

---

---

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

---

---

**НОВЫЕ ДАННЫЕ О МИНЕРАЛОГИИ ЗОЛОТО-СУРЬМЯНОГО  
ОРУДЕНЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КРОХАЛИНОЕ  
(ЯНО-КОЛЫМСКИЙ ПОЯС)**

© 2025 г. Д. члены О. Т. Соцкая\*, А. В. Альшевский, Н. А. Горячев

*Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН,  
ул. Портовая, 16, Магадан, 685000, Россия*

*\* e-mail: sotskaya@neisri.ru*

Поступила в редакцию: 05.12.2024

После доработки: 17.03.2025

Принята к публикации: 16.04.2025

В статье приведены результаты исследований минералогии руд малоизученного золото-сурьмяного месторождения Крохалиное (дайковый тип), расположенного на юго-восточном фланге Яно-Колымского орогенного пояса. Сульфидная минерализация представлена в основном стибнитом, бертьеритом, арсенопиритом и пиритом, реже отмечаются сфалерит и джемсонит; из минералов золота присутствуют высокопробное самородное золото, аурустибит, электрум и «горчичное» золото (ауроантимонат). Самородное золото месторождения является наиболее высокопробным из всех известных месторождений Центрально-Колымского региона.

*Ключевые слова:* золото-сурьмяное оруденение, дайка, стибнит, арсенопирит, пирит, джемсонит, бертьерит, самородное золото, аурустибит, ауроантимонат, электрум, «горчичное» золото

**DOI:** 10.31857/S0869605525030033

## ВВЕДЕНИЕ

Золото-сурьмяное оруденение — широко распространенный тип промышленных рудных месторождений в пределах Яно-Индибирского сектора Яно-Колымского орогенного пояса (крупные месторождения Сарылах и Сентачан, приуроченные к зоне Адыча-Тарынского разлома). Эти объекты достаточно хорошо изучены и монографически охарактеризованы (Бергер, 1978; Индолев и др., 1979; Амузинский и др., 2001 и др.). В то же время сурьмяная минерализация распространена шире и за пределами этого разлома в Колымском секторе (юго-восточном фланге) Яно-Колымского пояса, где она чаще всего представлена минерализованными дайками сильно измененных порфиритов и порфириров (Бергер, 1978; Горячев и др., 2023). По структурной позиции в зонах крупных разломов и раннемеловым датировкам, эти месторождения близки к объектам Яно-Индибирского сектора (Горячев и др., 2023).

Месторождение Крохалиное является одним из таких месторождений. Оно известно с начала 30-х годов прошлого века (Панычев, Федотов, 1973; Бергер, 1978; Маркова и др., 1980). Предлагаемая статья посвящена минералого-геохимической характеристике золото-сурьмяных руд этого месторождения как представителя дайкового структурно-морфологического типа плутоногенных золоторудных месторождений региона (Горячев, 1998).

Геологические особенности месторождения были кратко рассмотрены нами в сводной публикации по раннемеловому оруденению этого сектора (Горячев и др., 2023), а также А. В. Волковым с соавторами (Волков и др., 2008) в статье, обобщающей данные о дайковых месторождениях Верхне-Колымского региона. В нашей статье приводятся новые данные по минералогии сурьмяной минерализации с акцентом на впервые выполненном описании самородного золота месторождения: морфологии и размере зерен, минералах-спутниках (пирите, арсенопирите, стибните, бертьерите, сфалерите), химическом составе и элементах-примесях.

## ОЧЕРК ГЕОЛОГИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Золото-сурьмяное месторождение Крохалиное было открыто Е. Т. Шаталовым в 1933 г. Разведку месторождения проводили В. А. Гончаренко (1934 г.), Л. Н. Келль и В. И. Степанов (1936 г.), И. Р. Якушев (1949—1951 гг.), В. П. Полеванов (1982 г.), С. А. Горбунов (1985 г.) и др. Исследованием геологического строения района и структуры рудного поля месторождения Крохалиное занимались А. И. Федотов (1957 г.) и И. А. Панычев (1964—1966 гг.). Месторождение находится в районе знаменитых золоторудных месторождений Колымы — Среднекан и Утинское и ряда других (дайка Арик; Волков и др., 2008). Координаты месторождения: N62°19' и E152°03'.

В структурном плане месторождение Крохалиное расположено в Оротуканской ветви на юго-восточном фланге Иньяли-Дебинского мегасинклиория Яно-Колымского орогенного пояса. В строении рудного поля принимают участие раннеюрские терригенные отложения, прорванные дайками среднего и кислого состава позднеюрско-раннемелового возраста. По реликтам первичных минералов состав даек — диоритовые (отчасти кварц-диоритовые) порфириды и гранит-порфиры. Рудовмещающие осадочные породы на месторождении представлены переслаиванием песчаников, алевролитов и глинистых сланцев, редко отмечаются туффиты (Панычев, Федотов, 1973). Рудоносная дайка локализована на крыльях небольшой антиклинальной складки субширотного направления, ядро которой вскрыто долиной руч. Сурьмяного. Согласно наблюдениям предыдущих исследователей, в рудном поле развиты две системы разрывных нарушений: северо-западного простирания, вдоль которых локализована рудоносная дайка и северо-восточного простирания, секущих эту дайку.

Разведочными работами дайка прослежена в субширотном направлении на 3 км с падением на север — северо-восток под углами 60—80°. Средняя мощность дайки 6—8 м (при колебаниях от 4 до 36 м) (Волков и др., 2008). Дайка интенсивно деформирована и на рудоносных участках рассечена разноориентированными сульфидно-кварцевыми прожилками, мощность которых варьирует от 2 см до 0.5 м. По морфологии выделяются линзоподобные, лестничные, сетчатые, ячеистые, брекчиевидные и брекчиевые кварцево-жильные образования, широко развитые на левом склоне руч. Сурьмяного в рудном поле месторождения Крохалиное. На этом участке, детально исследованном нами в 1984, 2004 и 2022 гг., дайка интенсивно минерализована бертьеритом и стибнитом, образующими сплошные сульфидные желваки и линзы (массивные — т. н. «чугунные» Au-Sb руды) с повышенной золотоносностью. Во вмещающих осадочных породах в незначительном количестве развиты кварцевые, альбит-кварцевые, карбонат-кварцевые (с пиритом и стибнитом) и хлорит-кальцит-кварцевые жилы и прожилки (Панычев, Федотов, 1973). Среднее содержание золота на массу дайки по обогащенному блоку минерализованного интервала по разведочным данным (траншея 10) оценивается в 2.92 г/т (Волков и др., 2008), что приемлемо для открытой разработки.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минералогия месторождения Крохалиное исследовалась в распилах штуфов оруденелого дайкового тела и в тяжелых фракциях протолочек и шлихов элювия окисленных в различной степени первичных руд. Изучение полированных образцов (аншлифов) и монтированных минераграфических препаратов (шашек) с самородным золотом выполнено на микроскопе Axioplan (Carl Zeiss).

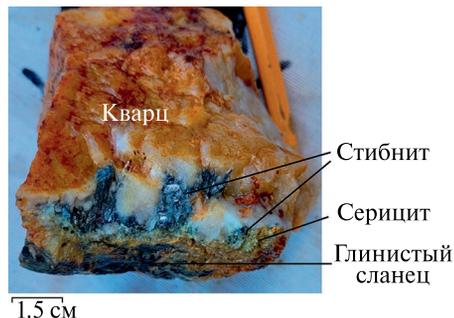
Данные количественного анализа минералов получены на микроанализаторе Camebax с использованием ЭДС-детектора Xmax-50 фирмы Oxford Instruments, программное обеспечение AZtec, режим Point ID (Северо-Восточный ЦКП, СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, аналитик — О. Т. Соцкая). Условия проведения измерений: ускоряющее напряжение — 20 кВ, увеличение — 200—1200<sup>×</sup>. Оптимизация для количественных вычислений проводилась по химически чистой меди каждые 1.5—2 ч. В качестве стандартов использовали аттестованные природные и синтетические материалы. Аналитические линии: *K-серия* для S, Fe и As; *L-серия* для Sb и Ag; *M-серия* для Pb и Au. Эталоны: FeS<sub>2</sub> для S и Fe; FeAsS для As; Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> для Sb; PbS для Pb; Au<sub>80</sub>Ag<sub>20</sub> для Au и Ag. Предел обнаружения элементов составляет 0.3 мас. %, диаметр электронного луча 3—4 мкм.

Монофракции массивного самородного золота были проанализированы количественным спектральным анализом с порогом обнаружения 10—20 г/т (0.001—0.002 мас. %, по методике ЦНИГРИ МПР) в ЦЛ СВПГО (г. Магадан, аналитик Н. П. Степаненко) на 14 элементов: Cu, Sb, Pb, Sn, Bi, Fe, As, Mn, Zn, Te, Co, Ni, Pt, Pd. Методика этого анализа предполагает развальцовку исходных золотин и кислотную очистку их поверхности с полным удалением серебра и возможных микровключений ассоциирующих рудных и жильных минералов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Геолого-минералогическая характеристика изученных руд

Было проведено детальное исследование минералогии руд восточной части дайки, характеризующейся тесным совместным развитием гидротермальных образований раннего и позднего минерагенических этапов в ареале распространения богатой золото-сурьмяной минерализации. В месте наблюдения дайка сильно дислоцирована как вдоль ее простирания, так и в поперечном направлении, а также интенсивно изменена (хлоритизирована, серицитизирована, окварцевана). Соответственно дайка содержит прожилки двух типов (Горячев и др., 2023). Ранние прожилки и жилы массивного, реже — шестоватого кварца мощностью до 5—15 см с бурым анкеритом, обычно в зальбандах содержат местами обильную вкрапленность и гнезда пирита и арсенопирита. Иногда в центре жил наблюдаются пустоты друзовидного кварца, а в зальбандах отмечен альбит. Эти прожилки часто несут зеркала скольжения. В них отмечены гнезда более позднего стибнита, который в ассоциации с мелкочешуйчатым мусковитом развивается вдоль зальбандов таких ранних жилок (рис. 1). В северо-восточном контакте



**Рис. 1.** Развитие серицит-стибнитовой ассоциации позднего этапа по контакту жилы раннего кварца.

**Fig. 1.** Development of a late-stage sericite-stibnite assemblage along the contact of an early quartz vein.

вдоль ее простирания, так и в поперечном направлении, а также интенсивно изменена (хлоритизирована, серицитизирована, окварцевана). Соответственно дайка содержит прожилки двух типов (Горячев и др., 2023). Ранние прожилки и жилы массивного, реже — шестоватого кварца мощностью до 5—15 см с бурым анкеритом, обычно в зальбандах содержат местами обильную вкрапленность и гнезда пирита и арсенопирита. Иногда в центре жил наблюдаются пустоты друзовидного кварца, а в зальбандах отмечен альбит. Эти прожилки часто несут зеркала скольжения. В них отмечены гнезда более позднего стибнита, который в ассоциации с мелкочешуйчатым мусковитом развивается вдоль зальбандов таких ранних жилок (рис. 1). В северо-восточном контакте

дайки и вмещающих пород отмечено развитие тектонической брекчии с мелкими обломками углисто-глинистых черных сланцев и редких чечевицеобразных включений пород дайки и жильного молочно-белого кварца раннего этапа. Размер обломков не превышает 2—3 см и все это сцементировано серым мелкокристаллическим кварцем с тонким арсенопиритом и стибнитом, принадлежащим к позднему этапу. Собственно поздние жилы и прожилки серого полупрозрачного микрокристаллического кварца с редким стибнитом мощностью до 2—3 см, обычно — миллиметры, распределены как согласно сланцеватости пород, так и поперек нее.

### Минеральные ассоциации

Согласно полевым наблюдениям и результатам минералогического изучения руд, оруденение дайки Крохалиная было сформировано в ходе двух крупных минерагенических этапов: 1) раннего, золото-сульфидно-кварцевого и 2) позднего, золото-сурьмяного. Рудная минерализация раннего этапа представлена вкрапленностью пирита и арсенопирита в дайке и во вмещающих осадочных породах, а также прожилками и жилами, сульфидно-кварцевого и сульфидного состава, сложенными в основном кварцем при подчиненных количествах серицита, анкерита, пирита и арсенопирита. Ареал ранней золото-пирит-арсенопиритовой минерализации прослеживается по всему протяжению деформированной дайки, но поздняя золото-сурьмяная минерализация тяготеет только к ее восточному (изученному нами) флангу, рассеченному зоной поперечных разломов северо-восточного простирания. Именно в ней отмечены промышленно важные массивные («чугунные») сурьмяные руды, характерные для крупных золото-сурьмяных месторождений региона (Амузинский и др., 2001). На месторождении они образуют отдельные маломощные (до 10 см) непотяженные (до 1—2 м) концентрированные линзовидные тела среди рассеянных жильно-прожилковых золотых руд раннего этапа (Панычев, Федотов, 1973; Шило и др., 1988). Этим этапам соответствуют две минеральные ассоциации, установленные в рудах: ранняя — пирит-1-арсенопирит-1-альбит-анкерит-кварцевая с самородным золотом (Au-I) и поздняя — пирит-2-арсенопирит-2-стибнит-бертьерит-Au-II-серицит-кварцевая, наложенная (пересечения и замещение) на раннюю в виде прожилков гребенчатого кварца с анкеритом, крупными гнездами сплошных стибнита и бертьерита и практически недеформированная.

К ранней ассоциации, помимо отмеченных ранее, относятся реликтовые выделения агрегатов пирита-1 в стибните, во вмещающих породах и жильном кварце, а также включения джемсонита в кварце. Для поздней ассоциации характерны полигональнозернистый стибнит и бертьерит, пентагон-додекаэдрический пирит-2 и мелкоромбический идиоморфный арсенопирит. К поздней ассоциации также относятся немногочисленные включения редких минералов — аурустибита и «горчичного» золота.

Повышенная, вплоть до промышленной, золотоносность минерализованных дайковых пород месторождения Крохалиное определяется, как показали наши исследования, достаточно широким развитием в гидротермалитах обоих изученных минерагенических этапов выделений золота преимущественно в самородной форме (система Au—Ag), а также (в гораздо меньшей степени) присутствием других золотосодержащих минералов (аурустибита и др.).

### Характеристика минералов

#### *Сульфиды*

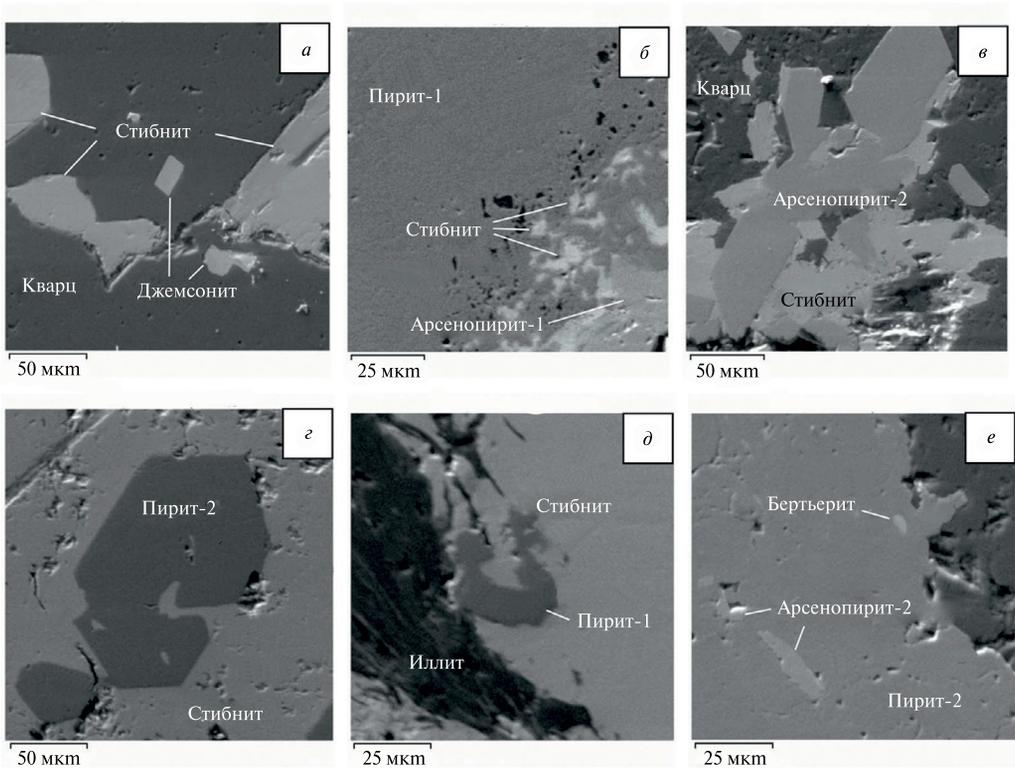
Сульфидная минерализация представлена в основном стибнитом, бертьеритом, арсенопиритом и пиритом; реже отмечаются сфалерит и джемсонит. Химический состав изученных сульфидов приведен в табл. 1.

Таблица 1. Состав сульфидов месторождения Крохалиное (среднее по месторождению), мас. %  
 Table 1. Composition of sulfides of the Krokhalino deposit (average for the deposit), wt %

№ п/п	Минерал	n	Fe	Pb	Zn	As	Sb	S	Формула
1	Стибит	55	—			—	71.85	28.01	$Sb_{2,02}S_{2,98}$
		8	35.85			42.05	—	22.38	$Fe_{1,01}As_{0,89}S_{1,10}$
	Арсенопирит-1	28	35.73			41.59	—	22.04	$Fe_{1,02}As_{0,88}S_{1,10}$
		86	35.84			40.17	0.86 (0.42÷1.63)	22.82	$Fe_{1,01}As_{0,85}Sb_{0,01}S_{1,13}$
2	Арсенопирит-1 в рисовидном кварце	4	35.61			42.53	—	21.87	$Fe_{1,01}As_{0,90}S_{1,08}$
		6	35.52			41.76	1.26 (0.48÷2.76)	21.47	$Fe_{1,02}As_{0,89}Sb_{0,02}S_{1,07}$
	Арсенопирит-1 в антимоните	3	35.46			41.92	—	21.75	$Fe_{1,02}As_{0,89}S_{1,09}$
		5	35.63	—		41.30	0.86 (0.44÷1.35)	22.20	$Fe_{1,01}As_{0,88}Sb_{0,01}S_{1,10}$
3	Пирит-1	12	47.18			—		54.05	$Fe_{1,00}S_{2,00}$
		5	46.12			1.13 (0.62÷2.45)		53.06	$Fe_{0,99}As_{0,02}S_{1,99}$
	Пирит-2	44	46.77			—		53.70	$Fe_{1,00}S_{2,00}$
		41	46.24			1.70 (0.3÷3.94)		52.54	$Fe_{1,00}As_{0,03}S_{1,97}$
4	Джемсонит	4	43.67			0.86 (0.58÷1.42)	2.88 (1.42÷4.71)	51.64	$Fe_{0,97}Sb_{0,03}As_{0,01}S_{1,99}$
		1	46.24			—	1.81	53.41	$Fe_{0,99}Sb_{0,02}S_{1,99}$
		17	2.52 (2.35÷2.66)	40.53		—	36.23	21.59	$Pb_{4,20}Fe_{0,97}Sb_{6,39}S_{14,44}$
5	Бертьерит в пирите	2	15.87			1.31 (0.61÷2.01)	53.67	30.47	$Fe_{1,18}Sb_{1,82}As_{0,07}S_{3,93}$
		1	16.22			—	53.02	30.98	$Fe_{1,20}Sb_{1,80}S_{4,00}$
		28	13.07	—		—	57.49	28.86	$Fe_{1,02}Sb_{2,06}S_{3,92}$
6	Сфалерит	4	2.11		63.66	—	34.23	$Zn_{0,94}Fe_{0,04}S_{1,02}$	

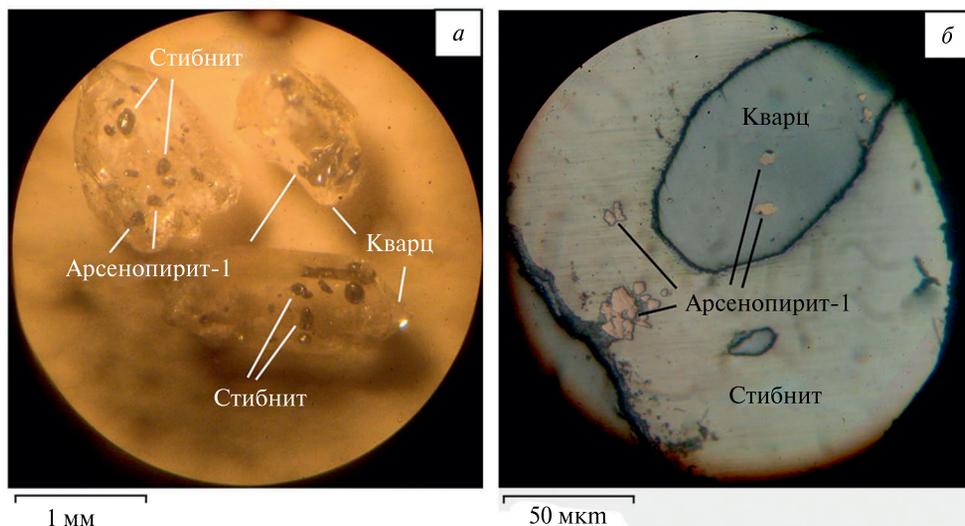
Примечание. n — количество выполненных анализов.

*Стибнит* представлен рассеянной вкрапленностью агрегатов призматических зерен и таблитчатых кристаллов в корродированном кварце и вмещающих дайковых породах (рис. 2, *а*), иногда сливающихся в сплошные рудные массы мелко-среднезернистых «чугунных» руд, типоморфных для золото-сурьмяных месторождений, частично освоенных в 30-е гг. Распыленные включения стибнита встречаются в агрегатах ранних пирита и кварца (рис. 2, *б*). Формирование крупных (до 5—10 см и более) стяжений стибнита (и сопутствующего бертьерита) сопровождалось мощнейшей коррозией кварцевых жил и прожилков раннего этапа, вплоть до их полного растворения и переотложения в составе гидротермальных образований позднего этапа, включая сульфиды (пирит и арсенопирит), а также самородное золото. В протолочках массивных «чугунных» руд в незначительном количестве были встречены мелкие (1.0—0.4 мм) обломки друзовидного, часто двухвершинного водяно-прозрачного кварца («рисовидный» кварц), содержащие многочисленные каплевидные включения непрозрачных сульфидных минералов (до 7 мкм) (рис. 3, *а*, *б*). Большая часть этих



**Рис. 2.** (*а*) — Выделения стибнита и кристалл джемсонита в кварце, проба Кр-1-1; (*б*) — агрегат пирита-1 замещается стибнитом в сростке с арсенопиритом-1, проба КР-3-54; (*в*) — сросток кристаллов сурьмянистого арсенопирита-2 со стибнитом, проба КР-3-41; (*г*) — идиоморфные кристаллы пирита-2 в стибните, проба Кр-3-11; (*д*) — включение реликтового пирита-1 в стибните в сростании с иллитом, проба Кр-2-21; (*е*) — микровключения бертьерита и арсенопирита-2 в пирите-2, проба Кр-3-52. Изображения в отраженных электронах.

**Fig. 2.** (*a*) — Stibnite segregations and jamesonite crystal in quartz, sample Kr-1-1; (*b*) — pyrite-1 aggregate is replaced by stibnite in an intergrowth with arsenopyrite-1, sample Kr-3-54; (*c*) — an intergrowth of antimony arsenopyrite-2 crystals with stibnite, sample Kr-3-41; (*г*) — idiomorphic crystals of pyrite-2 in stibnite, sample Kr-3-11; (*d*) — inclusion of relict pyrite-1 in stibnite in srastanii s illitom, sample Kr-2-21; (*e*) — microinclusions of berthierite and arsenopyrite-2 in pyrite-2, sample Kr-3-52. BSE images.



**Рис. 3.** «Рисовидный» кварц с каплевидными включениями сульфидов из «чугунных» руд месторождения Крохалино: (а) общий вид, (б) полированный срез стибнитовой капли.

**Fig. 3.** “Rice-like” quartz with drop-shaped inclusions of sulphides from “cast iron” ores of the Krokhalinoe deposit: (a) general view, (b) polished section of an stibnite drop.

каплевидных выделений представлена стибнитом, в мелких выделениях — арсенопиритом (до 25 мкм) (см. рис. 3, б).

Состав стибнита стехиометрический (см. табл. 1), для него характерна тесная ассоциация с иллитом.

*Арсенопирит* предствлен двумя генерациями. В сростках с пиритом-1 обнаружены фрагменты раннего арсенопирита-1 (рис. 2, б). Арсенопирит этой генерации является беспримесным. Арсенопирит-2 образует скопления и сростки кристаллов ромбической формы размером до 250 мкм и их угловатых обломков в нерудной массе, реже слагает совместные агрегаты со стибнитом (рис. 2, в) и образует включения (до 30 мкм) в пирите-2 (рис. 2, е). В арсенопирите-2, который непосредственно ассоциирует со стибнитом, часто отмечается примесь Sb ( $0.42 \div 1.63$  мас. %) (рис. 2, в, табл. 1). В то же время более мелкие (50—100 мкм) ромбические кристаллы арсенопирита-2 в кварце также часто являются сурьмянистыми (табл. 1). При изучении микрозерен реликтового арсенопирита-1, ассоциированных с рисовидным кварцем (внутри рисовидных зерен и возле них в стибните) установлено присутствие примеси Sb в отличие от арсенопирита-1 в сростках с пиритом-1 (табл. 1). Примесь Sb в арсенопирите, по всей видимости, имеет двойную природу — как связанную с микровключениями стибнита, так и структурную. В целом, для арсенопирита двух генераций характерна высокая сернистость, свойственная арсенопириту раннемеловых золото-сурьмяных месторождений Сарылах и Сентачан (Амузинский и др., 2001).

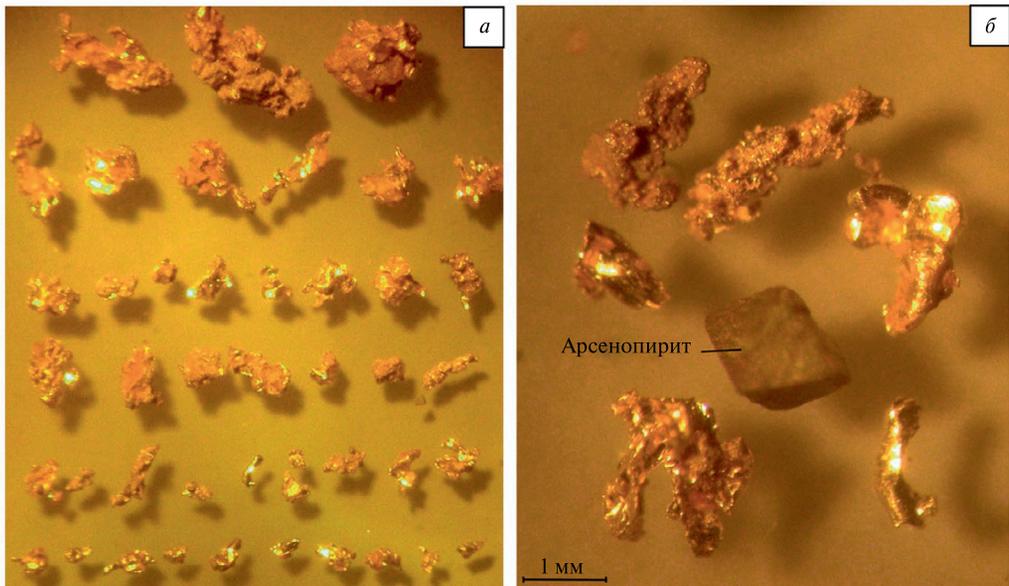
*Пирит* также встречается в двух генерациях. Пирит-1 наблюдается в виде единичных изометричных зерен (до 30 мкм) в породе, агрегатных сростаний и реликтовых включений неправильной формы в стибните (до 75 мкм) (рис. 2, б, д). Пирит-2 слагает идиоморфные кристаллы пентагон-додекаэдрической формы (размером до 200 мкм) в стибните (рис. 2, е), реже образует бесформенные скопления с включениями арсенопирита-2 и бертьерита (рис. 2, е). Пирит обеих генераций содержит примесь As ( $0.3 \div 3.94$  мас. %). В пирите-2, находящемся в ассоциации со стибнитом, фиксируется

примесь Sb ( $1.42 \div 4.71$  мас. %) (табл. 1). Распределение примесных элементов в пирите и арсенопирите неоднородное.

По сравнению с соседними дайковыми золоторудными месторождениями Утинское, Штурмовское, дайка Новая и классическими Au-Sb-месторождениями Якутии (Сарылах и Сентачан), пирит месторождения Крохалиное более мышьяковистый и содержит примесь Sb. Арсенопирит изученного месторождения также содержит примесь Sb, которая ранее не отмечалась в арсенопирите сравниваемых эталонных Sb-месторождений (Альшевский, 2009; Амузинский и др., 2001).

*Джемсонит* присутствует в виде единичных призматических кристаллов размером 15—25 мкм в кварце (рис. 2, а). Его состав (табл. 1) обычен для золото-кварцевых месторождений (Амузинский и др., 2009; Гамянин, 2001).

*Бертьерит* в виде редких микровключений (размером около 6 мкм) обнаружен в пирите-2 (рис. 2, е). В его составе отмечается примесь As ( $0.61 \div 2.01$  мас. %). В «чугунных» массивных рудах установлен беспримесный бертьерит, который присутствует в количествах, соизмеримых со стибнитом (табл. 1 и рис. 5, з). Весьма характерна субграфическая структура золото-бертьеритовых сростаний (рис. 5, е), обусловленная, как вполне обоснованно предполагается (Гамянин и др., 1987; Амузинский и др., 2001), гипогенным распадом исходного аурустибита при повышении окислительного потенциала среды минералообразования. Самородное золото в этих графических сростаниях «беспримесное» (не содержит серебра); ячейки периферийного «губчатого» агрегата золота содержат реликты первичных



**Рис. 4.** Морфология и размерность зерен самородного золота месторождения Крохалиное: (а) Au-I (классы крупности 0.25—3.0 мм); (б) типичные губчатые с моховидной поверхностью (две верхние золотины) и сростки гладких блестящих монокристаллов самородного золота Au-II. В центре — характерный ромбовидный (псевдопирамидальный) кристалл сопутствующего арсенопирита.

**Fig. 4.** Morphology and grain size of native gold at the Krokhalinoe deposit: (a) Au-I (size classes 0.25—3.0 mm); (b) typical spongy with a mossy surface (two upper gold grains) and intergrowths of smooth shiny single crystals of native gold Au-II. In the center is a characteristic rhomboid (pseudo-pyramidal) crystal of accompanying arsenopyrite.

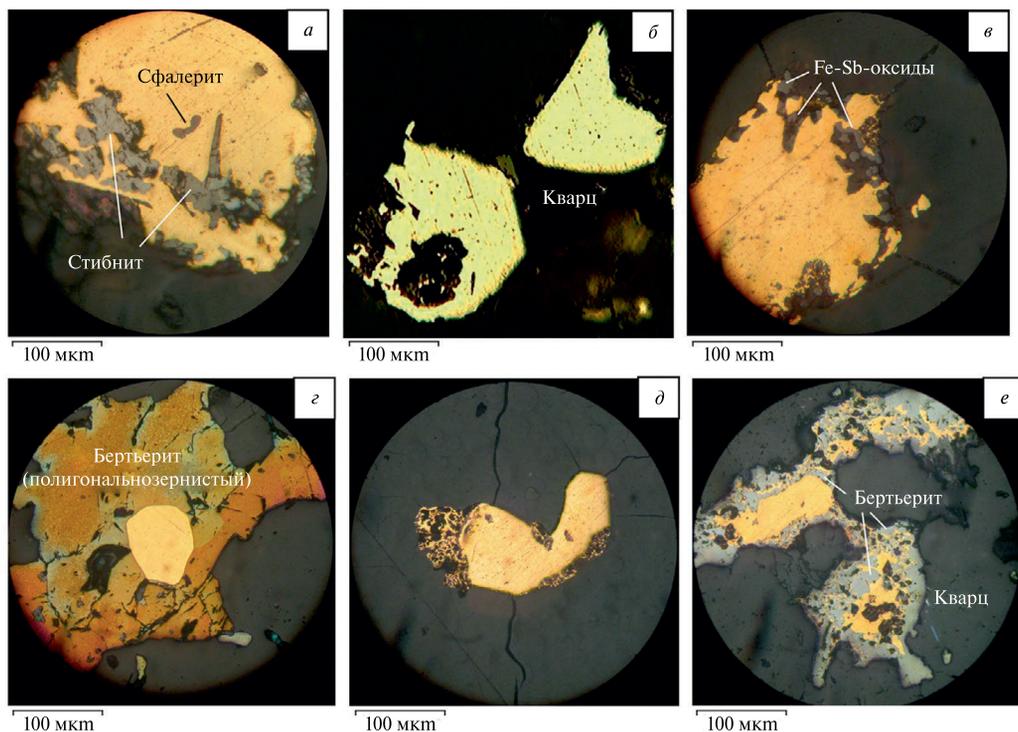


Рис. 5. Рудные сростания массивного самородного золота месторождения Крохалиное: (а–в) Au-I и (г–е) Au-II.

Fig. 5. Ore intergrowths of massive native gold of the Krokhalinoe deposit: (a–в) Au-I and (г–е) Au-II.

сульфидов сурьмы, но чаще — гетерогенный агрегат AuSb-оксидных фаз, в том числе и «горчичного» золота (ауроантимоната  $\text{AuSbO}_3$ ) (Гамянин и др., 1987).

*Сфалерит* распространен в малосульфидных рудах в ассоциации с пиритом-I. Минерал содержит до 2 мас. % железа и относится к маложелезистой разновидности (табл. 1). В самородном золоте минерализации раннего этапа отмечаются микровключения сфалерита размером 5–7 мкм (рис. 5, а). По составу это клеофан (табл. 1) и он аналогичен сфалериту Утинского и других дайковых месторождений (Гамянин, 2001; Шило и др., 1988).

#### Минералы золота

Минеральные формы золота на месторождении Крохалиное представлены собственно самородным золотом двух генераций (Au-I и Au-II), электрумом, а также аурустибитом и «горчичным» золотом ( $\text{AuSbO}_3$ ). Самородное золото двух отмеченных генераций отчетливо индивидуально по морфологии и размерности выделений, взаимоотношениям с рудными и жильными минералами и, соответственно, по пробности (рис. 4–7): Au-I — массивное, преимущественно крупное золото и Au-II — различные типы «губчатого» золота и микрочастицы. В золоте обеих генераций отмечаются локальные диффузионные области (площадью до 100 мкм) и маломощные прожилки (размером до 10 мкм) золото-серебряных составов, визуальнo не имеющих выраженных фазовых границ, отвечающих по составу электруму (диффузионное Au-III?).

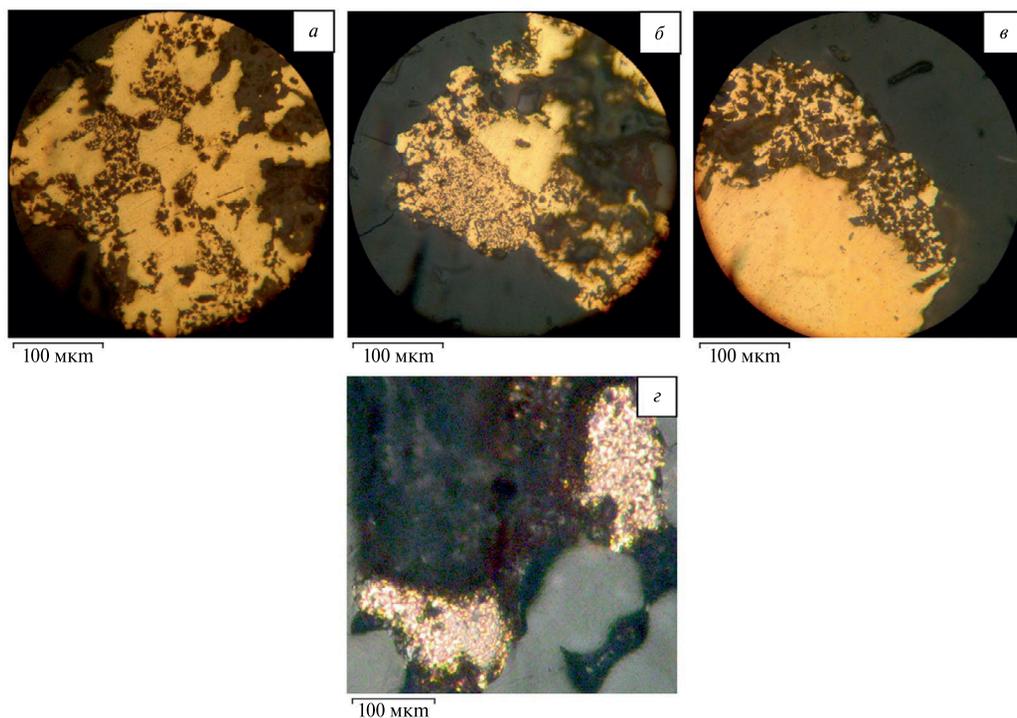
*Самородное золото Au-I* широко варьирует по размерам от мелких (5—10 до 100 мкм) агрегативных вкраплений, до крупных (0.5—1.0 мм до 2—3 мм) массивных высокопробных зерен, свободных и в сростаниях с кварцем или сульфидами — арсенопиритом, пиритом, сфалеритом и значительно реже со стибнитом. В совокупности зерен Au-I широко представлены жилковидные, цементационные и интерстициальные выделения, объемные и плотные комковидные частицы, иногда с элементами кристаллографической огранки (рис. 4, а). Оно присутствует в виде реликтов среди разноразмерных губчатых и ажурно-каркасных золотых агрегатов с массивным реликтовым ядром или без него, как свидетельство поверхностной коррозии и растворения раннего золота Au-I последующими высокосурьмяными гидротермами.

*Самородное золото Au-II* характеризуется выделениями значительно более мелкой размерности (не крупнее 100 мкм), широко распространенной в тонкой фракции рудных шлихов, но надежно диагностировано только в аншлифах неокисленных высоко сурьмяных золотых руд. Представлено несколькими морфологическими разновидностями: микрокристаллами, графическими микроагрегатами и разнообразным «губчатым» золотом. К этой генерации отнесены широко развитые в «чугунных» рудах межзерновые сфероидные полигранные микрокристаллы предельно высокопробного «беспримесного» золота, единичные или в разрозненных группах и цепочках внутри агрегатов стибнита, бертьерита или кварца. В рудных шлихах микрокристаллы золота Au-II (5—10 до 100 мкм) заметно выделяются блестящей гладкой, как бы оплавленной поверхностью; впрочем, нередко фрагментарно также корродированной (рис. 4, б; 5, з).

Другую группу зерен Au-II составляют различные, в целом бесформенные или фрагментарно окаймляющие крупные реликтовые зерна Au-I, золото-стибио-сульфидные графические микроагрегаты. В исходном виде такая графика состоит из довольно плотного объемного каркаса из весьма высокопробного (чаще «беспримесного») самородного золота Au-II и «сотового» выполнения из микрозерен стибнита или бертьерита (рис. 5, е). Традиционно, вслед за П. Рамдором (1962) такая рудная графика рассматривается как структура распада ауростибита в изменившейся окислительной обстановке минералообразующей среды (Амузинский и др., 2001).

К самородному золоту Au-II мы с определенной долей условности также относим многочисленную группу различных губчатых, ажурно-каркасных, хрупких ажурно-фестончатых и глобулярно-фестончатых микроагрегатов весьма высокопробного золота, находящихся в тесных сростаниях с дисперсными гипергенными, преимущественно Fe-Sb-оксидными новообразованиями, часто повышено золотоносными (рис. 6, а–г; 8, а).

Результаты исследования химического состава массивного самородного золота индивидуальных крупных зерен, массивных центральных «ядер» ажурно-каркасных золотин (Au-I) и различных выделений самородного золота Au-II приведены на гистограмме (рис. 7). Все золото относится к весьма высокопробному с вариациями пробности от 958 до 991 ‰, в среднем — 983 ‰ (Au-I). Вариации концентрации примеси серебра, определяющей пробность минерала, составляют в массивном золоте 0.8—4.2 мас. %; в ажурно-фестончатых агрегатах содержание серебра снижается практически до нуля. Между двумя главными генерациями изученного самородного золота устанавливается четкий разрыв составов (рис. 7). Золото стибнит-бертьеритовых руд (микрокристаллы — рис. 5, а и субграфические сростания — рис. 5, е) относится к редкой, характерной только для Au-Sb-минеральных ассоциаций, «беспримесной» генетической группе минерала.

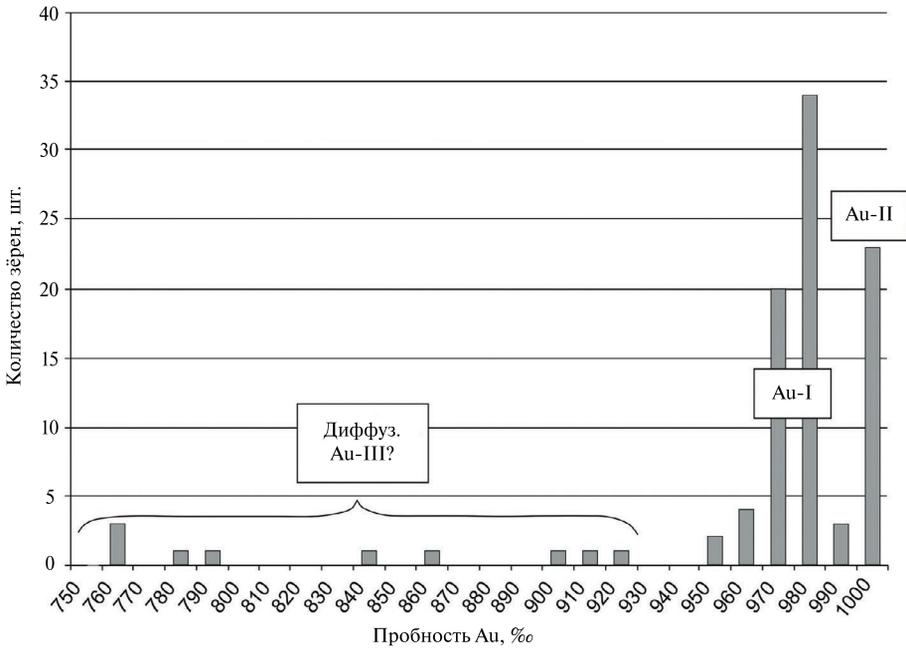


**Рис. 6.** Различные типы губчатой коррозии в образцах золота Au-II (ажурно-каркасные, ажурно-фестончатые и глобулярно-фестончатые): (а) грубаячейшее строение Au-II с многочисленными реликтовыми блоками Au-I, (б) разноточейшее Au-II с центральным блоком Au-I, (в) грубогубчатое строение Au-II, (з) тонкоячейшее срастание Au-II с агрегатом золотоносных оксидов Sb («горчичным» золотом).

**Fig. 6.** Different types of spongy corrosion in Au-II gold samples (openwork-framework, openwork-scalloped and globular-scalloped): (a) coarse-cellular structure of Au-II with numerous relict blocks of Au-I, (б) multicellular Au-II with a central block of Au-I, (в) coarse-sponge structure of Au-II, (з) fine-cellular intergrowth of Au-II with an aggregate of gold-bearing oxides Sb (“mustard” gold).

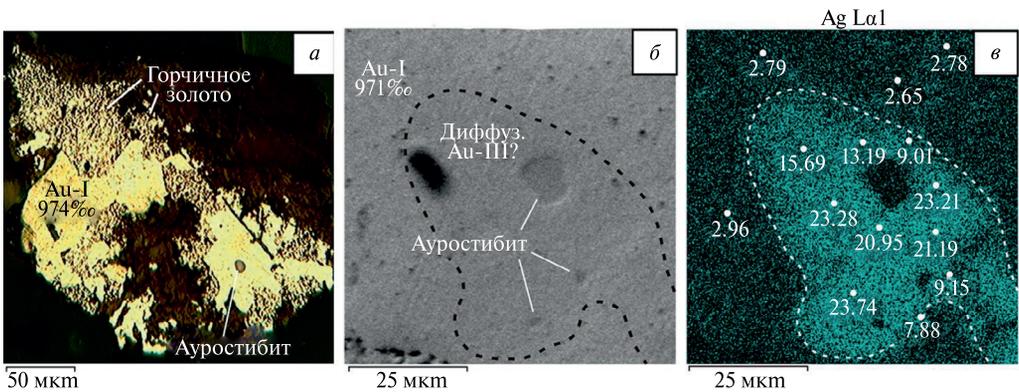
На фоне насыщенно желтого высокопробного золота (Au-I и Au-II) заметно выделяются светлой белой окраской, характерной для электрума, диффузионные области — *диффузионное золото Au-III*. Между высокопробным золотом и электрумом (550–650 ‰) присутствуют промежуточные, но достаточно высокосеребристые участки с пробностью 930 ‰ и менее (рис. 7). Детализация микрозондового исследования состава одной из таких зон показана на рис. 8, б, в по 10 измерений; содержание серебра здесь сильно колеблется, достигая 23.7 мас. %. Вызывает интерес установленная локализация в этой области сравнительно крупных зерен аурустибита, природа которых требует дальнейшего изучения.

В составе самородного золота, кроме основных компонентов, устанавливаемых микрозондовым анализом, судя по данным исследования пяти монофракций количественно-спектральным методом (табл. 2), постоянно встречаются примеси сурьмы (до 340 г/т) и меди (до 65 г/т), реже — свинца (до 20 г/т) и железа (до 20 г/т); Sn, Bi, As, Mn, Zn, Te, Co, Ni, Pt и Pd не обнаружены. Для весьма высокопробного золота концентрации примеси Sb аномально высоки, а примеси Cu — аномально низки (табл. 2), хотя должно быть наоборот: Sb — 10–20 г/т, Cu — 200–500 г/т (Шило и др., 1988; Степанов, 2001).



**Рис. 7.** Распределение самородного золота по пробности: Au-I — массивные зерна минерала и их реликты из золото-кварцевых ассоциаций, Au-II — кристаллы и графические каркасы из золото-сурьмяных сростаний, диффузионное Au-III? — высокосеребристые диффузионные зоны низкопробного золота и электрума. Статистическая выборка по данным микрозондового изучения 96-ти зерен минерала.

**Fig. 7.** Distribution of native gold by fineness: Au-I — massive grains of the mineral and their relics from gold-quartz associations, Au-II — crystals and graphic frameworks from gold-antimony intergrowths, diffusion Au-III? — high-silver diffusion zones of low-fineness gold and electrum. Statistical sample based on microprobe study of 96 mineral grains.



**Рис. 8.** Включения в самородном золоте Au-I: (а) «горчичное» золото и аурустибит; (б) микровключение аурустибита в самородном золоте (выделена пунктиром диффузионная область Au-III?); (в) карта в лучах Ag Lα1 с указанием концентрации серебра (масс. %) вокруг микровключений аурустибита, приведенного на рисунке (б). Изображения в отраженных электронах.

**Fig. 8.** Inclusions in native gold Au-I: (а) “mustard” gold and aurostibite; (б) microinclusion of aurostibite in native gold (the diffusion region of Au-III? is highlighted by a dotted line); (в) map in Ag Lα1 rays indicating the silver concentration (wt. %) around aurostibite microinclusions shown in figure (б). BSE images.

**Таблица 2.** Содержание микроэлементов в самородном золоте

**Table 2.** Content of trace elements in native gold

Номер пробы, показатель	Элементы-примеси, мас. %			
	Sb	Fe	Pb	Cu
Пр451/А-84	0.0140	—	—	0.0035
Пр452/А-84	0.0093		—	0.0065
Пр453/А-84	0.0340		Сл	0.0057
Пр454/А-84	0.0170	Сл	—	0.0025
Пр455/А-84	0.0190		—	0.0040
Встречаемость, %	100	20	20	100
Среднее	0.0187			0.0044

Примечание: Сл — следы; прочерк — элемент не установлен. Количественный спектральный анализ проведен по методике ЦНИГРИ (г. Москва) в ЦЛ СВПО (г. Магадан). Аналитик Н. П. Степаненко.

На месторождении Крохалиное, кроме резко превалирующего по объему золота в самородной форме, установлен другой минерал этого элемента — его антимонид  $\text{AuSb}_2$  — *ауростибит*. Он обнаружен в виде мелких (до 0.01 мм) призматических микрокристаллов, каплеобразных и линзоподобных включений в самородном золоте Au-I и Au-II, выделенном из протолок массивных бертьерит-стибнитовых руд (рис. 8, а, б). Включения ауростибита приурочены преимущественно к краевым частям золотин и их контакту со стибнитом, что, возможно, свидетельствует об их реакционной природе. Вероятно, наложение сурьмяных растворов на раннее самородное золото привело к образованию ауростибита, сопровождающегося диффузионным Au-III с пониженной пробностью (рис. 7). Находки минерала надежно свидетельствуют о наличии локальных участков интенсивно восстановительных условий минералообразования на месторождении. Химический состав ауростибита из месторождения Крохалиное: 1) на зернах, граничащих с самородным золотом и стибнитом — Au 45.9, Sb 54.6,  $\Sigma$  100.5 мас. % ( $n = 2$ ) (отмечена примесь Fe до 0.3 мас. %; формула —  $\text{Au}_{1.03}\text{Sb}_{1.97}$ ); 2) на микрозернах ауростибита внутри золотин — Au 45.2, Sb 55.0,  $\Sigma$  100.2 мас. % ( $n = 6$ ) (без примесей; формула —  $\text{Au}_{1.01}\text{Sb}_{1.99}$ ). Значимых различий химического состава между зернами разного типа локализации, за исключением примеси Fe, не наблюдается.

Ранее ауростибит был установлен в Колымском секторе Яно-Колымского пояса на месторождениях дайки № 13 (Сурьяная) в Утинском узле (Альшевский, 2009) и описан на месторождении Восточном (Ат-Уряхско-Штурмовской узел) в нехарактерной для минерала околоинтрузивной обстановке золото-редкометалльного оруденения.

«Горчичное» золото (*ауроантимонат*). В ажурно-фестончатых и фестончато-каркасных образованиях высокопробного самородного золота Au-II в их «сотовом» выполнении встречаются рыхлые оксидные агрегаты, в которых по данным микрозондового анализа постоянно отмечается присутствие повышенных концентраций золота, кислорода и сурьмы (рис. 8, а). Одни исследователи считают пористый тонкозернистый агрегат смесью микрочастиц самородного золота и оксидов сурьмы, другие выделяют как новый метастабильный минерал — ауроантимонат ( $\text{AuSbO}_3$ ), известный также как «горчичное золото». Присутствие «горчичного» золота (рис. 8, а), по-видимому, является характерным элементом строения золото-оксидных сростаний изученных руд.

## СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДРУГИМИ МЕСТОРОЖДЕНИЯМИ

По высокопробному химическому составу, морфологии зерен и в целом мелкой — без самородков, размерности выделений самородного золота месторождение Крохалиное является вполне обычным для месторождений Колымского сектора Яно-Колымского пояса, также представленных дайковыми объектами — Бортовое, дайка № 13 (Сурьянная-Утинская) и некоторыми другими.

Прслеживается ряд минералого-геохимических особенностей раннемелового дайкового месторождения Крохалиное, по сравнению с дайковыми месторождениями орогенного этапа развития Яно-Колымского пояса (дайки Утинская, Штурмовская, Новая, Арик). Среди них: присутствие более мышьяковистого пирита и высокосернистого (относительно стехиометрии) арсенопирита с примесью Sb; более легкий изотопный состав серы сульфидов (Волков и др., 2008); наличие весьма высокопробного самородного золота с вариациями пробности от 958 до 1000 ‰, при средней 982 ‰ в рудах раннего этапа.

По значениям пробности самородного золота ранней продуктивной ассоциации Au-I (983—991 ‰) дайка Крохалиная заметно выделяется среди других дайковых месторождений региона [Среднеканской (центр) — 850—885 ‰, Арик — 897—903 ‰, Утинской № 7—942—970 ‰ (среднее — 950 ‰)] своей необычайно высокой пробностью, сводящей к минимуму (9 ‰) разрыв пробности самородного золота раннего и позднего этапов минералообразования (рис. 7).

Для двух выделенных этапов минерализации можно отметить, что ранний из них типичен для «дайковых» руд Колымы, а поздний — для Сарылахского и других золото-сурьмяных месторождений благородных металлов Якутии (Индолев и др., 1980; Амузинский и др., 2001). Для месторождений дайкового типа пробность самородного золота Au-I в целом варьирует от 897 до 903 ‰ (Волков и др., 2008), а в рудах месторождений Сарылахское и Сентачанское она еще ниже — от 627 до 830 ‰ (Амузинский и др., 2001). По этому показателю — среднее 983 ‰ ( $n = 63$ ) золото-кварцевая ассоциация Au-I изученных руд месторождения Крохалиное превосходит все аналогичные образования Верхне-Колымских месторождений и идентична высокопробному золоту эталонного Au-Sb месторождения Сарылах — среднее 983 ‰ ( $n = 362$ ) (Амузинский и др., 2001). В поздней существенно сурьмяной ассоциации вообще преобладает высокопробное «беспримесное» самородное золото — 1000 ± 2 ‰, ассоциирующее с аурустибитом и «горчичным» золотом.

Неоднозначна природа всей гаммы ажурно-фестончатых и фестончато-глобулярных каркасных образований высокопробного самородного золота Au-II: от гипогенных графических золото-стибнитовых и золото-бертьеритовых микросрастаний [распад аурустибита (Гамянин, 1987)] до проблемной избирательной губчатой коррозии, главным образом в гипогенной и частично — в гипергенной обстановке.

Формирование богатых Sb-сульфидных и «горчичных» Sb-оксидных руд сопровождалась коррозией и уничтожением в целом крупных зерен и агрегатов раннего самородного золота Au-I, развитием широкого морфологического спектра более мелких и высокопробных золотинок в ассоциации других минеральных видов — аурустибита и аурантимоната, как известно (Гамянин, 2001), метастабильных и весьма неустойчивых в окислительной минералообразующей обстановке.

По нашим данным, с окислением первичных кварц-стибнитовых руд месторождения связано широкое рассеяние микрочастиц Au-минералов в окружающем преимущественно Fe-Sb-оксидном (повышенно золотоносном, по данным микрозондовых анализов) гипергенном материале.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований впервые для колымских золото-сурьмяных месторождений охарактеризованы минеральные формы золота золото-сурьмяных руд дайки Крохалиная, среди которых установлены самородное высокопробное золото (двух генераций), электрум, аурустибит и аурантимонат («горчичное» золото). Причем два последних выявлены в Колымском секторе Яно-Колымского пояса авторами впервые.

Показана двухэтапная история формирования руд в обстановке повышения роли сурьмы в эволюции золотосодержащих минеральных видов и разновидностей:  $\text{AuAg} \rightarrow \text{AuSb}_2 \rightarrow \text{AuSbO}_3$  (метастабильное), оцененной как их последовательная деградация в след за изменяющимися физико-химическими условиями минералообразующей среды.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-47-00064.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Альшевский А. В.* Интерметаллиды золота — мальдонит и аурустибит из месторождений Северо-Востока России / Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий. Т. 2. Металлогения. Мат. XI сессии СВО ВМО. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. С. 131—134.

*Альшевский А. В.* Геология, особенности вещественного состава, генезис и перспективы золотого оруденения в Утинском узле (Центрально-Колымский регион, Северо-Восток России). Автореф. дисс. ... канд. г.-м. н. Владивосток, 2009. 30 с.

*Амузинский В. А., Анисимова Г. С., Жданов Ю. Я., Иванов Г. С., Кокшарский М. Г., Недосекин Ю. Д., Полянский П. М.* Сарылахское и Сентачанское золото-сурьмяные месторождения: геология, минералогия и геохимия. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика». 2001. 218 с.

*Бергер В. И.* Сурьмяные месторождения. Л.: Недра, 1978. 296 с.

*Волков А. В., Егоров В. Н., Прокофьев В. Ю., Сидоров А. А., Горячев Н. А., Бирюков А. В.* Месторождения золота в дайках Яно-Колымского пояса // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 4. С. 311—337.

*Гамянин Г. Н.* «Горчичное» золото из золото-сурьмяных руд Восточной Якутии // Новые данные о минералах. Вып. 34. 1987. С. 13—20.

*Гамянин Г. Н.* Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозойид. М.: ГЕОС, 2001. 222 с.

*Горячев Н. А.* Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 210 с.

*Горячев Н. А., Соцкая О. Т., Горячев И. Н., Михалицына Т. И.* Минералого-геохимические особенности раннемелового золотого оруденения восточного фланга Яно-Колымского оруденного пояса (Магаданская область, Россия) // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 6. С. 80—95.

*Индолев Л. Н., Жданов Ю. Я., Суплецов В. М.* Сурьмяное оруденение Верхояно-Колымской провинции. Новосибирск: Наука, 1980. 232 с.

*Маркова Э. А., Черницова Н. М., Бородаев Ю. С. и др.* Новый минерал колымит ( $\text{Cu}_7\text{Hg}_6$ ) // ЗВМО. 1980. № 2. С. 206—211.

*Паньчев И. А., Федотов А. И.* Некоторые черты геологии и оруденения золото-сурьмяного месторождения Крохалиного // Колыма. № 3. 1973. С. 44—46.

*Степанов В. А.* Зональность золото-кварцевого оруденения Центральной Колымы. Владивосток: Дальнаука, 2001. 70 с.

*Шилов Н. А., Гончаров В. И., Альшевский А. В., Ворцнев В. В.* Условия формирования золотого оруденения в структурах Северо-Востока СССР. М.: Наука, 1988. 181 с.

## New Data on the Mineralogy of Gold-Antimony Mineralization of the Yana-Kolyma Belt on the Example of the Krokhalinoye Deposit

O. T. Sotskaya\*, A. V. Al'shevsky, N. A. Goryachev

North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n. a. N. A. Shilo, FEB RAS, Magadan, Russia

\* e-mail: sotskaya@neisri.ru

The article presents the results of studies of the mineralogy of the ores of the poorly studied gold-antimony Krokhalinoye deposit (dyke type), located on the southeastern flank of the Yana-Kolyma orogenic belt. Sulfide mineralization is represented mainly by stibnite, arsenopyrite and pyrite, less often jamesonite and berthierite are noted; of the gold minerals, high-finesness native gold, aurostibite, electrum and “mustard” gold (auroantimonate) are present. The native gold of the deposit is the highest-finesness of all known deposits of the Central Kolyma region.

**Keywords:** gold-antimony mineralization, dike, stibnite, arsenopyrite, pyrite, jamesonite, berthierite, native gold, aurostibite, auroantimonate, electrum, “mustard” gold

### REFERENCES

- Alshevsky A. V. Intermetallics of gold — maldonite and auristibite from deposits of the North-East of Russia. In: *Problems of geology and metallogeny of North-East Asia at the turn of the millennium*. Vol. 2. Metallogeny. Proc. of the XI session of the North-Eastern Mining Institute. Magadan: SVKNII FEB RAS, **2001**. P. 131—134 (in Russian).
- Alshevsky A. V. Geology, features of the material composition, genesis and prospects of gold mineralization in the Utinsky node (Central Kolyma region, North-East of Russia). PhD thesis syn. Vladivostok, **2009**. 30 p. (in Russian).
- Amuzinsky V. A., Anisimova G. S., Zhdanov Yu. Ya., Ivanov G. S., Koksharsky M. G., Nedosekin Yu. D., Polyansky P. M. Sarylakh and Sentachan gold-antimony deposits: geology, mineralogy and geochemistry. Moscow: MAIK “Nauka/Interperiodika”, **2001**. 218 p. (in Russian).
- Berger V. I. Antimony deposits. Leningrad: Nedra, **1978**. 296 p. (in Russian).
- Volkov A. V., Egorov V. N., Prokofiev V. Yu., Sidorov A. A., Goryachev N. A., Biryukov A. V. Gold deposits in dikes of the Yana-Kolyma belt. *Geol. Ore Deposits*. 2008. Vol. 50. N 4. P. 311—337 (in Russian).
- Gamyanin G. N. “Mustard” gold from gold-antimony ores of Eastern Yakutia. *New data on minerals*. Vol. 34. **1987**. P. 13—20 (in Russian).
- Gamyanin G. N. Mineralogical and genetic aspects of gold mineralization of the Verkhoyansk-Kolyma mesosoids. Moscow: GEOS, **2001**. 222 p.
- Goryachev N. A. Geology of Mesozoic gold-quartz vein belts of North-East Asia. Magadan: SVKNII FEB RAS, **1998**. 210 p. (in Russian).
- Goryachev N. A., Sotskaya O. T., Goryachev I. N., Mikhailitsyna T. I. Mineralogical and geochemical features of the Early Cretaceous gold mineralization of the eastern flank of the Yana-Kolyma orogenic belt (Magadan region, Russia). *Pacific Geology*. **2023**. Vol. 42. N 6. P. 80—95 (in Russian).
- Indolev L. N., Zhdanov Yu. Ya., Supletsov V. M. Antimony mineralization of the Verkhoyansk-Kolyma province. Novosibirsk: Nauka, **1980**. 232 p. (in Russian).
- Markova E. A., Chernitsova N. M., Borodaev Yu. S. et al. New mineral kolymite (Cu<sub>7</sub>Hg<sub>6</sub>). *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1980**. N 2. P. 206—211 (in Russian).
- Panychev I. A., Fedotov A. I. Some features of the geology and mineralization of the Krokhalin gold-antimony deposit. *Kolyma*. **1973**. N 3. P. 44—46 (in Russian).
- Stepanov V. A. Zoning of gold-quartz mineralization in Central Kolyma. Vladivostok: Dalnauka, **2001**. 70 p. (in Russian).
- Shilo N. A., Goncharov V. I., Alshevsky A. V., V. V. Vortsepnev V. V. Conditions for the formation of gold mineralization in the structures of the North-East of the USSR. Moscow: Nauka, **1988**. 181 p. (in Russian).