

## Новые данные по минералогии золото-сульфидного типа руд месторождения Каральвеем, Чукотка

### New data on the mineralogy of the gold-sulfide ore type of the Karalveem deposit, Chukotka

Максаров Р. А., Прокопьев И. Р.,  
Дорошкевич А. Г., Редин Ю. О.,  
Малютина А. В.

Maksarov R. A., Prokopiev I. R.,  
Doroshkevich A. G., Redin Yu. O.,  
Malyutina A. V.

В работе приведены результаты минералогического исследования руд месторождения Каральвеем на северо-востоке России (Центральный и Русловый участки). Золотое оруденение представлено двумя типами руд: золото-кварц-арсенопиритовым (кварцевые жилы с самородным золотом и сульфидной минерализацией) и золото-сульфидным (метасоматиты) в габбродолеритах. В большинстве образцов наблюдается совмещение обоих типов руд, в результате чего особый интерес приобретают комплексные руды. В рудах основным минералом является арсенопирит, к второстепенным и аксессуарным относятся пирит, рутил, ильменит, галенит, халькопирит, монацит, сфалерит и самородное золото. Самородное золото в кварц-сульфидных жилах и золото-сульфидном типе руд присутствует в свободной форме в виде микропрожилков и микронных обособлений в основной массе породы, микровключений в сульфидах. Минералы обоих типов руд характеризуются схожим химическим составом: пробность золота в золото-сульфидном типе составляет 870–900 ‰, в жилах – 840–910 ‰. Редкоэлементный состав пирита и арсенопирита из метасоматитов и кварцевых жил также показывает схожие значения. На основании этого был сделан вывод, что продуктивность золото-сульфидных и золото-кварц-арсенопиритовых руд обусловлена единым импульсом.

Ключевые слова: месторождение Каральвеем, самородное золото, рудные зоны и жилы, типы руд, минеральный состав, сульфиды.

In this paper, we present the results of a mineralogical study of the ores of the Karalveem deposit in the northeast of Russia (Central and Ruslovy areas). Gold mineralization is characterized by two types of ores: gold-quartz-arsenopyrite (quartz veins with native gold and sulfide mineralization) and gold-sulfide (metasomatites) in gabbrodolerite. In most samples, both types of ores are combined, making these complex ores of particular interest. The main ore mineral is arsenopyrite; secondary and accessory minerals include pyrite, rutile, ilmenite, galena, chalcopyrite, monazite, sphalerite, and native gold. Native gold in quartz-sulfide and gold-sulfide ore types is present in a free form as microveinlets, micron-size segregations in the host rock, or as microinclusions in sulfides. Both ore types are characterized by the similar chemical composition of ore minerals: the fineness of gold in the gold-sulfide type is 870–900 ‰, in veins – 840–910 ‰. The trace element composition of pyrite and arsenopyrite from metasomatites and quartz veins is also alike. Based on this, it was concluded that the productivity of gold-sulfide and gold-quartz-arsenopyrite ores was formed by a single impulse.

Keywords: Karalveem deposit, native gold, ore zones and veins, ore types, mineral composition, sulfides.

Для цитирования: Максаров Р. А., Прокопьев И. Р., Дорошкевич А. Г., Редин Ю. О., Малютина А. В. Новые данные по минералогии золото-сульфидного типа руд месторождения Каральвеем, Чукотка. Руды и металлы. 2022. № 1. С. 24–43. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10002.

For citation: Maksarov R. A., Prokopiev I. R., Doroshkevich A. G., Redin Yu. O., Malyutina A. V. New data on the mineralogy of the gold-sulfide ore type of the Karalveem deposit, Chukotka. Ores and metals, 2022, № 1, pp. 24–43. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10002.



*Введение.* Северо-восточная часть России – основная область, в которой ежегодно производится до 70 % общей добычи золота из россыпных и коренных месторождений, запасы которых стремительно сокращаются. Вместе с тем в этом регионе значительны потенциал и перспективы открытия новых золоторудных месторождений и рудопроявлений, поэтому необходимо использовать высокоточные фундаментальные научные геологические исследования, в том числе последовательности минералообразования и минеральных равновесий, распределения рудных компонентов. Эти исследования позволяют реконструировать процесс генезиса руд, использовать полученную информацию в качестве поисковых критериев, а также являются важной основой для разработки технологии извлечения полезных компонентов из руд, переработки минерального сырья и освоения имеющихся ресурсов.

Пояса золото кварцевого типа месторождений (такие как Аллах-Юньский, Верхоянский, Куларский, Чукотский, Яно-Колымский), расположенные в складчатых зонах, обрамляющих Сибирский кратон и древние террейны, – ключевые в металлогении северо-востока России. Их исследованию множество авторов (В. Д. Аксёнова, В. А. Амузинский, Ю. А. Билибин, С. И. Гавриков, Г. Н. Гамянин, М. Л. Гельман, В. И. Гончаров, Н. А. Горячев, Н. М. Давиденко, Ю. П. Ивенсен, А. И. Калинин, М. И. Кобычев, Ю. М. Новожилов, Л. Н. Пляшкевич, И. С. Рожков, П. И. Скорняков, Б. А. Снятков, Л. А. Снятков, О. А. Сустанов, Л. В. Фирсов, Н. И. Чемоданов, Н. А. Шило и многие другие) посвятили свои работы, в которых рассматриваются геологическое строение месторождений и закономерности их локализации, минералогическая и геохимическая характеристика руд, вопросы генезиса оруденения.

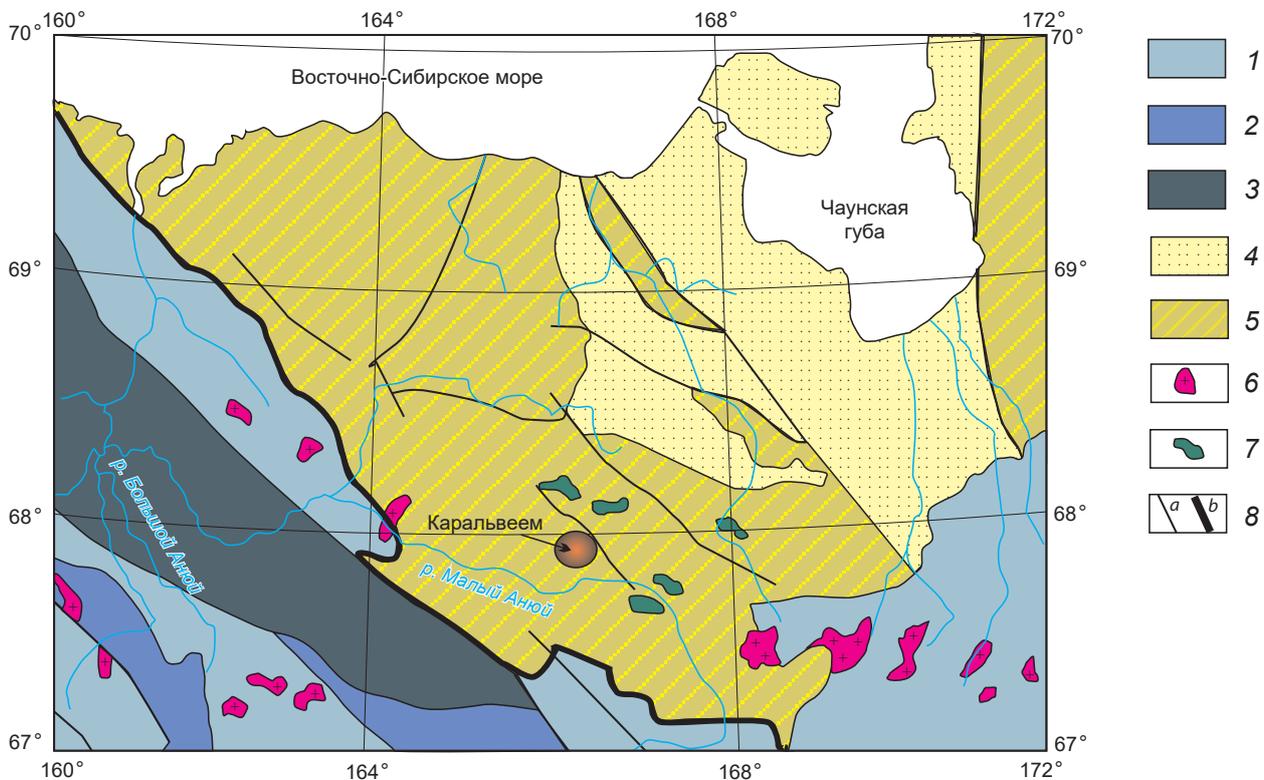
Одним из значимых месторождений золото кварцевого типа в пределах Чукотского пояса является месторождение Каральвеем, открытое в 1957 г. А. М. Авдеевым. Опубликованные данные о геологии месторождения, локализации золото кварцевых жил и минеральном составе руд были представлены в работах [3–6, 8–10, 12]. Возраст оруденения

(определён К-Ag методом по мусковиту, Pb-Pb методом по галениту) находится в интервале 130–96 млн лет [5]. В последние годы появились данные о проявлении на месторождении наряду с золото кварцевым золото-сульфидного метасоматического типа руд [7]. Авторы дали геохимическую и минералогическую характеристики руд участков месторождения Безымянный и Промоина и оценили параметры флюидного режима золото кварцевого типа руд. В данной статье приведены результаты минералогического изучения золото-сульфидных метасоматических руд Центрального и Руслового участков, проведено их сопоставление с золото кварцевыми рудами месторождения, даны результаты LA ICP-MS исследования пирита и арсенопирита из обоих типов руд, что позволило обосновать этапность образования месторождения.

*Геологическая характеристика.* Географически месторождение Каральвеем располагается в бассейне р. Малый Анюй в центральной части Кэпэрвеевской гряды Анюйского нагорья. Месторождение как часть Каральвеевского рудного поля находится в пределах Анюйского субтеррейна Чукотского террейна (рис. 1), который рассматривается как фрагмент палеозойско-раннемезозойской пассивной окраины [2].

Схема геологического строения месторождения представлена на рис. 2. Исследуемый район представляет собой антиклинальную складку с крутым падением на юго-запад. В пределах месторождения широко развиты продольные по отношению к складчатости разрывы северо-западной ориентировки и поперечные разрывы северо-восточного и субширотного направлений (см. рис. 2). Наиболее крупное из северо-западных разрывных нарушений – Каральвеевский разлом, ограничивающий месторождение с северо-востока.

Осадочные образования месторождения представлены непрерывным разрезом триасовых отложений (кепервеевская и пауктуваамская свиты) общей мощностью до 2900 м. Песчаники, алевролиты, кремнисто-хлоритовые, серицито-хлоритовые, глинистые сланцы кепервеевской свиты характери-



**Рис. 1. Тектоническое положение месторождения Каральвеем, по [1]:**

1 – вулканические островодужные комплексы,  $J_3$ – $K$ ; 2 – комплексы краевых морей и междугловых прогибов,  $T$ – $J_2$ ; 3 – Южно-Ануйский аккреционный блок; 4 – молассовые комплексы,  $J_3$ – $K_1$ ; 5 – комплексы Арктического континента,  $PZ_3$ – $J_1$ ; 6 – граниты,  $J_2$ – $K_1$ ; 7 – долериты, габбро и ультрабазиты  $T_{1-2}$ – $K_1$  (?); 8 – разломы (a) и коллизионный шов (b)

**Fig. 1. Tectonic position of the Karalveem deposit, according to [1]:**

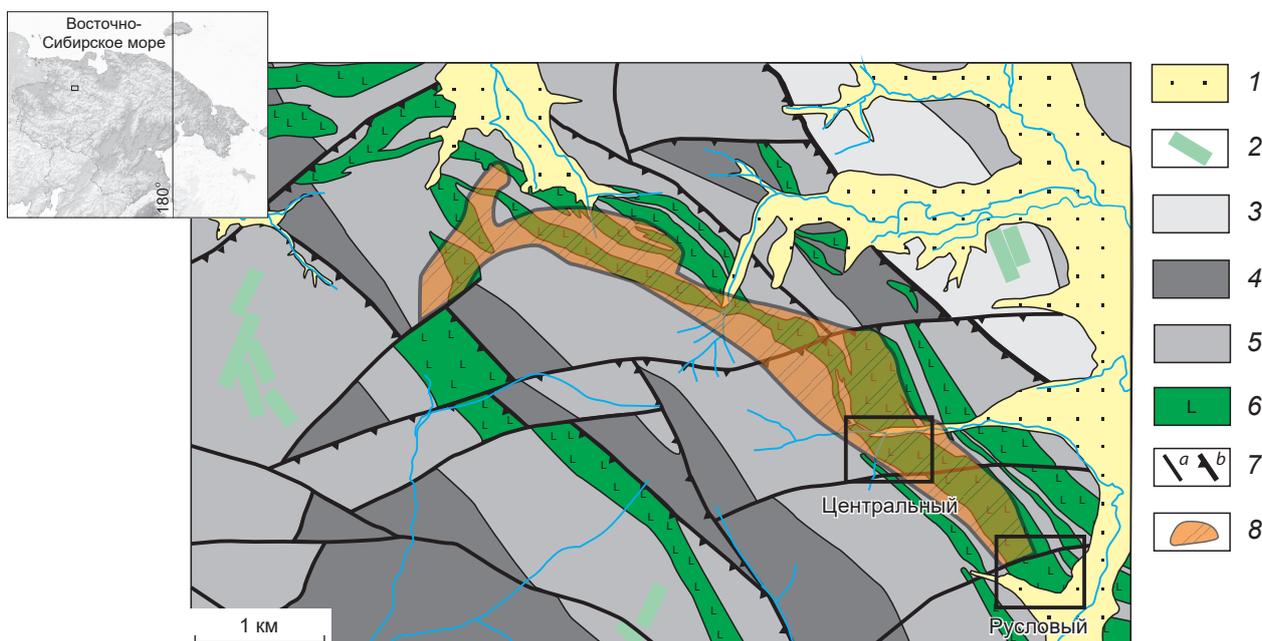
1 – volcanic island-arc complexes,  $J_3$ – $K$ ; 2 – complexes of marginal seas and interarc troughs,  $T$ – $J_2$ ; 3 – South Anyui accretion block; 4 – molasse complexes,  $J_3$ – $K_1$ ; 5 – complexes of the Arctic continent,  $PZ_3$ – $J_1$ ; 6 – granites,  $J_2$ – $K_1$ ; 7 – dolerites, gabbro, and ultramafic,  $T_{1-2}$ – $K_1$  (?); 8 – faults (a) and collision seam (b)

зуются зеленокаменным обликом, обусловленным появлением хлорита и эпидота, и наличием в песчаниках и алевролитах карбонатных стяжений и конкреций. Ритмично переслоенные песчаники и сланцы пауктуваамской свиты имеют тёмно-серую или чёрную окраску, что связано с присутствием в их составе углистого вещества.

Осадочные отложения субсогласно или косослоисто прорываются ранне-среднетриасовыми силлами и дайками долеритов, габбро-долеритов, которые протягиваются непрерыв-

ной полосой северо-западного простирания через всё месторождение (см. рис. 2). В поле также отмечаются редкие дайки раннемеловых (?) диоритов.

Рудные тела месторождения представлены кварцевыми жилами, локализующимися преимущественно в долеритах в трещинах различных направлений. Как правило, жилы расположены в области висячего контакта субпластовых тел долеритов, выходя за их пределы во вмещающие осадочные отложения на незначительное расстояние. Отдель-



**Рис. 2. Схема геологического строения месторождения Каральвеем и расположение участков исследования (Центральный и Русловый):**

1 – современные аллювиальные отложения (галечник, гравий, песок); 2 – дайки диоритов,  $K_1$ ; 3 – отложения пакутуваамской свиты (песчаники, алевролиты, сланцы углистые),  $T_3$ ; отложения кепервеемской свиты: 4 – верхняя, 5 – нижняя подсвиты (песчаники, алевролиты, карбонатные стяжения),  $T_1$ ; 6 – силлы, дайки долеритов, габбродолеритов,  $T_{1-2}$ ; 7 – сбросы (a), взбросы (b); 8 – контур рудной зоны

**Fig. 2. Scheme of the geological settings of the Karalveem deposit and the location of the study areas (Central and Ruslov sections):**

1 – modern alluvial deposits (pebble, gravel, sand); 2 – diorite dikes,  $K_1$ ; 3 – deposits of the Paktuvaam Formation (sandstones, siltstones, carbonaceous shales),  $T_3$ ; deposits of the Keperveemskaya suite, upper (4) and lower (5) subformations (sandstones, siltstones, carbonate nodules),  $T_1$ ; 6 – sills, dikes of dolerites, gabbrodolerites,  $T_{1-2}$ ; 7 – faults (a), thrusts (b); 8 – contour of the ore zone

ные золоторудные жилы контролируются дайками микродиоритов, располагаясь параллельно последним.

На участке Русловый рудные тела образуют продольные жилы, приуроченные к трещинам скалывания северо-западного простирания. Мощность жил варьируется от 0,2 до 4 м. Они прослеживаются по простиранию на расстояние от сотен метров до 1 км. В осадочных породах их мощность резко уменьшается и на расстоянии первых метров от контакта с долеритами они переходят в зоны прожилкового окварцевания. Поперечные жилы в трещинах

отрыва прослеживаются на меньшее расстояние, но являются более мощными. Морфология рудных тел осложнена чередованием пережимов и раздувов, наличием ксенолитов вмещающих пород, переходами жил по простиранию и падению в прожилковые зоны, а также присутствием апофиз и сочленений разноориентированных жил. Контакты жил с вмещающими породами чёткие, волнистые, извилистые, иногда тектонически сорванные. Околорудные изменения проявлены в лиственитизации долеритов, габбродолеритов мощностью до 5 м. Переходы от изменённых по-

род жильных зон к неизменённым достаточно резкие. Осадочные породы в зальбандах жил хлоритизированы, карбонатизированы (до 0,5 м).

На участке Центральный рудные тела представлены двумя морфологическими типами: кварцевыми жилами, аналогичными жилам на участке Руслый, и прожилковыми рудными зонами (метасоматиты по габбродолеритам). Зоны прожилкования, выполняющие оперяющие трещины отрыва, локализованы между поверхностями сместителей субширотных разрывных нарушений, по которым происходили дорудные сдвиго-взбросовые перемещения. Для участка Центральный характерны в основном субполюгие и пологозалегающие (до 15°) рудные тела преимущественно юго-западного падения, представленные как жилами, так и жильно-прожилковыми зонами. Зоны прожилкования образуют в габбродолеритах и песчаниках сеть многочисленных кварцевых прожилков северо-западного простирания с довольно крутым (35–45°) падением на северо-восток. Мощность прожилковых зон достигает 25 м при протяжённости до 100 м.

*Методы исследований.* Исследования соотношений минералов, распределения рудных компонентов в пределах минералов и минеральных включений в них проводились с помощью электронного сканирующего микроскопа с энергодисперсионным спектрометром (EDS) MIRA 3 LMU (система микроанализа INCA Energy 450 XMax-80). Условия EDS-анализа: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток электронного пучка – 1,5 нА, время набора спектров – 20–40 с. В качестве образцов сравнения для большинства элементов использовались простые химические соединения и металлы: SiO<sub>2</sub> (Si, O), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Al), диопсид (Mg, Ca), альбит (Na), ортоклаз (K), BaF<sub>2</sub> (Ba, F), Ca<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (P), Ti, Nb, Zr, Fe, Mn, Zn и др. Для количественной оптимизации (нормировка на ток зонда и калибровка спектрометра по энергии) применялся металлический Co. Химический состав рудных минералов определялся на электронных микрозондах в режиме волновой дисперсии (WDS): CAMEBAX-Micro и JEOL JXA-8100. Условия WDS-анализа: уско-

ряжающее напряжение – 20 кВ, ток – 20–40 нА, размер пучка – 2 мкм. Пределы обнаружения (мас. %): Fe – 0,026; As – 0,06; S – 0,012; Ni – 0,031; Co – 0,03; Sb – 0,034; Cu – 0,04; Au – 0,051. Исследования выполнены на базе сертифицированного Аналитического центра коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск).

Измерение микроэлементного состава в пирите и арсенопирите проводилось на ICP-MS NexION 300S (PerkinElmer) с приставкой для LA NWR 213 (ESI), размещённых в помещении класса чистоты ИСО 7 в ЦКП «Геоаналитик» (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург). Описание методики измерения приведено в работе [11]. Результаты обрабатывались в программе GLITTER V4.4. с применением внутреннего стандарта FeO, в качестве внешнего первичного стандарта использовали стандартное стекло NIST SRM 610 (в качестве вторичного – стандартное стекло NIST SRM 612). Диаметр кратера – 25 или 50 мкм.

#### ***Вещественная характеристика руд***

*Золото-сульфидные руды в габбродолеритах.* Особенностью рудной минерализации золото-сульфидных руд в габбродолеритах является совмещение двух типов минерализации – собственно габбродолеритовой и гидротермально-метасоматической. При этом, как отмечено ранее, в рудоносных метасоматитах присутствуют секущие золото-кварц-арсенопиритовые прожилки и жилы.

Основные магматические минералы габбродолеритов – плагиоклаз (50–55 %), клинопироксен (порядка 35 %), апатит и калиевый полевой шпат (5–10 %); в породе также присутствуют стекловатый мезостази (3–5 %) и рудные минералы (порядка 2–5 %). Порода сильно изменена; вторичные минералы представлены карбонатом, альбитом, хлоритом, мусковитом, кварцем и эпидотом. Среди акцессорных минералов установлены циркон, титанит, бадделлит, рутил, монацит и ксенотим. Структура изменённых габбродолеритов – мелко-среднезернистая, офитовая, габбро-офитовая; текстура породы – массивная до трахитоидной.



В золотоносных метасоматитах породообразующие минералы габбродолеритов практически полностью замещены вторичными минералами, образуя эпидот-кварц-альбит-хлорит-мусковит-карбонатный мелко-среднезернистый агрегат с редкой вкрапленностью рудных минералов (2–5 %).

Основными рудными минералами габбродолеритов являются ильменит, магнетит, пирротин. На этапе гидротермального преобразования габбродолеритов происходило образование таких рудных минералов, как арсенопирит, пирит, халькопирит, рутил, кобальтин, глаукоdot, сфалерит, марказит, самородное золото и галенит (рис. 3).

Пирит и арсенопирит (см. рис. 3, *a, b, d, g–i*) формируют микропрожилки и вкрапленные микро-среднезернистые агрегаты в нерудной массе метасоматически изменённых габбродолеритов. Зёрна арсенопирита и пирита в большинстве случаев катаклазированы и образуют сростки и зернистые агрегаты неправильной формы. Размеры отдельных зёрен могут достигать первых миллиметров.

Арсенопирит из метасоматизированных габбродолеритов по химическому составу нестехиометричен, так же как и в золото-кварц-арсенопиритовых рудах. Арсенопирит характеризуется весьма узким диапазоном состава с содержанием As от 33,00 до 33,35 ат. % (среднее 33,18) и относится к сернистой разновидности  $As / S < 1$  ( $As / S$  от 0,77 до 0,92, среднее 0,86) (табл. 1), что соответствует составу арсенопирита золоторудных месторождений Верхне-Колымского региона [10]. Концентрация Co варьируется от 25 до 400 ppm, содержания Ni низкие и не превышают 1 ppm (табл. 2). Отношения Co / Ni высокие и в среднем равны 2700. Концентрации таких халькофильных элементов, как Cu, Pb, Bi, Zn и Se невысокие, лишь содержание Sb достигает 525 ppm (см. табл. 2, рис. 4).

Пирит кристаллизуется в виде вкрапленных идиоморфных, изометрических, реже аллотриоморфных зёрен и микрозернистых агрегатов-вкрапленников в основной массе и арсенопирите. На некоторых участках пирит обростает марказитом (см. рис. 3, *g*). Пирит не содержит примеси Co и As (табл. 3, см. табл. 1).

Концентрация Co достигает 630 ppm, содержания Ni низкие и не превышают 2 ppm (см. табл. 3). Co / Ni отношения высокие (до 5700). Концентрации Bi, Sb, Zn и Se невысокие, Cu и Pb достигают сотен ppm (см. табл. 3).

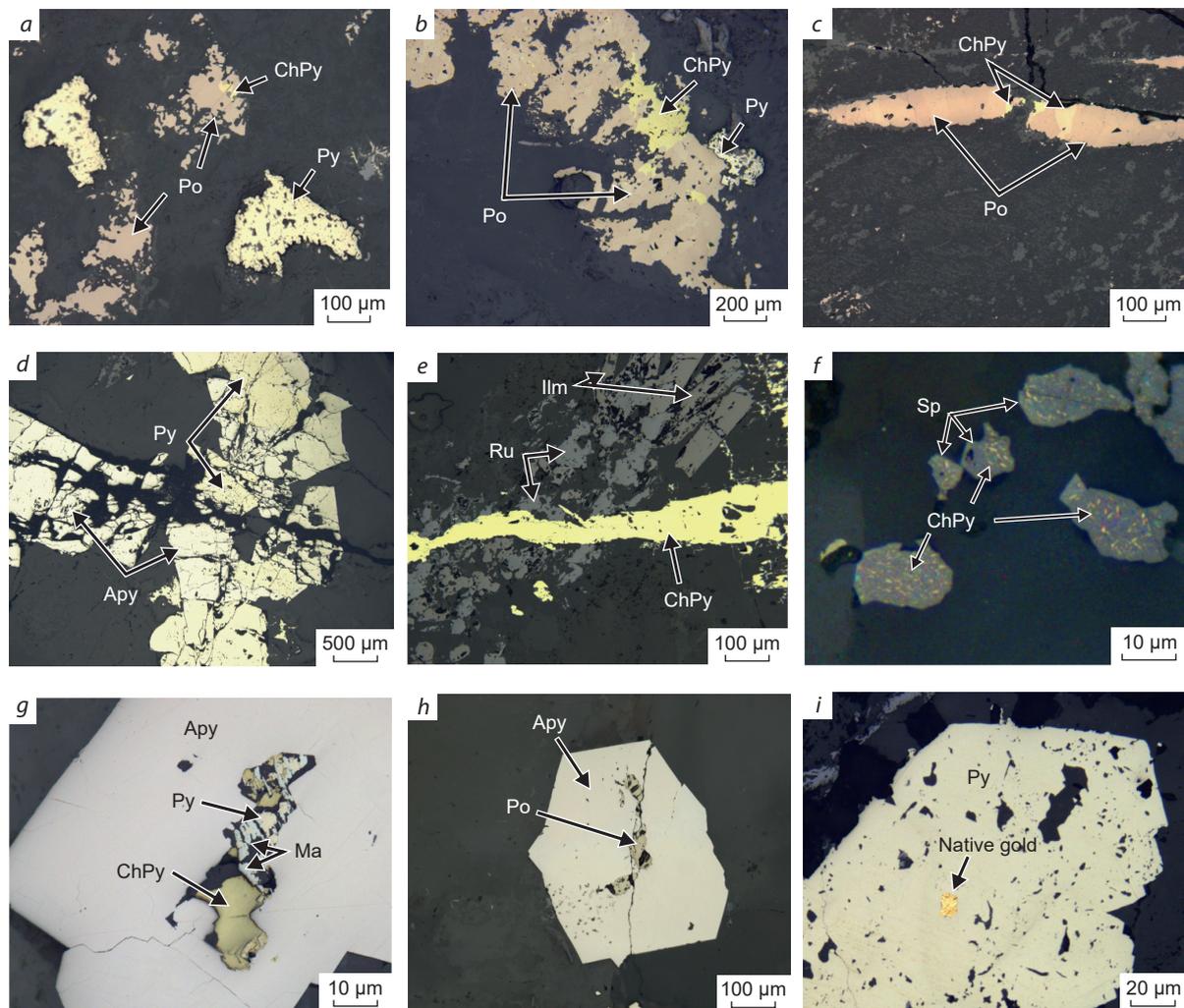
Пирротин и халькопирит формируют аллотриоморфнозернистые агрегаты-вкрапленники в арсенопирите и также представлены прожилками и вкрапленными мелкозернистыми агрегатами в изменённых габбродолеритах (см. рис. 3, *a–c, g, h*). Пирротин содержит примесь Co (до 0,07 мас. %).

Гидротермально-метасоматический рутил не только замещает ильменит, но и также кристаллизуется в виде микропрожилков и аллотриоморфнозернистых агрегатов в ассоциации с сидеритом и гидротермальными сульфидами (халькопирит, пирротин и сфалерит), заполняет прожилки и межзерновое пространство в арсенопирите. Минерал, образующий агрегатные скопления, характеризуется повышенным содержанием  $Nb_2O_5$  (до 8,2 мас. %),  $WO_3$  (до 3,4 мас. %) и  $V_2O_5$  (до 4,58 мас. %), а рутил, развивающийся по ильмениту, более низкими концентрациями примесей [8].

Сфалерит кристаллизуется в виде аллотриоморфно-, микро-среднезернистых агрегатов и микропрожилков в основной массе. Минерал находится в сростании с халькопиритом и пирротин, а также заполняет межзерновое пространство арсенопирита и пирита. В сфалерите присутствует эмульсионная вкрапленность зёрен халькопирита в виде продукта распада твёрдого раствора (см. рис. 3, *f*).

Самородное золото образует отдельные микронные вкрапленники округлой, неправильной, каплевидной форм в основной массе нерудных минералов, в пирите (см. рис. 3, *i*); в межзерновом пространстве, интерстициях и вдоль трещинных зон в арсенопирите (рис. 5, *a, b*), в виде микрозернистых агрегатов (сотни микрон) и микропрожилков в основной массе (см. рис. 5, *c, d*).

В ассоциации с золотом находятся сфалерит, пирит, халькопирит и пирротин. Однозначных пересечений поздних гидротермальных сульфидов и самородного золота в образцах не установлено. Характер границ рудных мине-



**Рис. 3. Золото-сульфидная рудная минерализация в гидротермально-метасоматически изменённых габбродолеритах (фотографии минераграфических аншлифов):**

Ab – альбит, Apy – арсенопирит, Cal – кальцит, Chl – хлорит, ChPy – халькопирит, Ga – галенит, Ilm – ильменит, Ma – марказит, Native gold – самородное золото, Po – пирротин, Py – пирит, Qz – кварц, Ru – рутил, Sid – сидерит; Sp – сфалерит

**Fig. 3. Gold-sulfide ore mineralization in hydrothermally-metasomatically altered gabbrodolerite (photographs of polished mounts in reflected light):**

Ab – albite, Apy – arsenopyrite, Cal – calcite, Chl – chlorites, ChPy – chalcopyrite, Ga – galena, Ilm – ilmenite, Ma – marcasite, Po – pyrrhotite, Py – pyrite, Qz – quartz, Ru – rutile, Sid – siderite; Sp – sphalerite

ралов можно рассматривать как ростовой. В редких случаях наблюдается ксеноморфность выделения самородного золота по отношению к сульфидам. Таким образом, можно зафиксировать сравнительно позднее минералообразование самородного золота по отноше-

нию к арсенопириту. Хотя интерстициальное распределение золота и расположение вдоль трещинных зон, так же как и примесь золота в составе арсенопирита, могут указывать на перекристаллизацию золота из арсенопирита и близодновременное минералообразова-



**Табл. 1. Представительные анализы химического состава арсенопирита и пирита из кварцевых жил и метасоматитов месторождения Каральвеем, мас. %**

Table 1. Representative analyses of the chemical composition of arsenopyrite and pyrite from quartz veins and metasomatites of the Karalveem deposit, wt. %

Fe	As	S	Ni	Co	Sb	Cu	Au	Сумма
<i>Из кварцевых жил</i>								
34,82	44,86	20,12	0,03	0,05	0,07	0,00	0,00	99,95
34,79	46,60	20,23	0,00	0,04	0,04	0,00	0,07	101,81
34,99	46,57	20,20	0,00	0,05	0,02	0,00	0,05	101,88
34,85	45,69	20,30	0,00	0,05	0,01	0,00	0,00	100,90
34,74	46,58	20,23	0,00	0,05	0,03	0,00	0,06	101,69
35,09	45,40	20,90	0,00	0,03	0,01	0,00	0,06	101,49
34,65	45,89	20,39	0,00	0,06	0,07	0,00	0,06	101,12
46,37	0,00	53,07	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	99,46
46,52	0,00	53,05	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	99,60
46,40	0,00	52,60	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	99,02
46,78	0,03	52,91	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	99,73
46,33	0,04	52,60	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	99,01
<i>Из метасоматитов по габбродолеритам</i>								
35,76	41,75	23,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,66
34,81	43,97	21,72	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	100,56
34,85	44,86	20,83	0,00	0,03	0,02	0,00	0,06	100,65
35,39	44,12	21,84	0,00	0,02	0,03	0,00	0,06	101,46
35,37	42,97	22,58	0,00	0,02	0,04	0,00	0,00	100,98
34,62	44,93	21,01	0,00	0,03	0,00	0,00	0,07	100,66
46,77	0,01	53,39	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	100,19
46,30	0,04	52,78	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	99,17
46,49	0,05	53,01	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	99,61
46,66	0,01	53,24	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	99,96
45,91	0,08	52,36	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	99,40

ние самородного золота и более поздних сульфидов. Пробность самородного золота варьируется от 870 до 900 ‰ (рис. 6), а из примесей в значимых количествах установлено содержание Cu и Hg (табл. 4).

Наряду с самородным золотом в пирите, арсенопирите и пирротине присутствуют редкие микрозёрна-включения галенита неправильной формы, которые также образовались на поздних стадиях процессов гидротермаль-

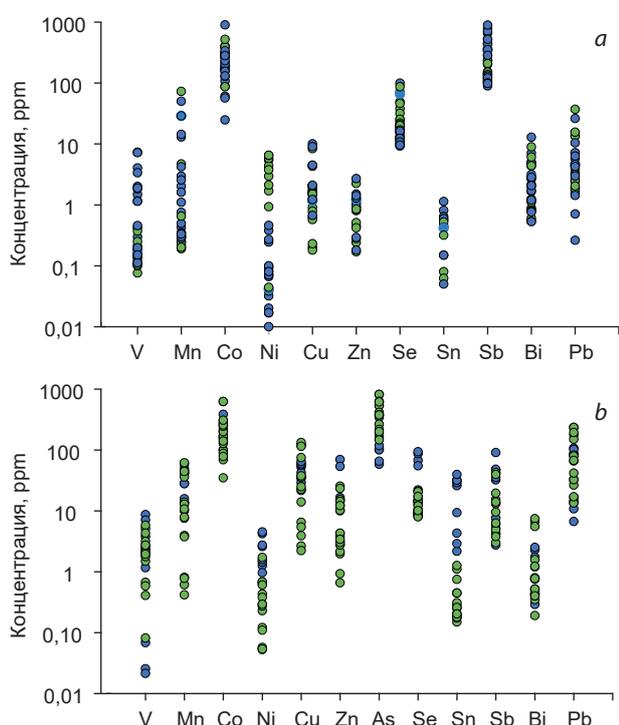
ного минералообразования в рудах золотоносных метасоматитов.

*Золото-кварц-арсенопиритовый тип.* Минеральный состав кварцевых жил не отличается большим разнообразием. Основной нерудный минерал – кварц, второстепенные – кальцит, доломит и минерал группы хлорита. Главный рудообразующий минерал – арсенопирит, к второстепенным и аксессуарным относятся пирит, рутил, ильменит, галенит,

**Табл. 2. Содержание редких элементов в арсенопирите из кварцевых жил и метасоматитов месторождения Каральвеем, ppm**

Table 2. Trace element concentrations in arsenopyrite from quartz veins and metasomatites of the Karalveem deposit, ppm

V	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Se	Sn	Sb	Bi	Pb	Co / Ni
<i>Из кварцевых жил</i>											
2,00	0,43	273,6	0,02	31 048,00	44 621,00	99,4	0,56	791,5	7,0	44 755,00	16 423,00
0,30	0,75	88,0	0,07	21 916,00	0,81	49,0	0,81	109,1	44 655,00	44 635,00	1330,00
0,42	0,49	61,0	0,03	16 803,00	0,91	25,0	0,64	661,4	5,0	4,0	1916,00
17 533,00	44 563,00	903,9	0,02	22 647,00	18 264,00	44 633,00	41 275,00	707,7	44 595,00	7,0	45 195,00
42 005,00	44 574,00	108,4	0,01	0,63	0,81	44 757,00	0,60	893,0	44 808,00	44 743,00	10 843,00
30 317,00	44 835,00	389,2	0,02	44 714,00	44 866,00	44 696,00	0,45	141,7	44 816,00	44 599,00	22 951,00
0,21	0,20	177,1	17 288,00	0,20		38,0	0,08	231,7	0,8	44 682,00	32,00
0,18	0,19	128,8	35 096,00	0,18		32,0		233,5	44 593,00	44 744,00	43,00
0,14	0,25	306,0	13 971,00	21 186,00	0,45	44 645,00		202,9	0,9	44 653,00	70,00
0,25	0,31	315,4	27 515,00	0,23	0,17	44 760,00		152,8	0,6	44 805,00	55,00
0,11	0,29	224,0	25 569,00	0,91	0,24	44 825,00	0,06	210,6	44 743,00	44 685,00	132,00
0,08	0,35	399,0	16 954,00	14 458,00	0,51	44 762,00		151,7	44 562,00	44 654,00	62,00
0,18	0,22	166,0	44 867,00	0,79		44 693,00		137,6	0,5	44 805,00	79,00
0,13	0,24	280,5	28 185,00	0,57	0,28	44 792,00		137,4	0,8	44 683,00	74,00
0,10	0,20	288,8	19 146,00	44 927,00		44 638,00		123,9	0,8	2,0	44,00
0,17	0,31	400,0	0,93	18 629,00	0,42	44 612,00		116,4	44 593,00	44 595,00	430,00
<i>Из метасоматитов по габродолеритам</i>											
0,10	0,65	522,2	0,04	44 622,00	0,93	71,4	0,52	442,7	44 655,00	37,2	13 662,00
0,37	72,88	87,1	0,10	46 478,00	45 323,00	46,2	0,43	524,1	44 567,00	44 664,00	896,00
0,16	28,79	189,0	0,04	42 370,00	44 562,00	66,2	0,42	354,1	44 806,00	44 685,00	4583,00
0,14	25 294,00	270,0	0,04	44 714,00	0,85	87,0	0,32	285,0	9,0	44 727,00	6103,00
41 640,00	22 282,00	181,8	0,07	15 797,00	0,29	44 820,00		106,1	44 775,00	44 778,00	2525,00
0,46	50,22	160,3	0,25	44 630,00	47 119,00	44 815,00	0,05	130,1	44 744,00	44 716,00	654,00
0,20	0,34	203,0	0,38	9,00	0,18	44 754,00		121,8	44 563,00	44 596,00	534,00
46 569,00	14,34	232,7	0,27	44 806,00	14 977,00	44 751,00	0,15	89,5	2,0	44 661,00	862,00
44 655,00	44 652,00	339,5	0,46			44 608,00		100,9	44 806,00	44 626,00	738,00
0,11	0,28	44 828,00	0,08			44 663,00		98,2	0,8	0,7	311,00
0,15	0,30	281,1	0,09	0,67		44 601,00		442,7	0,5	0,3	3123,00
43 647,00	35 096,00	156,2	0,10	44 562,00		44 722,00		524,1	44 743,00	3,0	1562,00
32 509,00	0,33	131,2	0,07			44 783,00		354,1	44 593,00	44 652,00	1874,00
12 844,00	20 486,00	56,9	0,08	17 989,00	25 600,00	44 721,00	0,15	285,0	44 563,00	44 587,00	711,00



**Рис. 4. Вариации содержаний редких элементов в арсенопирите (а) и пирите (б) из золото-кварц-арсенопиритовых (синие) и золото-сульфидных (зелёное) руд**

Fig. 4. Variations in the trace element composition of arsenopyrite (a) and pyrite (b) from gold-quartz-arsenopyrite (blue) and gold-sulfide (green) ores

халькопирит, монацит, сфалерит и самородное золото. Текстура пород – прожилково-вкрапленная; структура – гипидиоморфнозернистая, неравномернозернистая, мелко-среднезернистая. Количество рудных минералов редко превышает 10 %.

Арсенопирит представлен идиоморфными зёрнами, призматическими кристаллами и угловатыми обломками кристаллов в нерудной массе размером от долей миллиметра до 1 см (рис. 7). Часто зёрна и кристаллы образуют прожилковые и зернистые агрегаты.

Арсенопирит по химическому составу нестехиометричен; из примесей в значимых количествах отмечаются Sb и Co (см. табл. 1). Минерал характеризуется весьма узким диа-

пазоном содержаний As – от 31,08 до 33,36 ат. % (среднее 32,67), что соответствует составу арсенопирита золотокварцевых месторождений Верхне-Колымского региона [10]. Минерал относится к сернистой разновидности:  $As / S < 1$  ( $As / S$  от 0,87 до 1,0, среднее 0,96). Концентрация Co несколько более высокая по сравнению с минералом из метасоматитов, достигает 900 ppm, содержания Ni такие же низкие и не превышают 6,5 ppm (см. табл. 2). Co / Ni отношения высокие и в среднем равны 6200. Концентрации таких халькофильных элементов, как Cu, Pb, Bi, Zn и Se невысокие, содержание Sb достигает 893 ppm (см. табл. 2, см. рис. 4). В целом их содержание находится в интервале значений, характерных для арсенопирита из метасоматитов.

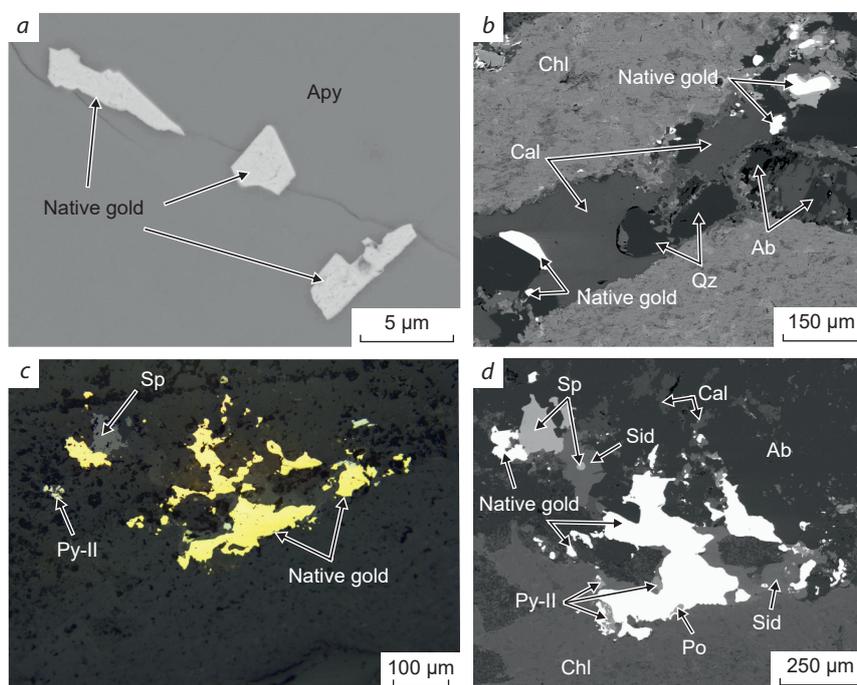
Пирит представлен двумя генерациями. Пирит-I образует идиоморфные зёрна и редко кристаллы кубического сечения размером 100 мкм – первые миллиметры. Минерал находится в ассоциации с арсенопиритом, образуя среднезернистые агрегаты и микропрожилки в нерудной массе (см. рис. 7, d, e).

Кристаллы пирита-I, так же как и арсенопирита, раздроблены и сцементированы более поздними рудными минералами. В трещинках и кавернах пирита-I наблюдаются включения микрозёрен и микрозернистых агрегатов сфалерита и галенита (см. рис. 7, e), которые также отмечены в основной нерудной кварц-карбонат-хлоритовой массе. Вторая генерация пирита-II (поздняя по отношению к пириту-I) представлена изометрическими и аллотриоморфнозернистыми микровключениями в трещинках зёрен арсенопирита, а также микропрожилками, заполняющими пространство между зёрнами арсенопирита (см. рис. 7, f). Вместе с пиритом-II присутствуют аллотриоморфные зёрна халькопирита. По химическому составу пирит обеих генераций стехиометричен и не содержит значимого количества элементов-примесей (см. табл. 1, 3). Пирит-I отличается от пирита-II несколько более высокой концентрацией As и Co, хотя в целом количество микропримесей равно (см. табл. 3). Обе разновидности пирита отличаются от минерала из метасоматитов более

**Табл. 3. Содержание редких элементов в пирите из кварцевых жил и метасоматитов месторождения Каральвеем, ррт**

Table 3. Trace element concentrations in pyrite from quartz veins and metasomatites of the Karalveem deposit, ppm

V	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Sn	Sb	Bi	Pb	Co / Ni
<i>Пирит-I из кварцевых жил</i>												
0,03	42,1	168,7	21 582,00	34,2	42 064,00	363,9	67,5	43 132,00	32,2	0,43	87,0	65,00
0,02	49,0	214,4	46 023,00	52,3	29 618,00	604,8	86,7	32 905,00	47,4	0,78	83,8	170,00
42 736,00	44 788,00	161,5	16 072,00	44 590,00	44 630,00	344,5	44 726,00	13 759,00	48,3	47 150,00	107,5	113,00
0,07	41,0	619,9	0,64	42,5	45 748,00	378,9	44 630,00	11 414,00	35,5	27 395,00	102,4	973,00
<i>Пирит-II из кварцевых жил</i>												
10 990,00	44 620,00	152,2	44 287,00	56,6	14,88	58,5	94,0	31,58	91,0	19 025,00	44 665,00	36,00
14 642,00	44 725,00	280,8	19 450,00	59,5	45 261,00	101,2	44 726,00	25,99	41,4	0,75	32,8	62,00
27 454,00	58,8	385,0	27 061,00	64,5	16,51	101,1	44 583,00	28,97	44 775,00	0,50	44 748,00	140,00
24 685,00	45,3	100,3	0,97	36,2	69,49	117,4	55,2	31,80	44 596,00	0,43	44 783,00	104,00
44 780,00	28,0	261,0	21 551,00	120,2	53,88	65,5	44 634,00	39,78	44 719,00	0,29	44 758,00	165,00
<i>Пирит из метасоматитов по габродолеритам</i>												
0,08	0,4	300,3	0,12	44 744,00	0,66	815,2	44 816,00	0,15	44 597,00	0,19	44 738,00	2482,00
0,41	0,6	200,6	0,23	44 687,00	0,93	818,2	44 812,00	0,18	44 664,00	0,80	82,4	872,00
17 899,00	44 807,00	99,8	0,68	44 807,00	35 431,00	632,9	44 600,00	0,19	6,0	0,43	32,6	148,00
2,00	44 817,00	128,0	0,29	44 594,00	42 036,00	543,8	44 726,00	0,21	3,0	0,52	44 755,00	440,00
0,67	0,8	169,5	0,05	14,0	15,34	529,6	44 571,00	0,28	44 574,00	0,35	66,3	3198,00
42 795,00	44 719,00	140,0	0,43	36,0	27 426,00	417,0	44 604,00	0,31	43,0	21 186,00	234,4	325,00
24 504,00	10,0	201,0	26 299,00	44 656,00	31 472,00	379,6	9,0	0,18	44 596,00	0,40	44 694,00	117,00
28 126,00	44 776,00	88,0	0,38	44 733,00	25,56	376,5	44 578,00	0,75	44 666,00	0,78	79,8	232,00
44 900,00	36,1	69,0	0,06	44 734,00	44 564,00	265,7	44 720,00	0,25	44 721,00	0,52	41,8	1211,00
29 342,00	0,8	246,0	0,28	75,1	46 296,00	217,5	44 824,00	0,26	44 808,00	26 816,00	235,0	891,00
0,59	44 816,00	627,2	0,69	119,8	23,36	160,9	44 762,00	0,20	44 626,00	17 349,00	176,6	916,00
44 806,00	61,9	35,0	0,61	25,0	11 780,00	618,0	44 601,00	0,45	44 731,00	20 576,00	149,8	57,00
26 696,00	44 752,00	258,0	0,29	132,6	14,32	187,0	8,0	44 866,00	14,0	43 831,00	67,8	878,00
34 700,00	44,5	308,0	0,05	115,5	44 166,00	199,7	44 637,00	46 388,00	39,8	44 927,00	194,4	5704,00
11 049,00	44 811,00	77,8	0,11	37,7	15 401,00	147,2	44 571,00	0,45	44 776,00	0,40	17,0	707,00



**Рис. 5. Золото в золото-сульфидных рудах в габбродолеритах:**

*a, b, d* – изображения в обратнорассеянных электронах с электронного микроскопа; *c* – фото минераграфического аншлифа; усл. обозн. см. рис. 3

**Fig. 5. Gold in gold-sulfide ores in gabbrodolerite:**

*a, b, d* – BSE image from an electron microscope; *c* – photograph of a polished mount in reflected light; see Fig. 3 for legend

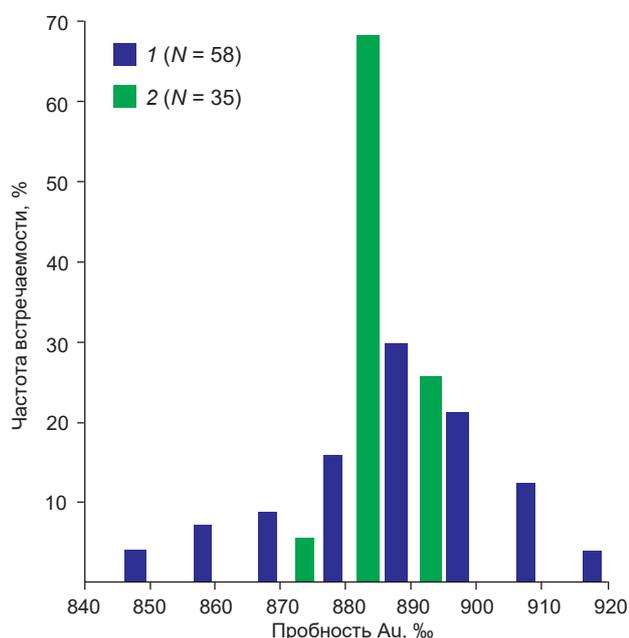
высоким содержанием таких элементов, как Sb и Sn, и более низким – As (см. рис. 4).

Рутил формирует аллотриоморфнозернистые агрегаты и микропрожилки в нерудной массе, развивается по ильмениту (см. рис. 7, *g–i*). Состав и вариации примесей в рутиле, который образует агрегатные скопления в основной массе, незначительно отличаются от таковых в метасоматитах [8]. Ильменит встречается довольно редко и образует удлинённые кристаллы и зёрна неправильной формы размерами до 0,5 мм.

Самородное золото представлено включениями в зёрнах, межзерновом пространстве и в трещинах в арсенопирите, а также в межзерновом пространстве рутиловых агрегатов (см. рис. 7, *h–m*). Формы выделений самородного золота округлая, неправильная, интерстици-

альная, прожилковая; размер отдельных частиц варьируется от первых до десятых микрометров. Нередко в ассоциации с самородным золотом в виде включений в арсенопирите встречаются микрозёрна и микрозернистые агрегаты галенита неправильной формы, что указывает на близодновременную кристаллизацию этих минералов. Пробность самородного золота варьируется от 840 до 910 ‰ (см. рис. 6), а из примесей в значимых количествах установлено серебро (см. табл. 4).

**Обсуждение результатов.** Результаты изучения структурно-текстурных взаимоотношений минералов и минеральных ассоциаций в основных типах руд месторождения позволили выделить в минералообразующем процессе два этапа, последовательно сменяющих друг друга – дорудный (I) и рудный продук-



**Рис. 6. Пробность самородного золота из золото-кварц-арсенопиритовых (1) и золото-сульфидных (2) руд**

*N* – количество замеров

**Fig. 6. Fineness of native gold from gold-quartz-arsenopyrite (1) and gold-sulfide (2) ores**

*N* – the number of measurements

тивный (II). Схема последовательности минералообразования имеет идеализированный вид и представлена на рис. 8.

К *дорудному этапу* отнесены продукты высокотемпературных преобразований вмещающих пород (габбродолеритов), вероятно, вызванных внедрением магматических пород кислого состава (?).

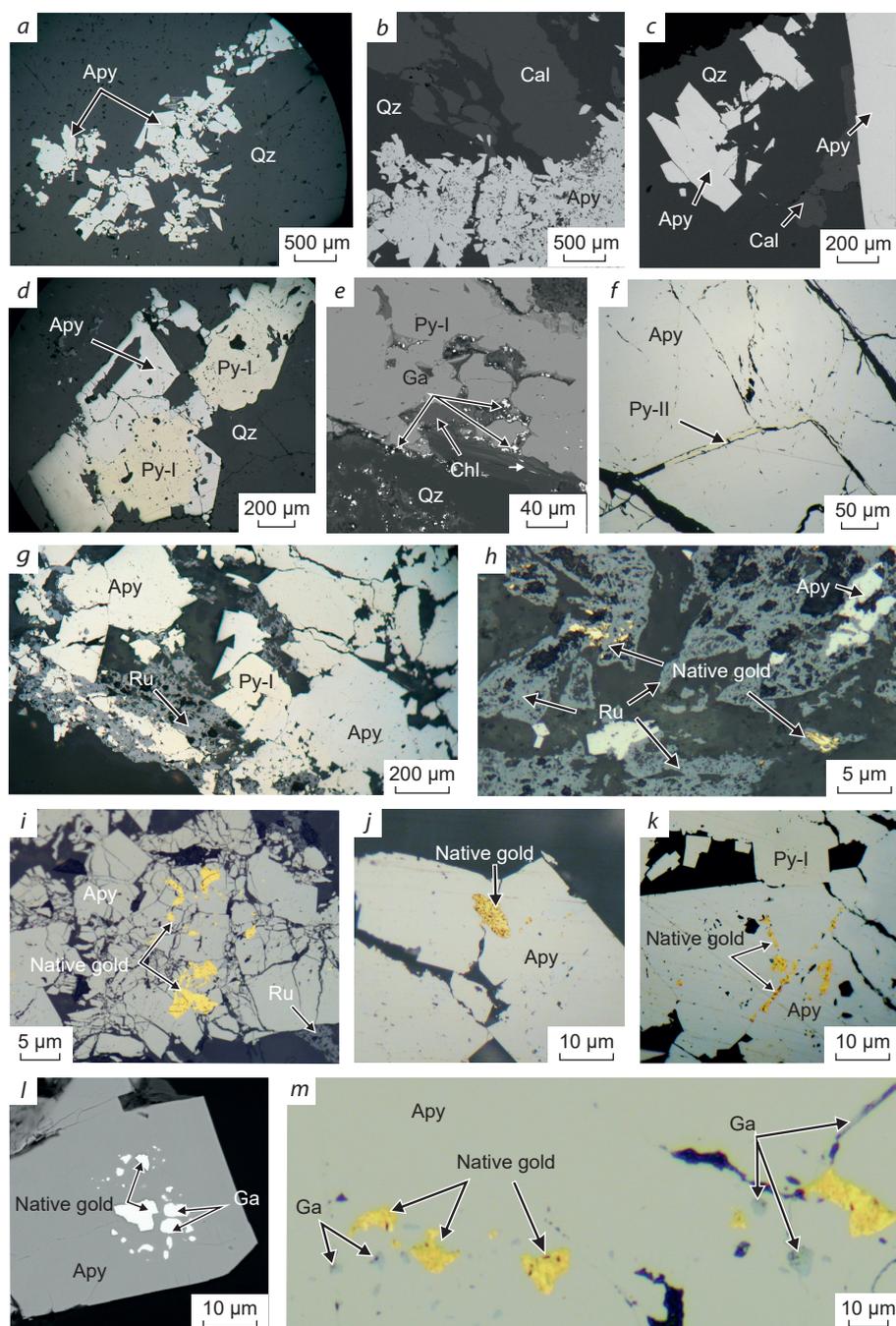
В *рудный этап* сформировались золото-сульфидный в габбродолеритах и золото-кварц-арсенопиритовый типы руд. Активная тектоническая деятельность привела к образованию секущих кварцевых жил, а сами дорудные метасоматиты разбивались сетью мелких гидротермальных жил и прожилков. В это время сформировалась пирит-арсенопиритовая ( $\pm$  самородное золото) минеральная ассоциация. Далее в процессе минерало-

**Табл. 4. Представительные анализы химического состава самородного золота из различных типов руд месторождения Каральвеем, мас. %**

**Table 4. Representative analyses of the chemical composition of native gold from various ore types of the Karalveem deposit, wt. %**

Ag	Cu	Au	Hg	Сумма
<i>Из кварцевых жил</i>				
43 344,00	0,01	89,95	0,00	99,14
19 572,00	0,00	91,62	0,00	100,15
18 172,00	0,02	88,72	0,00	99,23
29 434,00	0,03	91,59	0,00	100,42
16 711,00	0,00	90,28	0,00	100,72
30 590,00	0,07	87,83	0,00	98,73
42 675,00	0,00	87,85	0,46	99,47
33 117,00	0,00	90,66	0,00	100,56
19 998,00	0,00	89,65	0,12	100,30
22 160,00	0,07	90,03	0,00	99,70
<i>Из метасоматитов</i>				
44 753,00	0,00	89,34	0,00	100,41
44 876,00	0,00	88,98	0,00	100,09
44 845,00	0,06	87,91	0,14	99,21
30 225,00	0,00	90,05	0,03	100,90
24 381,00	0,00	89,33	0,01	100,00
44 572,00	0,00	88,44	0,26	99,71
30 225,00	0,00	88,94	0,16	99,93
44 845,00	0,06	87,91	0,14	99,21
44 784,00	0,02	88,67	0,18	99,95
24 777,00	0,00	88,57	0,16	100,40

образования вмещающие породы (кварцевые жилы и метасоматиты по габбродолеритам) катаклазировались. Рудоносный флюид мигрировал по вновь образованным трещинам и отлагал основную массу самородного золота, в результате чего сформировалась золото-га-



**Рис. 7. Минеральный состав золото-кварц-арсенопиритового типа руд:**

*a, c, d, f, g–k, m* – минералогические фото; *b, e, l* – фотографии со сканирующего электронного микроскопа, изображения в обратнорассеянных электронах; усл. обозн. см. рис. 3

**Fig. 7. Mineral composition of gold-quartz-arsenopyrite type ores:**

*a, c, d, f, g–k, m* – photos in reflected light; *b, e, l* – BSE images from a scanning electron microscope, images in back-scattered electrons; see fig. 3 for legend

Минералы	Габбро-долерит	Руды
Клинопироксен		
Плагиоклаз An <sup>55-65</sup>		
КПШ		
Кварц		
Биотит		
Хлорит		
Эпидот		
Кальцит		
Сидерит		
Доломит		
Альбит		
Мусковит		
Монацит		
Ксенотим		
Апатит		
Циркон		
Бадделеит		
Магнетит		
Ильменит		
Рутил		
Пирротин		
Халькопирит		
Пирит		
Арсенопирит		
Кобальтин		
Глаукоdot		
Галенит		
Сфалерит		
Марказит		
Самородное Au		

**Рис. 8. Схема последовательности минералообразования руд Каральвеевского месторождения, по данным авторов, с использованием фондовых материалов и данных [7]**

**Fig. 8. Scheme of the order of mineral formation of the ores of the Karalveem deposit. Compiled according to the authors, using fund materials and data [7]**

ленитовая минеральная ассоциация. Логично предположить, что флюид был обогащён Au, Ag, Pb, Sb, S (по минеральным ассоциациям и составу минералов). Проведённые нами исследования химического состава самородного золота из кварц-сульфидных жил и метасоматитов по габбродолеритам не выявили существенного отличия, что указывает на присутствие в различных типах руд одной генерации самородного золота (см. рис. 5).

Вариации редкоэлементного состава пирита и арсенопирита обычно связывают с меняющимися физико-химическими параметрами, такими как температура, давление, окислительно-восстановительный потенциал, pH, а также изменяющийся состав гидротермальных растворов [14–16, 20, 21].

Имеющиеся опубликованные данные свидетельствуют о положительной корреляции между содержанием Se в пирите и температурой флюида [20]. Содержание Se в пирите из метасоматитов несколько выше по сравнению с минералом из кварцевых жил. Не менее чувствительными индикаторами снижения температуры раствора и быстрой кристаллизации являются As и Co [13, 15, 19, 22, 23]. Поведение As в минерале из руд Каральвеевма показывает обратную картину – содержание As в пирите из метасоматитов ниже по сравнению с минералом из кварцевых жил. Пириты как метасоматитов, так и кварцевых жил характеризуются схожими значениями содержания Co, хотя они сильно варьируются. К сожалению, мы не можем сопоставить имеющиеся вариации содержаний Se, Co и As с данными о температурах формирования этих типов руд, поскольку ранее полученные микротермометрические исследования флюидных включений имеются только для кварцевых жил [7]. При этом стоит отметить, что результаты исследований включений свидетельствуют о широком интервале температур их образования (180–310 °C) [7]. Можно полагать, что эти вариации температур могли отражаться на составе формирующихся минералов, хотя изменение концентраций элементов как в пирите, так и в арсенопирите может быть также связано с влиянием окис-



лительно-восстановительного потенциала и изменяющимся составом гидротермальных растворов. Содержание Se, Co и Bi в пирите чувствительно к окислительно-восстановительному потенциалу, при этом концентрация Se имеет положительную корреляцию с фугитивностью кислорода, но в направлении, противоположном Co [17, 18]. Также известно, что процесс окисления снижает растворимость Bi [24]. Полученные нами данные по поведению Se, Co и Bi в пирите из кварцевых жил и метасоматитов Каральвеема не свидетельствуют в пользу зависимости этих элементов от окислительно-восстановительных условий. Так, при увеличивающемся количестве Se в пирите от метасоматитов к кварцевым жилам концентрации Co и Bi не уменьшаются, а попадают в схожие интервалы значений. Вариант колебания микроэлементного состава пирита и арсенопирита в зависимости от из-

меняющегося состава гидротермальных растворов наравне с температурным режимом выглядит вполне реальным с учётом данных по составу флюидных включений в кварцевых жилах Каральвеема [7].

Таким образом, по результатам исследований нами не выявлено существенного отличия в редкоэлементном составе пирита и арсенопирита из метасоматитов и кварцевых жил, а имеющиеся вариации, скорее всего, обусловлены температурным режимом и составом гидротермального раствора. При этом на основании сходства составов пирита, арсенопирита и самородного золота можно сделать вывод о том, что продуктивность золото-сульфидных и золото-кварц-арсенопиритовых руд обусловлена единым импульсом.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (№ 0330–2016–0002) и ГИН СО РАН (АААА-А16-116122110027-2).*

## Список литературы

1. Богданов Н. А., Тильман С. М. Тектоника и геодинамика северо-востока Азии (объяснительная записка к тектонической карте северо-востока Азии масштаба 1 : 5 000 000). – М. : ИЛ РАН, 1992. – 56 с.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. А. И. Ханчука. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – 572 с.
3. Городинский М. Е., Цопанов О. Х. Скопление золота на одном из рудных месторождений Чукотки // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. – Магадан, 1975. – Вып. 22. – С. 248–250.
4. Горячев Н. А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1998. – 210 с.
5. Давиденко Н. М. Минеральные ассоциации и условия формирования золотоносных кварцевых жил Мало-Ануйского района Западной Чукотки. – Новосибирск : Наука, 1975. – 134 с.
6. Давыдов А. С. Последовательность формирования минеральных ассоциаций золоторудных проявлений Ануйской зоны (Западная Чукотка) // Минеральные типы рудных месторождений в вулканогенных поясах и зонах активизации Северо-Востока Азии. – Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1983. – С. 137–153.
7. Кондратьев М. Н., Савва Н. Е., Гамянин Г. Н., Колова Е. Е., Семьшев Ф. И., Малиновский М. А., Кондратьева Е. А. Новые данные по структуре, минералогии, геохимии золоторудного месторождения Каральвеем (Чукотка) // Отечественная геология. – 2017. – № 3. – С. 26–44.
8. Максаров Р. А., Дорошкевич А. Г., Прокопьев И. Р., Редин Ю. О., Потапов В. В. V-Nb-W-содержащий рутил золоторудного месторождения Каральвеем как потенциальный индикатор рудоносности // Геосферные исследования. – 2020. – № 3. – С. 50–59.
9. Ольшевский В. М. Минеральные ассоциации золоторудных жил Мало-Ануйского района // Колыма. – 1976. – № 6. – С. 46–48.
10. Тюкова Е. Э., Ворошин С. В. Состав и парагенезисы арсенопирита в месторождениях и вмещающих породах Верхне-Колымского региона

- (к интерпретации генезиса сульфидных руд). – Магадан : СКВНИИ ДВО РАН, 2007. – 107 с.
11. Щапова Ю. В., Вотяков С. Л., Замятин Д. А., Червяковская М. В., Панкрушина Е. А. Минералы-концентраторы *d*- и *f*-элементов: локальные спектроскопические и ЛА-ИСП-МС исследования состава, структуры и свойств, геохронологические приложения: монография / под ред. С. Л. Вотякова ; Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН. – Новосибирск : СО РАН, 2020. – 424 с. – (Аналитика – наукам о Земле).
  12. Шило Н. А., Давиденко Н. М., Чибисов Н. П. О связи пробы и морфологии самородного золота (на примере Каральвеевского месторождения) // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 238, № 4. – С. 936–939.
  13. Abratis P. K., Patrick R. A. D., Vaughan D. J. Variations in the compositional, textural and electrical properties of natural pyrite: a review // International Journal of Mineral Processing. – 2004. – № 74. – P. 41–59.
  14. Afifi A. M., Kelly W. C., Essene E. J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides; I, Thermochemical data and calculated equilibria // Economic Geology. – 1988. – № 83 (2). – P. 377–394.
  15. Huston D. L., Sie S. H., Suter G. F., Cooke D. R., Both R. A. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Part I, proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, selenium levels in pyrite: comparison with  $\delta^{34}\text{S}$  values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems // Economic Geology. – 1995. – № 90. – P. 1167–1196.
  16. Large R. R., Danyushevsky L. V., Hollit C., Maslennikov V., Meffre S., Gilbert S. E., Bull S., Scott R. J., Emsbo P., Thomas H., Singh B., Foster J. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment hosted deposits // Economic Geology. – 2009. – № 104. – P. 635–668.
  17. Large R. R., Mukherjee I., Gregory D. D., Steadman J., Corkrey R., Danyushevsky L. V. Atmospheric oxygen cycling through the Proterozoic and Phanerozoic. – Mineralium Deposita. – 2019. – № 54. – P. 485–506.
  18. Large R. R., Mukherjee I., Gregory D. D., Steadman J., Maslennikov V. V., Meffre S. Ocean and atmosphere geochemical proxies derived from trace elements in marine pyrite: implications for ore genesis in sedimentary basins // Economic Geology. – 2017. – № 112. – P. 423–450.
  19. Li X. H., Fan H. R., Yang K. F., Hollings P., Liu X., Hu F. F., Cai Y. C. Pyrite textures and compositions from the Zhuangzi Au deposit, southeastern North China Craton: implication for ore-forming processes // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2018. – № 173. – 73 p.
  20. Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Large R. R., Danyushevsky L. V. Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS) // Economic Geology. – 2009. – № 104 (8). – P. 1111–1141.
  21. Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Large R. R., Danyushevsky L. V., Herrington R. J., Stanley C. J. Tellurium-bearing minerals in zoned sulfide chimneys from Cu-Zn massive sulfide deposits of the Urals, Russia // Mineralogy and Petrology. – 2013. – № 107 (1). – P. 67–99.
  22. Reich M., Deditius A., Chryssoulis S., Li J. W., Ma C. Q., Parada M. A., Barra F., Mittermayr F. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: a SIMS/EMPA trace element study // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2013. – № 104. – P. 42–62.
  23. Román N., Reich M., Leisen M., Morata D., Barra F., Deditius A. P. Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2019. – № 246. – P. 60–85.
  24. Skirrow R. G., Walshe J. L. Reduced and oxidized Au-Cu-Bi iron oxide deposits of the Tennant Creek Inlier, Australia: an integrated geologic and chemical model // Economic Geology. – 2002. – № 97 (6). – P. 1167–1202.



## References

1. Bogdanov N. A., Til'man S. M. Tektonika i geodinamika severo-vostoka Azii (ob'yasnitel'naya zapiska k tektonicheskoi karte severo-vostoka Azii masshtaba 1 : 5 000 000) [Tectonics and Geodynamics of Northeast Asia (explanatory note to the 1:5,000,000 scale tectonic map of Northeast Asia)], Moscow, IL RAN Publ., 1992, 56 p.
2. Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii. V 2 kn. Kn. 1 [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the East of Russia. In 2 books. Book 1], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2006, 572 p.
3. Gorodinskii M. E., Tsoponov O. Kh. Skoplenie zolota na odnom iz rudnykh mestorozhdenii Chukotki [Accumulation of gold in one of the ore deposits of Chukotka], *Materialy po geologii i poleznym iskopayemym Severo-Vostoka SSSR [Materials on geology and minerals of the North-East of the USSR]*, Magadan, 1975, V. 22, pp. 248–250. (In Russ.).
4. Goryachev N. A. Geologiya mezozoiskikh zolotokvartsevykh zhil'nykh poyasov Severo-Vostoka Azii [Geology of Mesozoic gold-quartz vein belts of Northeast Asia], Magadan, SVKNII DVO RAN Publ., 1998, 210 p.
5. Davidenko N. M. Mineral'nye assotsiatsii i usloviya formirovaniya zolotonosnykh kvartsevykh zhil'nykh Malo-Anyuiskogo raiona Zapadnoi Chukotki [Mineral associations and conditions of formation of gold-bearing quartz veins of the Malo-Anyuisky district of Western Chukotka], Novosibirsk, Nauka Publ., 1975, 134 p.
6. Davydov A. S. Posledovatel'nost' formirovaniya mineral'nykh assotsiatsii zolotorudnykh proyavlenii Anyuiskoi zony (Zapadnaya Chukotka) [The sequence of formation of mineral associations of gold-ore manifestations of the Anyui zone (Western Chukotka)], *Mineral'nye tipy rudnykh mestorozhdenii v vulkanogennykh poyasakh i zonakh aktivizatsii Severo-Vostoka Azii [Mineral types of ore deposits in volcanogenic belts and activation zones of Northeast Asia]*, Vladivostok, DVNTs AN SSSR Publ., 1983, pp. 137–153.
7. Kondrat'ev M. N., Savva N. E., Gamyarin G. N., Kolova E. E., Semyshv F. I., Malinovskii M. A., Kondrat'eva E. A. Novye dannye po strukture, mineralogii, geokhimii zolotorudnogo mestorozhdeniya Karal'veem (Chukotka) [New data on the structure, mineralogy, geochemistry of the Karalveem gold deposit (Chukotka)], *Otechestvennaya geologiya [National Geology]*, 2017, No 3, pp. 26–44. (In Russ.).
8. Maksarov R. A., Doroshkevich A. G., Prokop'ev I. R., Redin Yu. O., Potapov V. V. V-Nb-W-soderzhashchii rutil zolotorudnogo mestorozhdeniya Karal'veem kak potentsial'nyi indikator rudonosnosti [V-Nb-W-containing rutile of the Karalveem gold deposit as a potential indicator of ore content], *Geosfernye issledovaniya [Geosphere Research]*, 2020, No 3, pp. 50–59. (In Russ.).
9. Ol'shevskii V. M. Mineral'nye assotsiatsii zolotorudnykh zhil'nykh Malo-Anyuiskogo raiona [Mineral associations of gold ore veins of the Malo-Anyuisky district], *Kolyma [Kolyma]*, 1976, No 6, pp. 46–48. (In Russ.).
10. Tyukova E. E., Voroshin S. V. Sostav i paragenезis arsenopirita v mestorozhdeniyakh i vmeshchayushchikh porodakh Verkhne-Kolym'skogo regiona (k interpretatsii genezisа sulfidnykh rud) [Composition and parageneses of arsenopyrite in deposits and host rocks of the Upper Kolyma region (to interpret the genesis of sulfide ores)], Magadan, SKVNII DVO RAN Publ., 2007, 107 p.
11. Shchapova Yu. V., Votyakov S. L., Zamyatin D. A., Chervyakovskaya M. V., Pankrushina E. A. Mineraly-kontsentratory d- i f-elementov: lokal'nye spektroskopicheskie i LA-ISP-MS issledovaniya sostava, struktury i svoystv, geokhronologicheskie prilozheniya [Concentrator minerals of d- and f-elements: local spectroscopic and LA-ISP-MS studies of composition, structure and properties, geochronological applications], Novosibirsk, SO RAN Publ., 2020, 424 p.
12. Shilo N. A., Davidenko N. M., Chibisov N. P. O svyazi proby i morfologii samorodnogo zolota (na primere Karal'veem'skogo mestorozhdeniya) [On the connection of the sample and the morphology of native gold (on the example of the Karalveem deposit)], *Doklady AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]*, 1978, V. 238, No 4, pp. 936–939. (In Russ.).
13. Abraitis P. K., Patrick R. A. D., Vaughan D. J. Variations in the compositional, textural and electrical properties of natural pyrite: a review, *International Journal of Mineral Processing*, 2004, No 74, pp. 41–59.

14. Afifi A. M., Kelly W. C., Essene E. J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides; I, Thermochemical data and calculated equilibria, *Economic Geology*, 1988, No 83 (2), pp. 377–394.
15. Huston D. L., Sie S. H., Suter G. F., Cooke D. R., Both R. A. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Part I, proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, selenium levels in pyrite: comparison with  $\delta^{34}\text{S}$  values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems, *Economic Geology*, 1995, No 90, pp. 1167–1196.
16. Large R. R., Danyushevsky L. V., Hollit C., Maslennikov V., Meffre S., Gilbert S. E., Bull S., Scott R. J., Emsbo P., Thomas H., Singh B., Foster J. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment hosted deposits, *Economic Geology*, 2009, No 104, pp. 635–668.
17. Large R. R., Mukherjee I., Gregory D. D., Steadman J., Corkrey R., Danyushevsky L. V. Atmosphere oxygen cycling through the Proterozoic and Phanerozoic, *Mineralium Deposita*, 2019, No 54, pp. 485–506.
18. Large R. R., Mukherjee I., Gregory D. D., Steadman J., Maslennikov V. V., Meffre S. Ocean and atmosphere geochemical proxies derived from trace elements in marine pyrite: implications for ore genesis in sedimentary basins, *Economic Geology*, 2017, No 112, pp. 423–450.
19. Li X. H., Fan H. R., Yang K. F., Hollings P., Liu X., Hu F. F., Cai Y. C. Pyrite textures and compositions from the Zhuangzi Au deposit, southeastern North China Craton: implication for ore-forming processes, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2018, No 173, 73 p.
20. Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Large R. R., Danyushevsky L. V. Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS), *Economic Geology*, 2009, No 104 (8), pp. 1111–1141.
21. Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Large R. R., Danyushevsky L. V., Herrington R. J., Stanley C. J. Tellurium-bearing minerals in zoned sulfide chimneys from Cu-Zn massive sulfide deposits of the Urals, Russia, *Mineralogy and Petrology*, 2013, No 107 (1), pp. 67–99.
22. Reich M., Deditius A., Chryssoulis S., Li J. W., Ma C. Q., Parada M. A., Barra F., Mittermayr F. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: a SIMS/EMPA trace element study, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, No 104, pp. 42–62.
23. Román N., Reich M., Leisen M., Morata D., Barra F., Deditius A. P. Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, No 246, pp. 60–85.
24. Skirrow R. G., Walshe J. L. Reduced and oxidized Au-Cu-Bi iron oxide deposits of the Tennant Creek Inlier, Australia: an integrated geologic and chemical model, *Economic Geology*, 2002, No 97 (6), pp. 1167–1202.



## Авторы

### Максаров Руслан Александрович

младший научный сотрудник<sup>1</sup>  
doroshkevich@igm.nsc.ru

### Прокопьев Илья Романович

кандидат геолого-минералогических наук  
старший научный сотрудник, доцент<sup>1, 2</sup>  
prokop@igm.nsc.ru

### Дорошкевич Анна Геннадьевна

доктор геолого-минералогических наук  
заведующий лабораторией<sup>1, 3</sup>  
doroshkevich@igm.nsc.ru

### Редин Юрий Олегович

кандидат геолого-минералогических наук  
старший научный сотрудник<sup>1</sup>  
redin@igm.nsc.ru

### Малютина Александра Владиславовна

инженер<sup>1</sup>  
malyutina@igm.nsc.ru

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии  
СО РАН им. В. С. Соболева,  
г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский Государственный Университет,  
г. Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт СО РАН  
им. Н. Л. Добрецова,  
г. Улан-Удэ, Россия

## Authors

### Ruslan A. Maksarov

Junior Researcher<sup>1</sup>  
doroshkevich@igm.nsc.ru

### Ilya R. Prokopiev

PhD  
Senior Researcher, Associate Professor<sup>1,2</sup>  
prokop@igm.nsc.ru

### Anna G. Doroshkevich

DrSc  
Head of Laboratory<sup>1,3</sup>  
doroshkevich@igm.nsc.ru

### Yuri O. Redin

PhD  
Senior Researcher<sup>1</sup>  
redin@igm.nsc.ru

### Alexandra V. Malyutina

Engineer<sup>1</sup>  
malyutina@igm.nsc.ru

<sup>1</sup> V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University,  
Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> N. L. Dobretsov Geological Institute,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ulan-Ude, Russia