных анализах арсенопирита встречается примесь Au (до 0.4 мас. %). Для арсенопирита-2 характерны примеси Sb и Te (табл. 2). Содержание примеси Sb составляет в среднем 1.6 мас. %, достигает 2.8 мас. %, в некоторых кристаллах такого арсенопирита отмечены включения стибнита (рис. 4, *z*). Примесь Te, содержание которой достигает 5.4 мас. % (табл. 2), характерна для внешней части футляровидных кристаллов (рис. 4, *a*). Вероятно, при медленном росте арсенопирит и теллуридная фаза (алтаит и гессит) разделяются, при дальнейшем быстром росте (скелетные кристаллы) теллур рассеивается в арсенопирите. Некоторые кристаллы арсенопирита-2 зональны: ядро, не содержащее примесей, зона с примесью Sb и внешняя зона, обогащенная Te.

Блеклые руды по составу соответствуют Zn- и Ag-содержащему *тетраэдриту* (до 6.9 мас. % Zn, до 8.1 мас. % Ag) (табл. 2). Тетраэдрит-1 образует ксеноморфные выделе-

Таблица 2. Состав сульфидов и сульфосолей месторождения Кутын (мас. %)
Table 2. Composition of sulfides and sulfosalts of the Kutyn deposit (wt %)

№ п.п.	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Ag	Pb	As	Sb	Te	S	Сум- ма	Кристаллохимическая формула	Расчетный фактор
Py-1	46.81											53.19	100.0	Fe _{1,01} S _{1,99}	Σ к.ф. = 3
Py-2	46.99											53.01	100.0	Fe _{1,01} S _{1,99}	Σ к.ф. = 3
Py-3	47.27											52.73	100.0	Fe _{1,02} S _{1,98}	Σ к.ф. = 3
Py-4	45.48							3.91				50.61	100.0	Fe _{1,00} As _{0,06} S _{1,94}	Σ к.ф. = 3
Apy-1	34.18							46.46				19.36	100.0	Fe _{1,00} As _{1,01} S _{0,99}	Σ к.ф. = 3
Apy-2	31.31							48.43	1.00			19.27	100.0	Fe _{0,93} (As _{1,07} Sb _{0,01}) _{1,08} S _{0,99}	Σ к.ф. = 3
Apy-2	34.25							45.82		1.30		18.64	100.0	Fe _{1,01} As _{1,01} (S _{0,96} Te _{0,02}) _{0,98}	Σ к.ф. = 3
Cpy	30.60			34.21								35.20	100.0	Cu _{0,99} Fe _{1,00} S _{2,01}	Σ к.ф. = 4
Sph-1	2.87				63.88							33.25	100.0	(Zn _{0,94} Fe _{0,05}) _{0,99} S _{1,00}	S = 1
Ttr-1	2.89			32.72	4.12		6.68			29.33		24.26	100.0	(Cu _{8,85} Zn _{1,08} Ag _{1,06} Fe _{0,89}) _{11,88} Sb _{4,14} S _{13,00}	S = 13
Ttr-2	1.11			37.99	6.40					29.75		24.75	100.0	(Cu _{10,07} Zn _{1,65} Fe _{0,33}) _{12,05} Sb _{4,12} S _{13,00}	S = 13
Bnn	1.77			11.27				42.38		25.31		19.27	100.0	Pb _{1,02} (Cu _{0,89} Fe _{0,16}) _{1,04} Sb _{1,04} S _{3,00}	S = 3
Po	59.90											40.10	100.0	Fe _{0,92} S _{1,08}	Σ к.ф. = 2
Mo						60.06						39.94	100.0	Mo _{1,00} S _{2,00}	Σ к.ф. = 3
Acl	5.49	26.37	4.49					44.90				18.75	100.0	(Co _{0,77} Fe _{0,17} Ni _{0,13}) _{1,06} As _{1,02} S _{1,00}	S = 1

Примечание. Py – пирит, Аpy – арсенопирит, Сpy – халькопирит, Sph – сфалерит, Ttr – тетраэдрит; Bnn – бурнонит, Po – пирротин, Mo – молибденит, Acl – аллоклазит. Анализы приведены к 100%.



ния, слагает перьевидные агрегаты вместе с пиритом-3, арсенопиритом-2, золотом, иногда образует тонкие, оптически неразличимые сростания со сфалеритом-2 (рис. 4, б–в). В Ag-содержащем тетраэдрите, развивающемся по халькопириту, отмечено микронное включение акантита.

Бурнонит CuPbSbS_3 образует зерна неправильной формы размером до 30 мкм, а также микронную рассеянную вкрапленность. Ассоциирует с галенитом, тетраэдри-

Рис. 4. Парагенезисы золото-тетраэдрит-арсенопиритовой (*a–e*) и золото-пиритовой (*d, e*) ассоциаций.

a – футляровидные кристаллы арсенопирита-2 (Ару-2), внешняя зона которого обогащена Те, внутри арсенопирита наблюдается мусковит (Ms), выделения алтаита (Alt) тяготеют к границе пирита-3 (Py-3) и арсенопирита; *b* – перьевидный агрегат пирита-3, тетраэдрита-1 (Ттр-1), сфалерита-2 (Sph-2), арсенопирита-2; *e* – самородное золото в сростании с Sb-содержащей разновидностью арсенопирита-2, Zn- и Ag-содержащим тетраэдритом-1, пиритом-3; *e* – включение самородного золота в трещинке Sb-содержащей разновидности арсенопирита-2, включение стибнита (Stb); *d, e* – As-содержащий пирит-4 (Py-4) с включениями минералов более ранней золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации – арсенопирита-2, Zn- и Ag-содержащего тетраэдрита-1 (Ттр-1), самородного золота, галенита, гессита. Изображения в отраженных электронах.

Fig. 4. The paragenesis of gold-tetrahedrite-arsenopyrite (*a–e*) and gold-pyrite (*d, e*) assemblages.

a – boxy crystals of arsenopyrite-2 (Apy-2), the rim of which is enriched with Te, muscovite (Ms) is inside of arsenopyrite, altaite (Alt) is usually located at pyrite-3 (Py-3) and arsenopyrite boundaries; *b* – feathery aggregate of pyrite-3, tetrahedrite-1 (Ttr-1), sphalerite-2 (Sph-2), arsenopyrite-2; *e* – native gold with Sb-containing variety of arsenopyrite-2, Zn- and Ag-containing tetrahedrite-, pyrite-3; *e* – inclusion of native gold in a crack of Sb-containing variety of arsenopyrite-2, inclusion of stibnite (Stb); *d, e* – As-containing pyrite-4 (Py-4) with inclusions of minerals of the earlier gold-tetrahedrite-arsenopyrite ore assemblage – arsenopyrite-2, Zn- and Ag-containing tetrahedrite-1 (Ttr-1), native gold, galena, hessite. BSE images.

том, гесситом, а также образует включения в арсенопирите совместно с галенитом. В бурноните иногда присутствует примесь Fe (табл. 2).

Галенит образует мелкие субмикронные включения в арсенопирите, пирите. Иногда ассоциирует с золотом.

Среди теллуридов в золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации распространены *гессит* Ag_2Te и *алтаит* $PbTe$ (рис. 4, *a*). Они образуют микронные включения в пирите и на границе зерен пирита-3 и арсенопирита-2, часто вместе с галенитом.

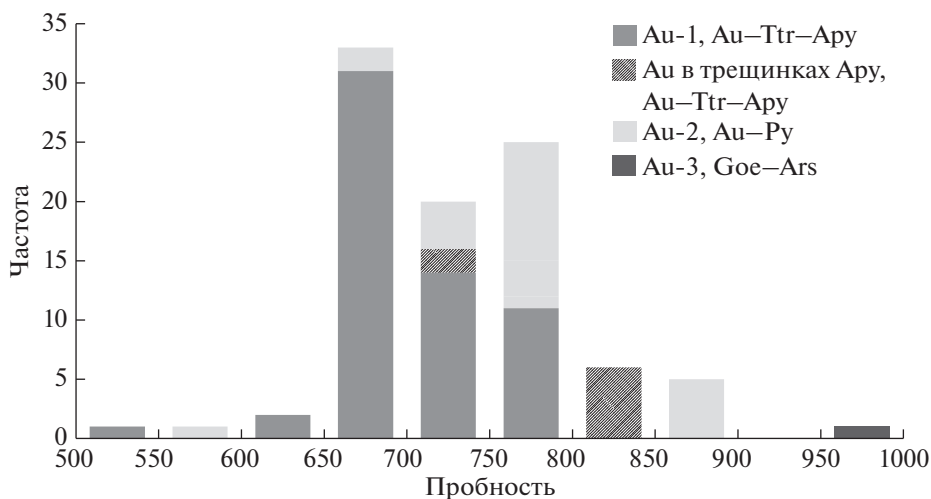


Рис. 5. Гистограмма пробности минералов ряда электрум – самородное золото.

Ассоциации: Au-Ttr-Apy – золото-тетраэдрит-арсенопиритовая, Au-Py – золото-пиритовая, Goe-Ars – гётит-арсенатная.

Fig. 5. Histogram of the fineness of electrum and native gold series.

Assemblages: Au-Ttr-Apy – gold-tetrahedrite-arsenopyrite, Au-Py – gold-pyrite, Goe-Ars – goethite-arsenate.

Таблица 3. Состав теллуридов месторождения Кутын (мас. %)
Table 3. Composition of tellurides of the Kutyn deposit (wt %)

№ п.п.	Ag	Au	Hg	Pb	Sb	Te	Сумма	Кристаллохимическая формула	Расчетный фактор
St	57.56	0.98	0.60			40.87	100.00	$(Ag_{4.95}Au_{0.05}Hg_{0.03})_{5.03}Te_{2.97}$	Σ к.ф. = 8
Hs	63.47					36.53	100.00	$Ag_{2.02}Te_{0.98}$	Σ к.ф. = 3
Alt				61.35		38.65	100.00	$Pb_{0.99}Te_{1.01}$	Σ к.ф. = 2
Tla					39.36	60.64	100.00	$Sb_{2.02}Te_{2.98}$	Σ к.ф. = 5
Pz	42.66	24.59				32.74	100.00	$Ag_{3.06}Au_{0.96}Te_{1.98}$	Σ к.ф. = 6
Col			61.18			38.82	100.00	$Hg_{1.00}Te_{1.00}$	Σ к.ф. = 2

Примечание. St – штюцит, Hs – гессит, Alt – алтаит, Tla – теллурантимон, Pz – петцит, Col – колорадоит. Анализы приведены к 100%.

В одном образце обнаружено 15-микронное выделение *самородного теллура*, развивающегося по арсенопириту-2.

Самородное золото-1 (рис. 4, в) ассоциирует с арсенопиритом-2, тетраэдритом, а также с гесситом, галенитом. Оно образует как мелкие включения, так и самостоятельные выделения размером до 50 мкм. Золотины незональны, массивны, реже встречается пористое золото. Большая часть самородного золота имеет пробность 650–780 ‰, что соответствует электруму и среднепробному золоту (рис. 5). Характерные примеси не обнаружены, иногда присутствует Fe в количестве не более 2.5 мас. %. Высокопробное золото (810–850 ‰) выполняет субмикронные трещинки в арсенопирите-2 (рис. 4, з) и, вероятно, является переотложённым.

Золото-пиритовая минеральная ассоциация (рис. 4, д–е) распространена в кварцевых и кварц-карбонатных прожилках, прожилковых брекчиях.

Пирит-4 золото-пиритовой ассоциации образует идиоморфные кристаллы пентагондодекаэдрического габитуса размером до 40 мкм. Для него характерна примесь As (табл. 2), вариации содержания которого отражаются в слабой зональности. Пирит-4 характеризуется четко выраженной пористой структурой: поры размером до первых микрон, неправильной формы. Пойкилобласты пирита-4 в качестве включений содержат минералы золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации: арсенопирит-2, Ag-содержащий тетраэдрит, самородное золото, гессит, галенит (рис. 4, д–е).

Самородное золото-2 вместе с арсенопиритом-2 образует включения в пойкилобластах пирита-4 (рис. 4, д–е), а также ассоциирует с кварцем. Форма зерен неправильная, размер не превышает 30 мкм, пробность, как правило, варьирует от 730 до 770 ‰ (рис. 5). Более высокопробное золото (890 ‰) отмечено в кварцевых прожилках образцов из Родниковой рудной зоны. Внутреннее строение золотин однородно, за исключением одного знака самородного золота с зоной, обогащенной серебром (пробность 560 ‰).

Теллуридная минеральная ассоциация развита в кварц-карбонатных прожилках. Теллуриды представлены *петцитом* Ag_3AuTe_2 , *штюцитом* $Ag_{5-x}Te_3$, *теллурантимоном* Sb_2Te_3 , *колорадоитом* $HgTe$ (табл. 3, рис. 6, а–б). Теллуриды образуют ксеноморфные выделения размером до 200 мкм, а также мелкую вкрапленность в карбонатах (доло-

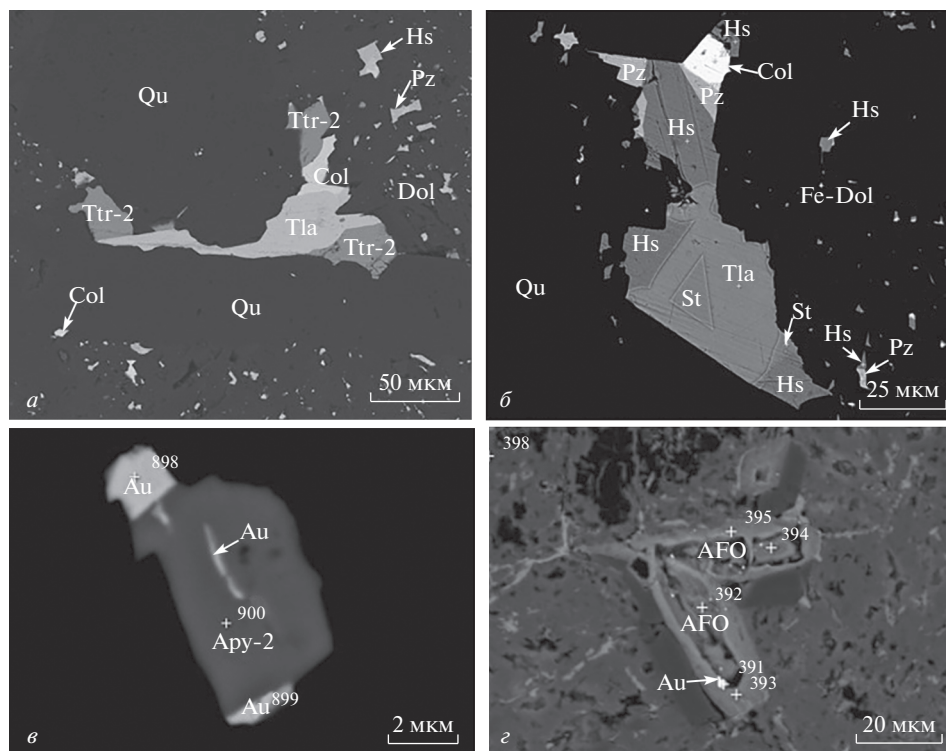


Рис. 6. Парагенезисы теллуридной ассоциации (а, б); Au-содержащий арсенопирит (в) и его окисление (г). а – сросток Zn-содержащего тетраэдрита-2 (Ttr-2), теллурантимо́на (Tla), колорадоита (Col) и мелкая вкрапленность колорадоита, гессита (Hs), петцита (Pz) в кварц (Qu)-доломитовом (Dol) прожилке; б – сросток теллурантимо́на, гессита, штюцита (St), петцита, колорадоита в прожилке кварца и железистого доломита (Fe-Dol); в – сросток золотосодержащего арсенопирита-2 (Apy-2) с золотом (Au); г – гипергенная ассоциация: включения самородного золота в As-содержащем окси-гидрокси́де железа (AFO), развивающемся по арсенопириту. Изображения в отраженных электронах.

Fig. 6. The paragenesis of the telluride assemblage; Au-bearing arsenopyrite and its oxidation. а – an aggregate of Zn-bearing tetrahedrite (Zn-Ttr), tellurantimon (Tla), coloradoite (Col) and fine inclusions of coloradoite, hessite (Hs), petzite (Pz) in quartz (Qu)-dolomite (Dol) vein; б – an aggregate of tellurantimon, hessite, stützite (St), petzite, coloradoite in quartz and ferrian dolomite (Fe-Dol); в – Au-bearing arsenopyrite-2 (Apy-2) with native gold (Au); г – hypergenetic assemblage: inclusions of native gold in As-containing iron oxy-hydroxide (AFO) formed after arsenopyrite. BSE images.

мит). Иногда ассоциируют с тетраэдритом-2. В одной точке анализа теллурантимо́на обнаружена примесь висмута, составляющая 5.2 мас. %.

Тетраэдрит-2 теллуридной ассоциации содержит около 6 мас. % Zn (табл. 2), образует ксеноморфные выделения размером до 50 мкм, а также тонкую вкрапленность размером первые микронны.

Гётит-арсенатная минеральная ассоциация развита в зоне окисления месторождения и проявлена в развитии по пириту и арсенопириту смеси *Ca-Fe-арсената* и *As-содержащего окси-гидрокси́да железа*. Одна точка анализа соответствует *юкониту* $\text{Ca}_7\text{Fe}_{11}(\text{AsO}_4)_9\text{O}_{10}\cdot 24.3(\text{H}_2\text{O})$. По пириту развиваются *гематит* и *язозит*, арсенопирит иногда замещается *скородитом*. *Ковеллин* образует каймы по халькопириту и тетраэдриту.

Этап	Гидротермально-метасоматический				Гипергенный		
	Стадия	Метасоматическая		Жильная		Окисления	
		Py-Apy	Au-Tr-Apy	Au-Py			Te
Молибденит	2						
Пирит	1 2	3	4				
Пирротин	—						
Арсенопирит	1	2	—				
Халькопирит	—						
Марказит	—						
Сфалерит	—	—					
Станнин	—						
Аллоклазит	—						
Галенит	—	—	—				
Тетраэдрит		—	—	—			
Акантит		2					
Au-Ag самородное		1 2	2		3		
Стибнит		—					
Бурнонит			—				
Алтаит			—				
Гессит			—	—			
Te самородный			?				
Другие теллуриды				—			
Ковеллин					—		
Гематит					—		
Гётит					—		
Ярозит					—		
Юконит*					—		
Скородит					—		
Кварц	—	—	—				
Серицит	—	—					
Турмалин	—						
Хлорит	—						
Доломит-анкерит	—	—	—	—			
Сидерит	?						
Кальцит		—		—			

Широко распространены Редки
 Распространены ограниченно Реликты в пойкилобластих пирита

←

Рис. 7. Ассоциации рудных минералов месторождения Кутын.

* – юконит и фаза Са–Fe-арсената в смеси с As-содержащим окси-гидроксидом Fe.

Ассоциации: Py-Apy – пирит-арсенопиритовая, Au-Ttr-Apy – золото-тетраэдрит-арсенопиритовая, Au-Py – золото-пиритовая, Te – теллуридная, Goe-Ars – гётит-арсенатная.

Fig. 7. Ore minerals assemblages of the Kutyn deposit.

* – yukonite and Ca-Fe-arsenate phase mixed with As-containing Fe-oxide-hydroxide.

Assemblages: Py-Apy – pyrite-arsenopyrite, Au-Ttr-Apy – gold-tetrahedrite-arsenopyrite, Au-Py – gold-pyrite, Te – telluride, Goe-Ars – goethite-arsenate.

В гётите и Са–Fe-арсенате, близком по составу к юкониту, отмечается субмикронная вкрапленность *самородного золота-3* высокой пробы (около 960 ‰). Вероятно, при окислении первичных золотонесущих минералов (арсенопирит (рис. 6, в), пирит) рассеянное в них коллоидное и/или изоморфное золото выделяется в собственную фазу (рис. 6, з).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате изучения морфологии и состава породообразующих и рудных минералов, их взаимоотношений были выделены дорудная и пять ассоциаций рудной минерализации, отражающих три этапа минералообразования: дорудный, гидротермально-метасоматический и гипергенный.

Дорудный этап проявлен в развитии тонкой рассеянной вкрапленности пирита в метапесчаниках. Гидротермально-метасоматический этап включает в себя метасоматическую и жильную стадии, в которых выделяются пирит-арсенопиритовая, золото-тетраэдрит-арсенопиритовая, золото-пиритовая и теллуридная ассоциации. Гипергенный этап проявлен в развитии гётит-арсенатной ассоциации (рис. 7).

В пирит-арсенопиритовой ассоциации метасоматитов наиболее распространены пирит-1 и арсенопирит-1. Реже встречаются марказит, сфалерит, халькопирит, пирротин, единичны станнин, аллоклазит.

Золото-тетраэдрит-арсенопиритовая ассоциация метасоматитов представлена самородным золотом, арсенопиритом-2, блеклыми рудами, пиритом-3. Характерны субмикронные включения галенита, алтаита, гессита. Большая часть самородного золота имеет пробу 650–780 ‰, золото, выполняющее трещинки в арсенопирите-2, более высокопробно – 810–850 ‰.

Жильная золото-пиритовая ассоциация представлена пойкилообластами пирита-4, содержащего перечисленные выше минералы золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации, а также самородным золотом пробностью 730–770 ‰.

Теллуридная ассоциация характерна для кварц-карбонатных жил, локализованных в катаклазированных метасоматизированных песчаниках. Теллуриды представлены петцитом, штюцитом, теллурантимомом, колорадоитом. С ними ассоциирует Zn-содержащий тетраэдрит.

Гётит-арсенатная ассоциация представлена развивающимися по пириту гётитом, гематитом, ярозитом, по арсенопириту – смесью Са–Fe-арсената, близкого к юкониту, и As-содержащего окси-гидроксида железа, а также скородитом. В окисленных минералах в виде субмикронных включений наблюдается высокопробное самородное золото.

Пирит-арсенопиритовая и золото-тетраэдрит-арсенопиритовая ассоциации выделены в образцах всех изученных нами рудных зон. Молибденит, аллоклазит встречены только в метасоматитах по гранодиоритам. Золото-пиритовая жильная ассоциация отмечена в образцах Перевальной рудной зоны, для которой характерно интенсивное кварц-карбонатное прожилкование вплоть до образования жильных брекчий. Теллу-

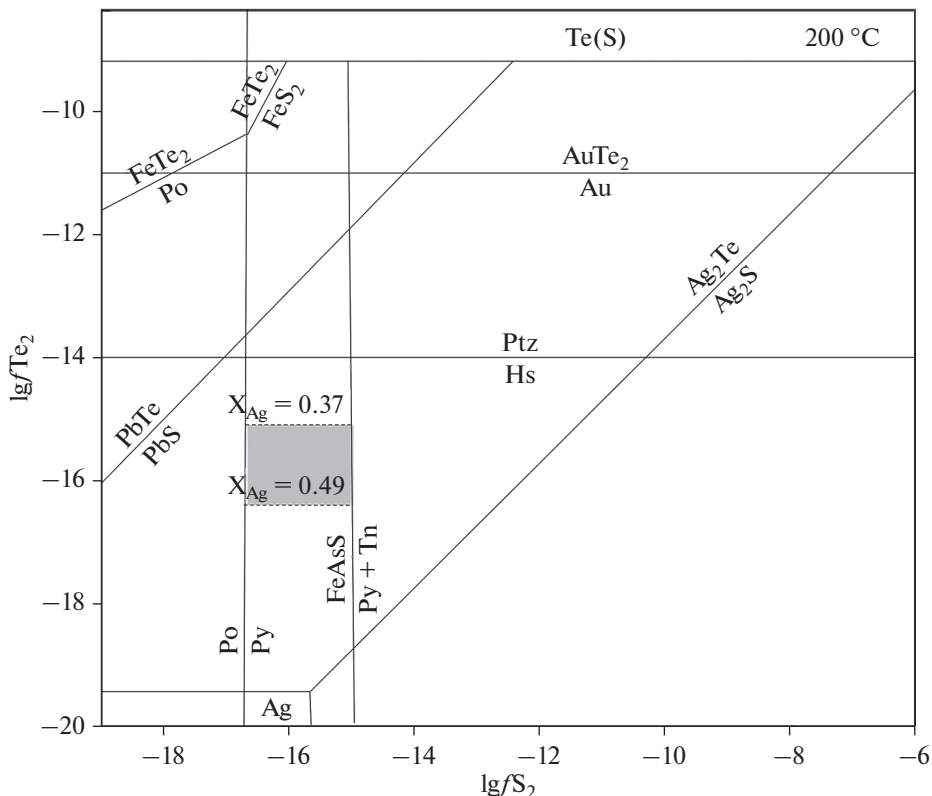


Рис. 8. Фазовая диаграмма для парагенезиса минералов золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации с гесситом месторождения Кутын.

Пунктирные линии соответствуют минимальному и максимальному содержанию серебра в электруме, равновесном с гесситом (по: Barton, Skinner, 1979; Afifi et al., 1988). Py – пирит, Po – пирротин, Tn – теннантит, Ptz – петцит, Hs – гессит.

Fig. 8. Phase diagram for the paragenesis of gold-bearing association minerals with hessite of the Kutyn deposit. The dotted lines are the minimum and maximum silver content in electrum in equilibrium with hessite (according to Barton, Skinner, 1979; Afifi et al., 1988). Py – pyrite, Po – pyrrotite, Tn – tennantite, Ptz – petzite, Hs – hessite.

ридная ассоциация развита в кварц-карбонатных прожилках в рудах Седловинной и Родниковой рудных зон. Отметим, что теллуриды золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации (гессит, алтаит) встречаются в образцах всех изученных рудных зон.

По диаграмме стабильности системы Au–Ag–Te при $X_{Ag} = 0.37$ температура образования золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации (в парагенезисе с гесситом) оценивается выше $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lg f(\text{Te}_2) = 10^{-17} - 10^{-12}$ (X_{Ag} – мольная доля Ag в электруме) (Бортников и др., 1988).

По А.М. Афифи и др. (Afifi et al., 1988), область стабильности парагенезиса минералов золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации, включающей в себя электрум, гессит, пирит, арсенопирит, галенит, для температуры $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ограничена линиями петцит-гессит, гессит-акантит, арсенопирит-пирит + теннантит, пирит-пирротин. Вариации содержания серебра в электруме (X_{Ag} от 0.37 до 0.49), ассоциирующем с гес-

ситом, сужают область стабильности по $f(\text{Te}_2)$. При 200 °С образование изученной золото-тетраэдрит-арсенопиритовой ассоциации проходило в интервале фугитивности серы от –16.8 до –15.0 и фугитивности теллура от –16.5 до –15.2 (рис. 8).

Гессит и штюцит теллуридной ассоциации не демонстрируют структуры распада их высокотемпературного твердого раствора, что указывает на температуру кристаллизации ниже 120 ± 15 °С (Kracek et al., 1966).

Таким образом, образование благороднометаллических минеральных форм золото-тетраэдрит-арсенопиритовой и теллуридной ассоциаций обусловлено понижением температуры и вариациями фугитивности серы и теллура.

Среди окисленных As-содержащих фаз резко преобладает смесь Са–Fe-арсената и As-содержащего окси-гидроксида железа. В работе (Surour et al., 2012) описано развитие этих фаз по арсенопириту при выветривании рудомещающих гранодиоритов на золоторудном месторождении Бир Тавилах (Саудовская Аравия). Подчиненное количество скородита среди гипергенных минералов мышьяка указывает на повышенные значения рН во время окисления (Vink, 1996, Paktunc et al., 2015).

Золоторудные месторождения Кутын и Албазино принадлежат Ульбанскому террейну, однако локализованы в различных геолого-структурных обстановках: в интрузивно-купольной структуре и в корнях палеовулканоаппарата, соответственно (Трушин и др., 2019). Несмотря на разные позиции, похожий минеральный состав околорудных метасоматитов и руд, формы нахождения самородного золота, а также находки теллуридной минерализации позволяют сравнивать изучаемый объект с месторождением Албазино. Для обоих месторождений характерны зоны метасоматитов березитовой формации, в центральных частях которых широко проявлены жилы и прожилки. Руды обоих месторождений содержат малое количество сульфидов (до 6%), среди которых преобладают пирит и арсенопирит, причем типоморфной особенностью последнего является примесь Sb. Самородное золото ассоциирует с арсенопиритом и Ag-содержащим тетраэдритом, а также с кварцем и карбонатами, однако часть золота содержится в сульфидах – арсенопирите и пирите. В зоне окисления это золото высвобождается и образует собственную фазу. Отличительными особенностями минерального состава руд Албазино являются присутствие висмутовых минералов, различных сульфосолей, более широкое развитие минералов Ni и Co, что позволило отнести это месторождение к золото-редкометаллической рудной формации (Кемкина, Кемкин, 2018). На месторождении Албазино описаны минералы висмута – висмутин Bi_2S_3 , теллуриды висмута, матильдит Ag-BiS_2 , кобеллит $\text{Pb}_6\text{FeBi}_4\text{Sb}_2\text{S}_{16}$, сурьмы – ульманнит NiSbS , джемсонит $\text{Pb}_4\text{FeSb}_6\text{S}_{14}$, гетероморфит $\text{Pb}_7\text{Sb}_8\text{S}_{19}$, кобальта – кобальтин CoAsS , а также касситерит SnO_2 и самородные Ni, Ag, Cu, Bi. На месторождении Кутын нами обнаружены и описаны минералы Te, Sb, Sn, Hg, Ni, Co, Mo, однако их разнообразие уступает минерализации Албазиноского месторождения. Сходная теллуридная минерализация (теллуриды Au, Ag, Pb) описана на золоторудных месторождениях Сихотэ-Алинской провинции Чульбаткан (Алексеев, Старостин, 2017), Малмыжском (Буханова и др., 2020), Многовершинном (Моисеенко, Эйриш, 1996). Особенностью теллуридной минерализации месторождения Кутын является присутствие теллуридов Sb и Hg – теллурантимоана и колорадоита.

Часто на золоторудных месторождениях Сихотэ-Алинской провинции отмечаются теллуриды висмута – например, на месторождениях Албазино, Малиновское, Пасечное, Болотистое и др. (Кемкина, Кемкин, 2018; Гвоздев и др., 2016; Гребенникова и др., 2021; Лотина, 2011). Несмотря на то, что в изученных пробах нами не обнаружено теллуридов висмута, примесь висмута в теллурантимоане может свидетельствовать о присутствии висмутовой минерализации.

Б.Б. Дамдиновым (2019) была предложена классификация золоторудных месторождений Восточного Саяна по минеральному составу продуктивной ассоциации, кото-

рую предлагается использовать и на сопредельных территориях. По этой классификации месторождение Кутын может быть отнесено к золото-теллуриднему типу, типоморфной особенностью которого является присутствие самородного золота и теллуридов Au, Ag, Pb, Bi.

ВЫВОДЫ

На основе изучения морфологии и состава порообразующих и рудных минералов и их взаимоотношений на месторождении Кутын были выделены четыре парагенетические ассоциации: **пирит-арсенопиритовая, золото-тетраэдрит-арсенопиритовая, золото-пиритовая и теллуридная**. Характер выделения и взаимоотношения минералов позволяют выделить здесь две стадии минералообразования – метасоматическую и жильную, соответствующие гидротермально-метасоматическому этапу. В зоне окисления развита **гётит-арсенатная** ассоциация гипергенного этапа.

Наиболее распространенными рудными минералами месторождения Кутын являются пирит и арсенопирит, причем состав последнего существенно меняется, характерны примеси Sb и Te. Самородное золото характеризуется пробностью 650–780 ‰, реже – 810–890 ‰. Значительное количество золота содержится в арсенопирите-2, иногда его примесь качественно фиксируется микрорентгеноспектральным анализом. При окислении золотосодержащих сульфидов высвобождающееся золото образует субмикронные выделения высокопробного золота во вторичных минералах. Другие минеральные формы благородных металлов представлены Ag-содержащим тетраэдритом, акантитом, теллуридами: гесситом, петцитом, штюцитом. Помимо перечисленных выше теллуридов Au и Ag, в рудах присутствуют алтаит, теллурантимон, колорадоит. Эволюция благороднометальной минерализации на месторождении Кутын контролируется снижением температуры и вариациями фугитивности серы и теллура.

Несмотря на различные геолого-структурные позиции, месторождения Ульбанского террейна – Кутын и Албазино во многом схожи по составу метасоматитов и руд, золотоносным ассоциациям, типоморфным особенностям минералов, что делает возможным их сравнение.

По классификации Б.Б. Дамдинова (2019), месторождение Кутын может быть отнесено к золото-теллуриднему типу, для которого характерно присутствие самородного золота и теллуридов Au, Ag, Pb, Sb, Hg.

Авторы выражают благодарность АО “Полиметалл Инжиниринг” за предоставленные пробы и образцы и признательны Н.С. Власенко за проведенные аналитические исследования. Статья значительно улучшилась благодаря отзыву анонимного рецензента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90102. Исследования проводились с использованием оборудования ресурсного центра “Геомодель” Научного Парка СПбГУ.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-35-90102.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А.С., Старостин В.И. Новое месторождение золота в Нижнем Приамурье Чульбактан (Хабаровский край) // Вест. Моск. ун-та. Серия 4. Геология. **2017**. № 1. С. 33–38.

Бортников Н.С., Крамер Х., Генкин А.Д., Крапива Л.Я., Санта-Крус М. Парагенезисы теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия (Республика Куба) // Геология рудн. месторожд. **1988**. № 2. С. 49–61.

Буханова Д.С., Кутырев А.В., Сидоров Е.Г., Чубаров В.М. Первая находка минералов платиновой группы в рудах Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения, Хабаровский край, Россия // ЗРМО. **2020**. Т. 149. № 2. С. 12–21.

Гвоздев В.И., Доброшевский К.Н., Вах А.С., Горячев Н.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г. Малиновское месторождение – новый тип золоторудной минерализации в Приморском крае, Россия (геология, минералогия, генезис) // Тихоокеанская геология. **2016**. Т. 35. № 1. С. 37–53.

Гребенникова А.А., Саядян Г.Р., Шлыков С.А. Новые данные по минералогии золоторудного месторождения Пасечное (Южный Сихотэ-Алинь, Россия) // ЗРМО. 2021. Т. 150. № 2. С. 28–41.

Дамдинов Б.Б. Минеральные типы месторождений золота и закономерности их размещения в юго-восточной части Восточного Саяна // Геология рудн. месторожд. 2019. Т. 61. № 2. С. 23–38.

Забродин В.Ю., Бородин А.М., Гурьянов В.А., Зелепугин В.Н., Кисляков С.Г., Кременецкая Н.А., Махинин А.В., Фролов Ф.С., Шварев М.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-53 – Шантарские острова. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 448 с.

Кемкина Р.А., Кемкин И.В. Особенности вещественного состава руд и рудно-формационная принадлежность Албазинского золоторудного месторождения, Сихотэ-Алиньская золотоносная провинция // Вестник ВГУ. Серия: геология. 2018. № 2. С. 98–106.

Лотина А.А. Золото-висмут-теллурическая минерализация участка Болотистого (Северо-Западный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30. № 1. С. 97–107.

Малых М.Ю. Геолого-структурные особенности золотого оруденения месторождения Кутын / Новое в познании процессов рудообразования. Тез. докл. М.: ИГЕМ РАН, 2014. С. 205–206.

Малых М.Ю. Минеральный состав золотоносных кварц-серицитовых метасоматитов месторождений Озерное и Кутын (Хабаровский край) золото-кварцевого убогосульфидного типа // Известия вузов. Геология и разведка. 2015. № 4. С. 30–34.

Моисеенко В.Г., Эйриш Л.В. Золоторудные месторождения Востока России. Владивосток: Дальнаука, 1996. 352 с.

Трушин С.И., Кириллов В.Е., Буханова Д.С., Чубаров В.М. Минералогические особенности золотых руд Албазинского и Ульбанского рудных районов (Хабаровский край) // Регион. геология и металлогения. 2019. № 78. С. 91–97.

Трушин С.И., Кириллов В.Е., Иванов В.В., Полин В.Ф. Магматогенные рудоносные системы месторождений золота Ульбанского террейна (Хабаровский край, Россия) // Разведка и охрана недр. 2021. № 7. С. 21–35.

Ханчук А.И., Иванов В.В. Мезо-кайнозойские геодинамические обстановки и золотое оруденение Дальнего Востока России // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 11. С. 1635–1645.

Шевченко Б.Ф., Попеко Л.И., Диденко А.Н. Тектоника и эволюция литосферы восточной части Монголо-Охотского орогенного пояса // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 3. С. 667–682.

Эйриш Л.В., Сорокин А.П. Коренные источники золотоносных россыпей Дальнего Востока России, степень их эродированности // Тихоокеанская геология. 2005. Т. 24. № 4. С. 62–75.

Ore Mineralization of the Gold-Bearing Kutyn Deposit, Khabarovsk Region

A. M. Azarian^{a, b, *}, E. V. Badanina^a, and I. S. Anisimov^b

^aSaint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

^bJCS Polymetal Engineering, Saint-Petersburg, Russia

*e-mail: adel-sagitova@yandex.ru

The article presents the first results of mineralogical studies of gold-bearing quartz-carbonate-sericite metasomatites of the Kutyn deposit, Khabarovsk Krai. Mineral assemblages with native gold, variations of its shapes, sizes and chemical composition have been studied. It was found that native gold with a fineness of 650–780 ‰ is associated with Sb-containing arsenopyrite, pyrite, fahlore, galena, hessite. Higher-grade gold (810–850 ‰) performs cracks in arsenopyrite. The fineness of gold from quartz veins is 730–770 ‰. Telluride mineralization is represented by hessite, altaite, petzite, stutzite, tellurantimon, coloradoite. Based on the analysis of the composition of minerals, their morphology, relationships, as well as the trace element composition of pyrite (up to 6.9 wt % As) and arsenopyrite (up to 2.8 wt % Sb and up to 5.4 wt % Te), that were the through minerals for this system, four consecutive ore assemblages of the hydrothermal-metasomatic period are distinguished: pyrite-arsenopyrite, gold-tetrahedrite-arsenopyrite, gold-pyrite, telluride. The hypergenic period consists in the development of the goethite-arsenate assemblage with the formation of submicron inclusions of native gold during the oxidation of gold-containing pyrite and arsenopyrite. Based on the chlorite geothermometer (Cathelineau, Nieva, 1985), it was found that the temperature of the early manifestation of the metasomatic process corresponds to the interval 229–278 °C. In accordance with the stability diagram of the Au–Ag–Te system (Bort-

nikov et al., 1988), the formation temperature of the gold-tetrahedrite-arsenopyrite assemblage cannot be lower than 170 °C. For the first time, narrow variations of sulfur (from –16.8 to –15.0) and tellurium (from –16.5 to –15.2) fugitivity values were estimated at 200 °C, corresponding to the formation of the studied gold-tetrahedrite-arsenopyrite assemblage.

Keywords: Kutyn deposit in Khabarovsk region, native gold, gold-telluride mineralization, pyrite, arsenopyrite, quartz-carbonate-sericite metasomatites

REFERENCES

- Afifi A.M., Kelly W.C., Essene J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria. *Econ. Geol.* **1988**. Vol. 83. P. 377–394.
- Alekseev A.S., Starostin V.I. New gold deposit in Lower Amur – Chulbatkan (Khabarovsk region). *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology.* **2017**. N 1. P. 33–38 (in Russian).
- Barton P.B. Jr, Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities. In: *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.Y.: Wiley Interscience, **1979**. P. 278–403.
- Bortnikov N.S., Kramer Kh., Genkin A.D., Krapiva L.Ya., Santa Cruz M. Paragenesis of gold silver tellurides in the Florencia deposit, Cuba. *Int. Geology Review.* **1988**. Vol. 30 (3). P. 294–306.
- Bukhanova D.S., Kutyrev A.V., Sidorov E.G., Chubarov V.M. The first finding of platinum group minerals in the Malmyzh gold-copper porphyry deposit, Khabarovsk region, Russia. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Sci.)*. **2020**. Vol. 149. N 2. P. 12–21 (in Russian).
- Cathelineau M., Nieva D. A Chlorite Solid Solution. Geothermometer the Los Azufres (Mexico) Geothermal System. *Contrib. Miner. Petrol.* **1985**. Vol. 91. P. 235–244.
- Damdinov B.B. Mineral types of gold deposits and regularities of their distribution in south-eastern part of the East Sayan. *Geol. Ore Deposits.* **2019**. Vol. 61. N 2. P. 118–132.
- Eirish L.V., Sorokin A.P. The root sources of gold-bearing placers of the Russian Far East, the degree of their erosion. *Russian J. Pacific Geol.* **2005**. Vol. 24. N 4. P. 62–75 (in Russian).
- Grebennikova A.A., Sayadyan G.R., Shlykov S.A. New data on mineralogy of the Pasechnoe gold deposit (Southern Sikhote-Alin, Russia). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Sci.)*. **2021**. Vol. 150. N 2. P. 28–41 (in Russian).
- Gvozdev V.I., Dobroshevskii K.N., Vakh A.S., Goryachev N.A., Stepanov V.A., Fedoseev D.G. Malinovka Deposit – a new type of gold mineralization in Primorye, Russia: geology, mineralogy, and genesis. *Russian J. Pacific Geol.* **2016**. Vol. 10. N 1. P. 34–49.
- Kemkina R.A., Kemkin I.V. Features of the material composition of ores and ore-formation belonging of the Albazinsky gold deposit, Sikhote-Alin gold-bearing province. *VSU bulletin. Series Geology.* **2018**. N 2. P. 98–106 (in Russian).
- Khanchuk A.I., Ivanov V.V. Meso-Cenozoic geodynamic conditions and gold mineralization of the Russian Far East. *Geology and Geophysics.* **1999**. Vol. 40. N 11. P. 1635–1645 (in Russian).
- Krachek F.C., Ksanda C.J., Cabri L.J. Phase relations in the silver-tellurium system. *Amer. Miner.* **1966**. Vol. 51. P. 14–28.
- Lotina A.A. Gold-bismuth-tellurium mineralization of the Bolotisty area (Northwestern SikhoteAlin). *Russian J. Pacific Geol.* **2011**. Vol. 30. N 1. P. 97–107 (in Russian).
- Malykh M.Yu. Geological and structural features of the gold mineralization of the Kutyn deposit. In: *New in the knowledge of ore formation processes. Abs. reports*. Moscow: IGEM RAS. **2014**. P. 205–206 (in Russian).
- Malykh M.Yu. A mineral composition of gold-bearing quartz-sericite metasomatites of Ozernoe and Kutyn deposits (Khabarovsk krai) of low-sulphide gold-quartz type. *Proc. of higher educational establishments. Geology and exploration.* **2015**. N 4. P. 30–34 (in Russian).
- Moiseenko V.G., Eirish L.V. Gold deposits of the Far East, Russia. Vladivostok: Dalnauka, **1996**. 352 p. (in Russian).
- Paktunc D., Majzlan J., Huang A., Thibault Y., Johnson M.B., White M.A. Synthesis, characterization, and thermodynamics of arsenates forming in the Ca-Fe(III)-As(V)-NO₃ system: Implications for the stability of Ca-Fe arsenates. *Amer. Miner.* **2015**. Vol. 100. N 8–9. P. 1803–1820.
- Shevchenko B.F., Popeko L.I., Didenko A.N. Tectonics and evolution of the lithosphere of the eastern part of the Mongol-Okhotsk orogenic belt. *Geodynamics and tectonophysics.* **2014**. Vol. 5. N 3. P. 667–682 (in Russian).
- Surour A.A., Ahmed A.A., Harbi H.M. Yukonite-like alteration products (Ca–Fe arsenate and As-rich Fe-oxyhydroxide) formed by in situ weathering in granodiorite, Bi'r Tawilah gold prospect, Saudi Arabia. *Eur. J. Miner.* **2013**. Vol. 25. P. 61–70.

Trushin S.I., Kirillov V.E., Bukhanova D.S., Chubarov V.M. Mineralogical features of gold ores from the Albazinsky and Ulbansky ore districts (Khabarovsk Territory). *Regional Geology and Metallogeny*. **2019**. N 78. P. 91–97 (*in Russian*).

Trushin S.I., Kirillov V.E., Ivanov V.V., Polin V.F. Magmatogenic ore-bearing systems of gold deposits of the Ulban terrane (Khabarovsk krai, Russia). *Prospect and protection of mineral resources*. **2021**. N 7. P. 21–35 (*in Russian*).

Vink B.W. Stability relations of antimony and arsenic compounds in the light of revised and extended Eh–pH diagrams. *Chem. Geol.* **1996**. Vol. 130. P. 21–30.

Zabrodin V.Yu., Borodin A.M., Guriyanov V.A., Zelepugin V.N., Kislyakov S.G., Kremeneckaya N.A., Makhinin A.V., Frolov F.S., Shvarev M.M. State Geological Map of the Russian Federation scale 1 : 1000000 (third generation). The Far Eastern series. Sheet N-53 – Shantar Islands. Explanatory note. Saint Petersburg: VSEGEI press, **2007**. 448 p. (*in Russian*).