

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.2:553.411 (571.54)

Минералогия и условия образования Южно-Магнетитового золото-полиметаллического месторождения (Озёрнинский рудный узел, Республика Бурятия)

Москвитина М. Л.¹, Дамдинов Б. Б.², Извекова А. Д.³, Дамдинова Л. Б.^{1,2}¹ ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия; ² ЦНИГРИ, г. Москва, Россия; ³ ИЗК СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Южно-Магнетитовое месторождение, расположенное в Еравнинском районе Республики Бурятия, локализовано в толще вулканогенно-осадочных пород и приурочено к минерализованной зоне дробления и брекчирования вблизи даек сиенитов и долеритов, где развита кварцево- жильно-прожилковая и сульфидно-вкрапленная минерализация, а также присутствуют линзовидные тела магнетитовых руд. Развита вторичные метасоматические изменения – пропилитизация, аргиллизация, окварцевание; на более глубоких горизонтах установлено развитие скарнов. В рудах выявлено около 30 минеральных видов, главными из которых являются магнетит, гематит, халькопирит и пирит, а также минералы зоны окисления – куприт, ковеллин, идаит, гидрокислы железа, самородная медь.

На основании изучения состава руд, а также по результатам минеральной геотермометрии установлено, что Южно-Магнетитовое месторождение образовалось в три этапа: скарновый, гидротермально-метасоматический и гипергенный. Особенности геологического строения, минеральный состав руд, изотопные и геохимические характеристики Южно-Магнетитового месторождения позволили отнести его к золото-скарновому формационному типу.

Ключевые слова: Озёрнинский рудный узел, Южно-Магнетитовое месторождение, золото, золото-полиметаллические месторождения, минералогия, изотопы серы и кислорода, последовательность минералообразования.

Для цитирования: Москвитина М. Л., Дамдинов Б. Б., Извекова А. Д., Дамдинова Л. Б. Минералогия и условия образования Южно-Магнетитового золото-полиметаллического месторождения (Озёрнинский рудный узел, Республика Бурятия). Руды и металлы. 2025. № 4. С. 5–32. DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10010.

Mineralogy and formation conditions of the Yuzhno-Magnetitovoye gold-polymetallic deposit (Ozerninsky ore cluster, Republic of Buryatia)

Moskvitina M. L.¹, Damdinov B. B.², Izvekova A. D.³, Damdinova L. B.^{1,2}¹ Dobretsov Geological Institute of the SB RAS, Ulan-Ude, Russia; ² Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia; ³ Institute of the Earth's Crust of the SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The Yuzhno-Magnetitovoye deposit is located in the Eravninsky district of the Republic of Buryatia and localized in a sequence of volcanosedimentary rocks and is confined to a mineralized zone of crushing and brecciation near syenite and dolerite dikes, where vein-veinlet quartz and disseminated sulfide mineralization is developed and lens-shaped bodies of magnetite ores are present. Secondary metasomatic alterations, including propylitization, argillization, and silicification are developed, as well as skarns revealed at deeper levels. Approximately 30 mineral species were identified in the ores, the principal ones being magnetite, hematite, chalcopyrite, and pyrite. The minerals of the oxidation zone are cuprite, covellite, idaite, iron hydroxides, and native copper.

Based on ore composition studies and mineral geothermometry, it has been established that the Yuzhno-Magnetitovoye deposit formed in three stages: the skarn, hydrothermal-metasomatic, and supergene ones. The geological features, mineral composition of the ores, and the isotopic and geochemical characteristics of the Yuzhno-Magnetitovoye deposit allow us to assign it to the gold-skarn type.

Keywords: Ozerninsky ore cluster, Yuzhno-Magnetitovoye deposit, gold, gold-polymetallic deposits, mineralogy, sulfur and oxygen isotopes, sequence of mineral formation.

For citation: Moskvitina M. L., Damdinov B. B., Izvekova A. D., Damdinova L. B. Mineralogy and formation conditions of the Yuzhno-Magnetitovoye gold-polymetallic deposit (Ozerninsky ore cluster, Republic of Buryatia). Ores and metals. 2025. No. 4. pp. 5–32. DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10010.



Введение

Озёрнинский рудный узел находится на территории Республики Бурятия и входит в состав Курбино-Еравнинского рудного района [4]. В пределах рудного узла известно крупнейшее в России по запасам цинка Озёрное полиметаллическое месторождение, а также около 20 более мелких месторождений и рудопроявлений различных типов (Назаровское, Ульзутуйское, Гурвунурское, Гундуйское, Аришинское, Октябрьское, Южно-Магнетитовое, Васильевское и т. д.) [14] (рис. 1).

Озёрнинский рудный узел приурочен к блоку терригенно-карбонатно-вулканогенных пород площадью 20×10 км среди гранитоидов Ангаро-Витимского батолита позднепалеозойского возраста [7]. Осадочно-вулканогенные породы, в свою очередь, прорваны интрузивными и субвулканическими породами.

История изучения Озёрнинского рудного узла начинается с 1960-х годов, когда в пределах региона проводились геологоразведочные работы по поиску бокситов в кембрийских вулканогенно-осадочных образованиях. В ходе исследований были выявлены железорудные проявления, изучение которых впоследствии привело к обнаружению свинцово-цинковых руд будущего Озёрного месторождения.

Обнаружение колчеданных руд полностью изменило план геологических работ в пределах региона. Это привело к тому, что в течение нескольких лет было выявлено большинство ныне известных колчеданно-полиметаллических, железорудных и железо-медно-баритовых месторождений (Озёрное, Ульзутуйское, Гематитовое, Магнетитовое, Гурвунурское, Аришинское, Туркульское и Гундуйское). Озёрное месторождение по запасам свинца и цинка относится к объектам мирового класса с $\sim 8,3$ млн т Zn, 1,6 млн т Pb (1,17%), ~ 21 тыс. т Cd, более 4,6 тыс. т Ag, 25 т Au [3].

В 1968 году по результатам проведения поисковых и поисково-оценочных работ были получены первые данные о золотоносности некоторых месторождений Озёрнинского рудного узла, а в 1975 году при лабораторных исследованиях технологических проб первич-

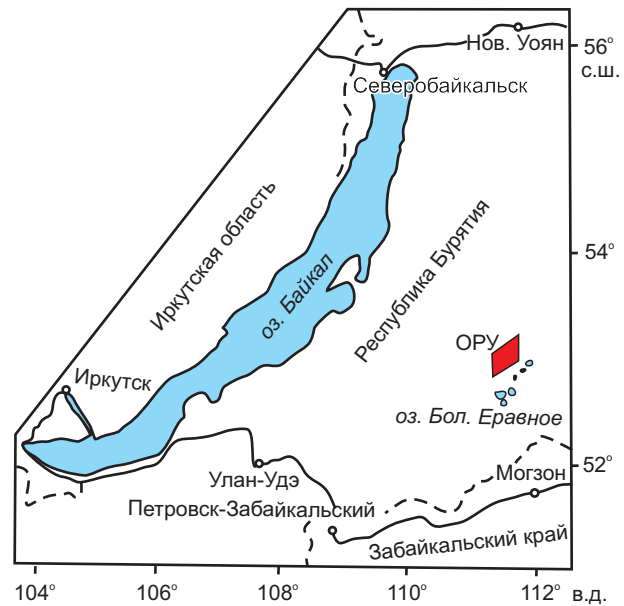


Рис. 1. Схема расположения Озёрнинского рудного узла

Fig. 1. Location map of the Ozerninsky ore cluster

ных руд Назаровского месторождения (которое изначально называлось Гематитовое) были установлены промышленные концентрации золота, что и послужило началом изучения золотоносности Озёрнинского рудного узла, которое продолжается до настоящего времени.

Сведения о составе и генезисе руд Назаровского месторождения более подробно освещены в публикации Ковалёва с соавторами [7]. Позднее наряду с Назаровским были выявлены несколько мелких золоторудных месторождений и рудопроявлений, в том числе и Южно-Магнетитовое, а также многочисленные россыпи самородного золота, самой крупной из которых является россыпь ручья Каменного. В то же время в ходе поисково-разведочных работ детальных исследований состава и генезиса золотоносных руд ранее не проводилось, за исключением единственного промышленно значимого объекта – Назаровского месторождения.

Участок Южно-Магнетитовый изначально рассматривался как продолжение структуры борно-магнетитового месторождения Солонго и вероятный выход скарново-рудных тел на дневную поверхность. В дальнейшем бор-



ной минерализации в контуре Южно-Магнетитового участка не было установлено, но были выявлены гематит-магнетитовые и золотоносные кварц-сульфидные (пиритовые) руды. По данным геологоразведочных работ запасы золота на рудопроявлении Южно-Магнетитовое составили чуть более 3 тонн, что позволило отнести этот объект к мелким месторождениям с бедными рудами (средние содержания золота составляют первые г/т).

В ходе геологоразведочных работ по ряду признаков (нахождение в непосредственной близости, окатанность зёрен, золото-кварц-сульфидный тип первичного оруденения) было сделано предположение о том, что самородное золото Южно-Магнетитового месторождения может являться одним из коренных источников россыпи ручья Каменного. В результате наших исследований в рудах Южно-Магнетитового месторождения установлена золото-висмут-теллуридная минерализация, которая характерна для многих золоторудных месторождений и может служить индикатором физико-химических условий формирования оруденения.

В статье приведены результаты детальных исследований минерального состава руд Южно-Магнетитового месторождения, на основе которых сделаны выводы о его генезисе, с выделением этапов и стадий минералообразования.

Фактический материал и методы исследования

Фактическим материалом для данного исследования послужил каменный материал, полученный в 2022 году в ходе полевых работ на Южно-Магнетитовом месторождении, где была отобрана представительная коллекция геологических образцов вмещающих пород и руд в количестве 57 штук.

Минеральный состав руд и вмещающих пород изучался по аншлифам и шлифам при помощи поляризационного микроскопа «Микромед ПОЛАР 3». Было изучено около 20 аншлифов и 36 шлифов. Более детально минеральный состав руд, а также химический состав рудных минералов были проанализи-

рованы в Аналитическом центре «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO-1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 для количественного анализа (аналитик Е. В. Ходырева).

Для обнаружения редких минералов и различных микрофаз были изготовлены шашки (искусственные аншлифы) из проб-протолок (7 штук). Эти препараты исследовались под поляризационным микроскопом «Микромед ПОЛАР 3» по методике НСОММИ № 194 и на сканирующем электронном микроскопе.

Изотопный состав серы из сульфидных минералов (пирит, халькопирит) определялся в «Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований СО РАН» на базе Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск). Исследования проводились на газовом изотопном масс-спектрометре Delta V Advantage в режиме двойного напуска (аналитик В. Н. Реутский). Процедуру подготовки проб и масс-спектрометрических измерений контролировали набором образцов стандартного изотопного состава: IAEA-S-1 (сульфид серебра с $\delta^{34}\text{S} = -0,3$), IAEA-S-2 (сульфид серебра с $\delta^{34}\text{S} = +22,7$), СССР-20 (дисульфид железа с $\delta^{34}\text{S} = -3,3$). Инструментальная точность определения отклонения отношения $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ образца от стандарта не превышает 0,005 ‰. Измеренные отношения изотопов приведены к международной шкале VCTD (венский стандарт троилита из каньона Дьябло).

Изотопный состав кислорода в кварце и магнетите анализировали в Центре коллективного пользования «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (аналитик В. Ф. Посохов). Элементно-примесный анализ зёрен магнетита определялся с помощью метода LA-ICP-MS в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института земной коры СО РАН (г. Иркутск; аналитик Н. В. Брянский).

Геологическое строение Южно-Магнетитового месторождения

Озёрнинский рудный узел входит в состав Курбино-Еравнинского рудного района, расположенного в центральной части Саяно-Байкальской складчатой области [4]. В тектоническом плане рудный узел сопряжён с крупной Еравнинской вулкано-тектонической структурой (рис. 2), площадь которой составляет более 100 км² и которая считается фрагментом Удино-Витимской островодужной системы.

Озёрнинский рудный узел сложен вулканогенно-осадочными отложениями, ранее относимыми к нижнепалеозойской олдындинской свите [20]. Карбонатно-терригенно-вулканогенные отложения прорываются многочисленными интрузивными и субвулканическими образованиями: диоритовыми порфиритами, сиенит-порфирами, габбро-долеритами и др. (рис. 2).

Южно-Магнетитовое месторождение расположено в 3 км к востоку от Озёрного полиметаллического месторождения, в верхнем течении ручья Левый Сурхехт на левом борту его правого притока – ручья Каменного.

Изучение геологического строения проводилось в пологом борту небольшого карьера, вскрывающего рудную зону Южно-Магнетитового месторождения. В рудном поле преобладают вулканогенно-осадочные породы, представленные туфоалевролитами и туфопесчаниками (рис. 3).

Тонкозернистые туфоалевролиты, окраска которых изменяется от зеленовато-серых до чёрных (рис. 4, а), на поверхности за счёт окисления минералов приобретают оранжево-рыжеватые оттенки. Минеральный состав породы представлен главным образом обломками карбоната (кальцит), полевого шпата, кварца и чешуйками слюды (мусковит). Размер обломков варьирует от 50 мкм до 300 мкм. Цемент состоит из глинисто-туфогенного материала, который частично подвергся вторичным изменениям и замещается хлоритом. В породе по трещинам прослеживаются эпигенетические прожилковидные агрегаты, которые сложены более вытянутыми зёрнами кварца с округлыми краями, гипидиоморф-

ными кристаллами карбоната ромбической и столбчатой формы, а также выделениями серицита (?) (рис. 5, а). Также по трещинам диагностируются чёрные выделения марганцовистых минералов, которые хаотично рассеяны по всей породе.

Туфопесчаники сложены обломками щелочного полевого шпата и плагиоклаза, которые повсеместно замещаются слюдистым материалом и хлоритом. Плагиоклаз можно диагностировать исключительно по столбчатой вытянутой форме и редким сохранившимся двойникам. Обломки сцементированы карбонатной и глинистой массой. Довольно часто в туфопесчаниках наблюдаются более поздние тонкие прожилки кальцитового состава. По мере приближения к рудной зоне увеличивается степень трещиноватости и карбонатизации туфоалевролитов и туфопесчаников.

На контакте с рудной зоной залегают дайки сиенит-порфиров и долеритовых порфиров. Химический состав интрузивных образований указан в табл. 1.

Сиенит-порфиры имеют красновато-бурую окраску, состоят из крупных вкрапленников калиевого полевого шпата и плагиоклаза (рис. 4, б), сцементированных мелкозернистым агрегатом щелочного полевого шпата, плагиоклаза, кварца, карбоната и редких чешуйчатых выделений слюды. Форма вкрапленников – столбчатая, треугольная, округлая, трапецевидная, а размер может достигать 3 см. Зёрна полевых шпатов имеют следы вторичных изменений и подвержены процессам серицитизации и сосюритизации (рис. 5, б). Вкрапленники плагиоклаза диагностируются по характерной удлинённой форме и наличию полисинтетических двойников. На контакте с известковистыми туффитами сиенит-порфиры сильно раздроблены, аргиллизитизированы, в результате чего преобразованы в коричневатого-желтоватого цвета материал с многочисленными дендритами окислов марганца. Мощность дайки достигает 9 м.

Сиенит-порфиры контактируют с массивными долеритами (рис. 3). Окраска долеритов тёмно-серая, текстура массивная, а структура офитовая (диабазовая) и характеризуется хао-

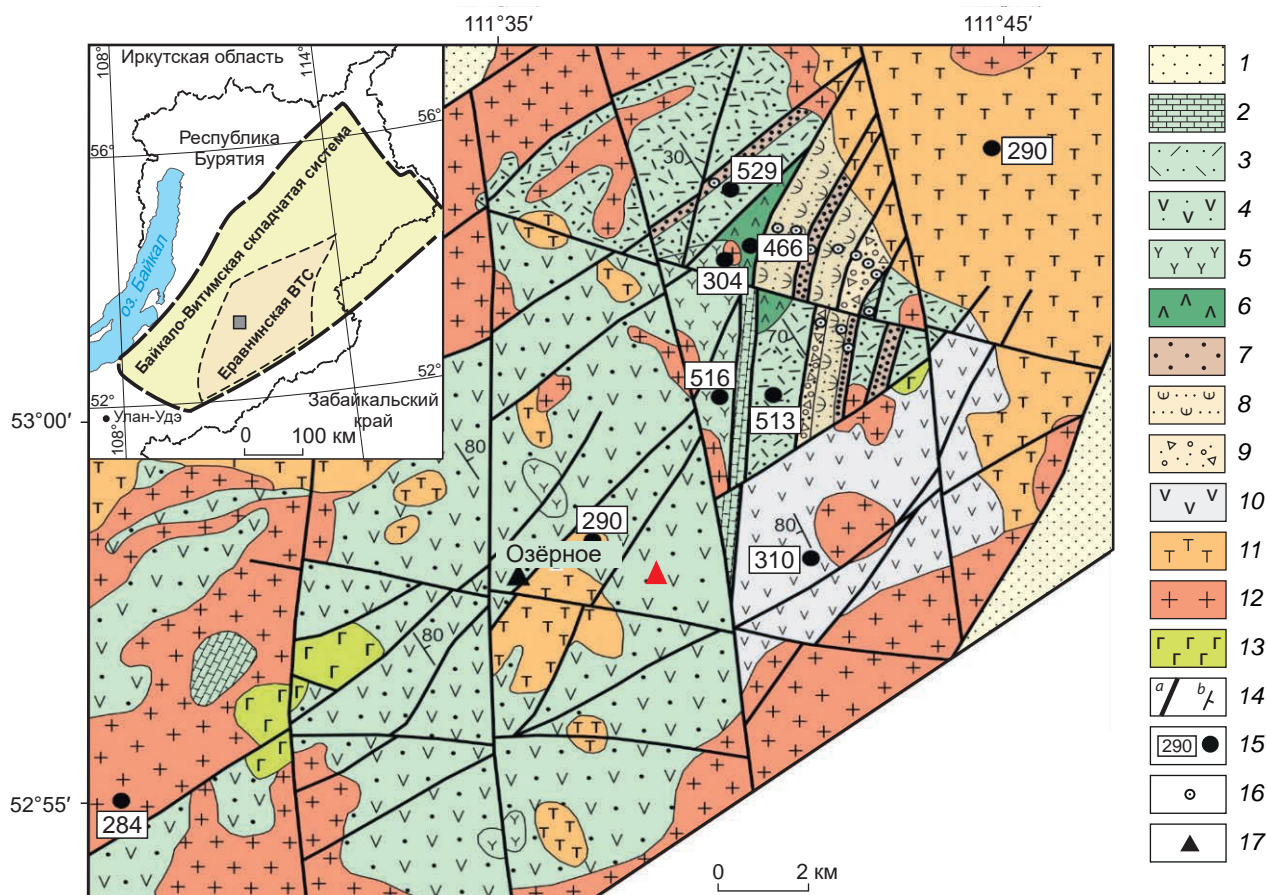


Рис. 2. Схема геологического строения Еравнинской вулкано-тектонической структуры (Озёрнинский рудный узел), по [5, 13, 14]:

1 – мезо-кайнозойские отложения впадин; 2–4 – островодужный комплекс – олдындинская свита (C_1-O_2ol): 2 – терригенно-карбонатная толща, 3 – риолитовая толща, 4 – андезит-дацитовая толща; 5 – олдындинский субвулканический комплекс (πC_1ol); 6 – андезитовая толща (O_2); 7–10 – комплекс верхнепалеозойских отложений: 7 – озёрнинская карбонатно-терригенная толща ($S_2?-D_3f$), 8 – кыджимитская терригенно-туфогенная толща (D_3fm-C_1t), 9 – ульзутуйская туфогенно-карбонатно-терригенная толща (C_1v-s), 10 – сурхобтинская андезитобазальтовая толща (C_{2-3}); 11–13 – магматические комплексы верхнего палеозоя: 11 – вулканогенный игнимбрит-риолитовый комплекс, 12 – граносиенитовый комплекс, 13 – габброидный комплекс; 14 – разрывные нарушения (a), элементы залегания слоистости (b); 15 – места отбора проб из магматических пород и их U-Pb и Ar-Ar изотопный возраст (млн лет); 16 – места находок фауны и флоры; 17 – местоположение опорной скважины № 32; красным треугольником указано расположение Южно-Магнетитового месторождения

Fig. 2. Schematic geological map of the Eravninskaya volcano-tectonic structure (Ozerninsky ore cluster), modified after [5, 13, 14]:

1 – Meso-Cenozoic sediments of depressions; 2–4 – island arc complex – Oldynda Formation (C_1-O_2ol): 2 – terrigenous-carbonate sequence, 3 – rhyolite sequence, 4 – andesite-dacite sequence; 5 – Oldynda subvolcanic complex (πC_1ol); 6 – andesite sequence (O_2); 7–10 – Upper Paleozoic sediment complex: 7 – Ozerninskaya carbonate-terrigenous sequence ($S_2?-D_3f$), 8 – Kicimitskaya terrigenous-tuffogenic sequence (D_3fm-C_1t), 9 – Ulzutui tuffogenic-carbonate-terrigenous sequence (C_1v-s), 10 – Surkhehta andesite-basalt sequence (C_{2-3}); 11–13 – Late Paleozoic magmatic complexes: 11 – igneous ignimbrite rhyolite complex, 12 – granosyenite complex, 13 – gabbroid complex; 14 – faults (a), bedding attitudes (b); 15 – U-Pb and Ar-Ar isotopic ages (million years) of igneous rocks and their sampling sites; 16 – sites of the fauna and flora finds; 17 – location of the reference well No. 32; the red triangle indicates location of the Yuzhno-Magnetitovoye deposit

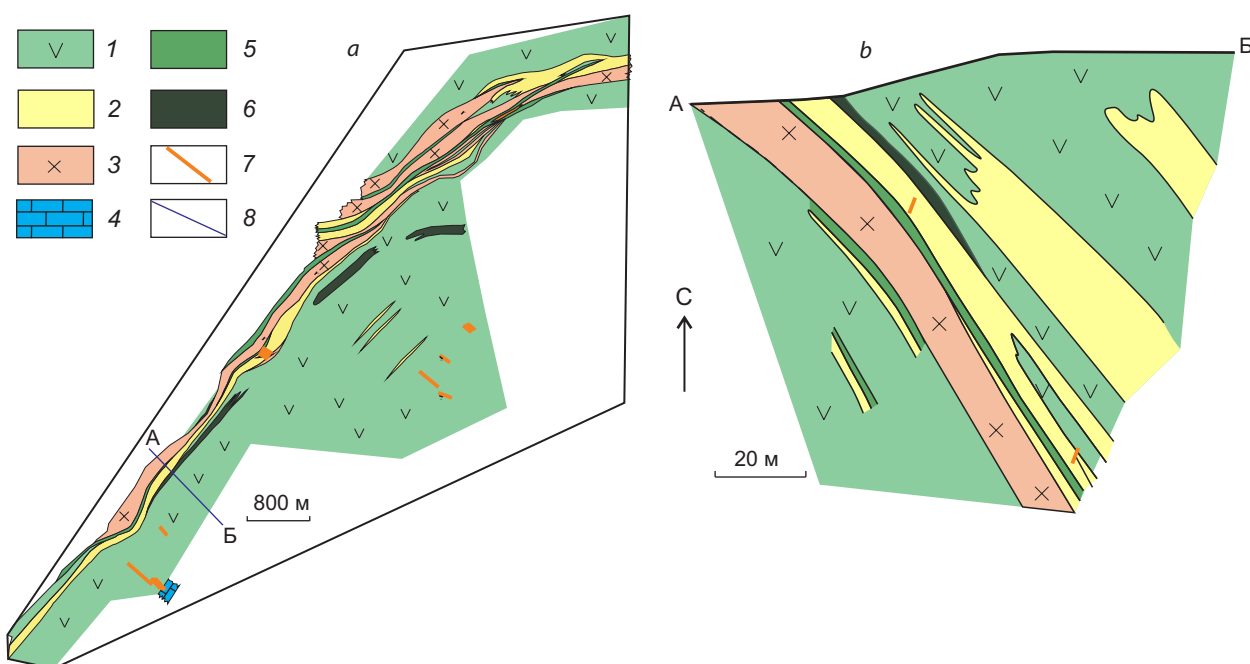


Рис. 3. Схема геологического строения участка «Южно-Магнетитовый» (*a* – план, *b* – разрез по линии А-Б), по неопубликованным материалам геологического отчёта (Полетаев и др., 2012; с дополнениями):

1 – вулканогенно-осадочный комплекс олдындинской свиты (туфы, туффиты); 2 – околорудные метасоматиты с зонами прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации; 3 – дайки сиенит-порфиоров; 4 – известняки; 5 – дайки долеритовых порфиритов; 6 – рудные тела пирит-гематит-магнетитового состава; 7 – кварц-сульфидные жилы; 8 – разрез по линии А-Б

Fig. 3. Schematic geological map of the Yuzhno-Magnetitovy site (*a* – plan, *b* – cross-section along line A-B), modified after Poletaev et al., 2012 (unpublished geological report):

1 – volcanosedimentary complex of the Oldynda Formation (tuffs, tuffites); 2 – wallrock metasomatites with zones of veinlet-disseminated sulfide mineralization; 3 – syenite porphyry dikes; 4 – limestones; 5 – dolerite porphyrite dikes; 6 – ore bodies of pyrite-hematite-magnetite composition; 7 – quartz-sulfide veins; 8 – cross-section along line A-B

тичным расположением столбчатых кристаллов плагиоклаза. В интерстициях наблюдаются зёрна клинопироксена. Чаще всего долериты подвержены гидротермально-метасоматическим изменениям, о чём свидетельствует присутствие карбоната в межзерновом пространстве и размытые очертания плагиоклаза (рис. 5, *c*). Также в долеритах диагностируются редкие вкрапленники и миндалины кварц-карбонатного состава с редкими сульфидами (рис. 4, *d*). Мощность дайки долеритов достигает 2,5 м. На выветрелой поверхности долериты приобретают жёлтую окраску с коричневым оттенком.

На юго-восточном контакте туфопесчаников и туфоалевролитов с дайковыми телами

наблюдаются зоны метасоматических изменений – пропилитов и аргиллизитов.

Пропилиты сложены зёрнами калиевого полевого шпата неправильной формы с неровными краями и многочисленными вторичными изменениями, которые проявлены в виде серицитизации и сосюритизации (рис. 5, *d*). Кристаллы плагиоклаза имеют размытые очертания с редкими реликтами полисинтетических двойников. Минерал интенсивно замещается выделениями хлорита столбчатой, пластинчатой, но чаще неправильной формы размером от 10 мкм до 100 мкм и чешуйками серицита. Кварц диагностируется в виде кристаллов с извилистыми очертаниями размером от 50 до 500 мкм. Карбонат (кальцит)

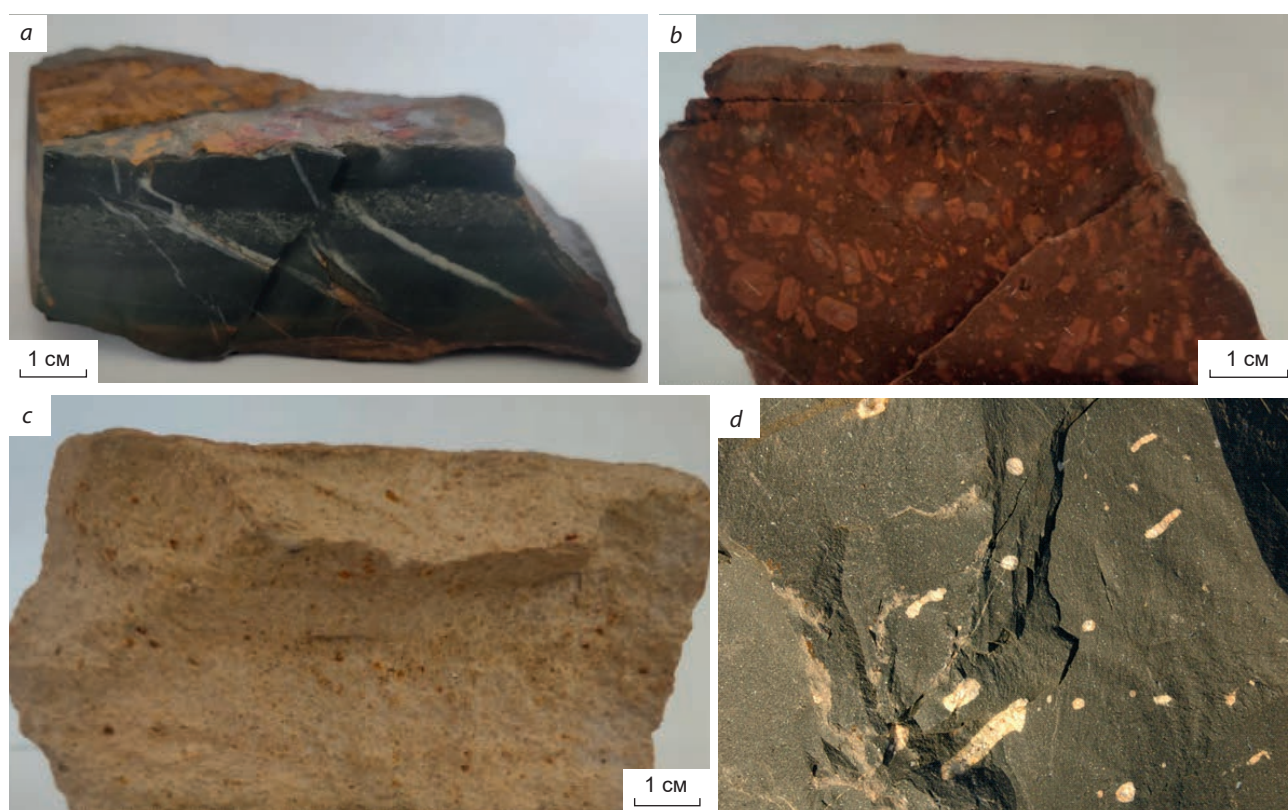


Рис. 4. Образцы вмещающих пород и околорудных метасоматитов Южно-Магнетитового месторождения:
a – полосчатый серовато-зелёный туфоалевролит олдындинской свиты; *b* – дайка сиенит-порфира с крупными вкрапленниками; *c* – плотный аргиллизит бежевой окраски; *d* – дайка долерита с крупными кварц-карбонатными миндалинами

Fig. 4. Samples of host rocks and wallrock metasomatites of the Yuzhno-Magnetitovoye deposit:

a – banded grayish-green tuffaceous siltstone of the Oldynda Formation; *b* – syenite-porphry dike with large phenocrysts; *c* – dense argillizite of beige color; *d* – dolerite dike with large quartz-carbonate amygdalae

представлен выделениями ромбической формы размером до 350 мкм. Эпидот находится в ассоциации с кальцитом и диагностируется в виде округлых вытянутых и иногда угловатых зёрен размером до 30 мкм в поперечном сечении. Наблюдаются кристаллы рудных минералов игольчатой (предположительно гематит) и неправильной формы.

Аргиллизиты светло-бежевого цвета, плотные и чаще всего со слоистой текстурой (рис. 4, *c*), в своём составе содержат гранулированные зёрна кварца с зубчатыми границами, реликты полевых шпатов, которые подвержены интенсивным вторичным изменениям. Все обломки сцементированы глинистым материалом светло-коричневого цвета. Также наблюдаются

редкие выделения сульфидных минералов кубической, столбчатой, округлой формы и гидроокислы железа. Метасоматиты отнесены к аргиллизитам на основе макроскопического и микроскопического изучения пород.

Рудовмещающая зона дробления содержит обломки всех встречающихся на месторождении пород и кварца, которые сцементированы глинисто-песчаным цементом. Размерность обломков изменяется от дресвы до щебня. Обломки пород подвержены гидротермальным изменениям – окварцеванию, пропилитизации и аргиллизации. На отдельных участках диагностируются реликты кварцевых жил, выделяющиеся по повышенному содержанию обломков кварца с пиритом, гема-

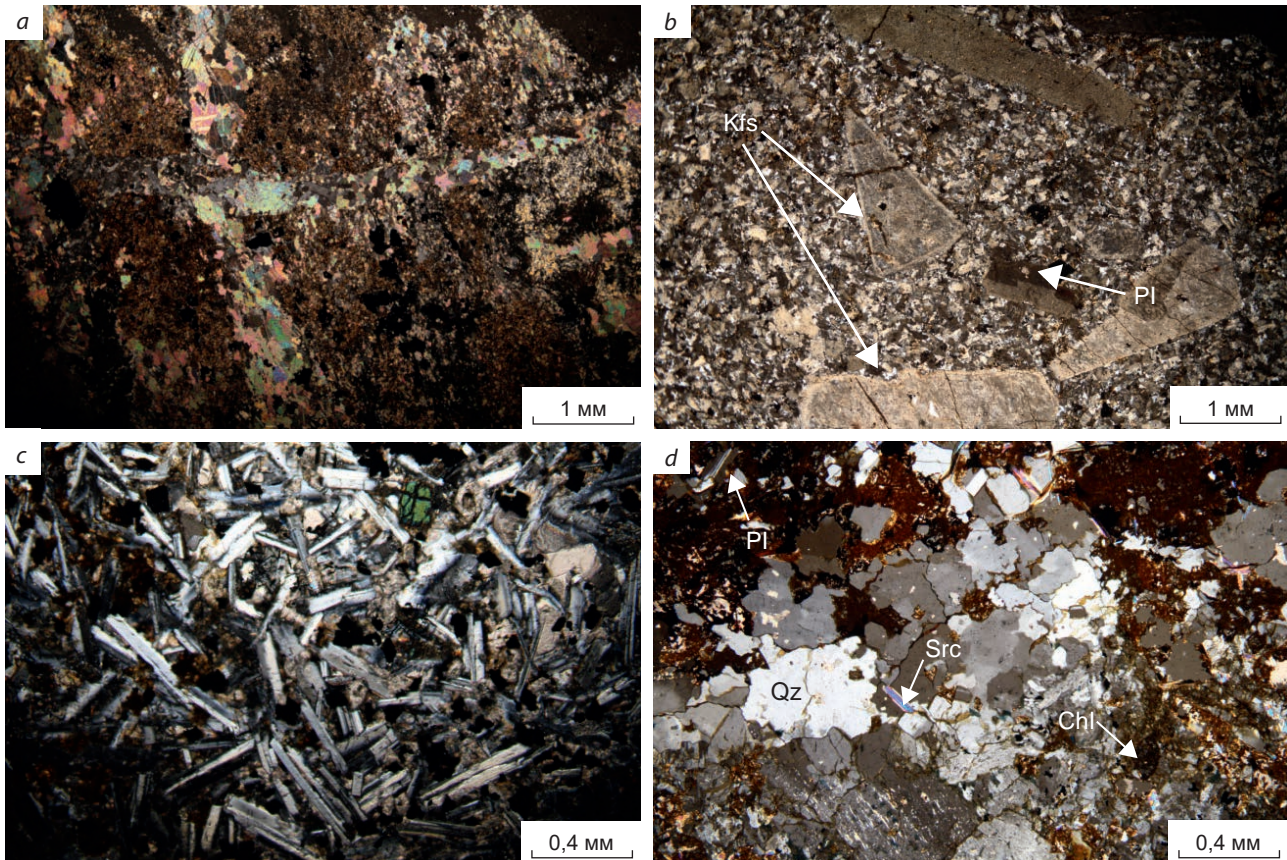


Рис. 5. Фотографии шлифов вмещающих пород и околорудных метасоматитов:

a – кварц-карбонатный прожилок в туфоалевролите; *b* – гидротермально изменённый сиенит-порфир с вкрапленниками щелочного полевого шпата и плагиоклаза; *c* – дайка долерита; *d* – образец типичного пропилита кварц-серицит-хлорит-плагиоклаз-КПШ состава

Fig. 5. Photographs of thin sections of the host rocks and wallrock metasomatites:

a – quartz-carbonate veinlet in tuffaceous siltstone; *b* – hydrothermally altered syenite porphyry with alkali feldspar and plagioclase phenocrysts; *c* – dike of dolerite; *d* – sample of typical propylite of quartz-sericite-chlorite-plagioclase-potassium feldspar composition

титом и гидроокислами железа. Максимальная мощность рудной зоны составляет 10,6 м.

Контакт рудной зоны с вмещающими породами достаточно чёткий и маркируется цветом. Непосредственно на контакте с дайками сиенит-порфиров наблюдается осветление и рассланцевание пород.

Нужно отметить, что скарны, а также характерные для них минералы (гранат, пироксен, амфибол и т. д.) на дневной поверхности в рудном поле Южно-Магнетитового месторождения в процессе экспедиционных работ не наблюдались. Однако, согласно геологическому отчёту Селенгинской экспедиции за

1990 год, на более глубоких горизонтах участка установлены маломощные (не более 15 м) линзопластообразные залежи скарнов, которые развиваются вдоль пластов известняков. Минеральный состав скарнов: эпидот, пироксен, волластонит, везувиан, гранат. Скарны сопровождаются вкрапленностью и гнездами пирита, гематита и магнетита.

К минерализованной зоне дробления прилежит тело сливных гематит-магнетитовых руд. Руды имеют серовато-чёрный цвет с вишневым оттенком на поверхности и пронизаны тонкими прожилками карбонатного состава.

Табл. 1. Химический состав интрузивных образований

Table 1. Chemical composition of intrusive formations

	Сиенит-порфир (n = 1)	Долеритовые порфириды (n = 1)
SiO ₂	67,50	45,30
TiO ₂	0,63	0,68
Al ₂ O ₃	15,40	16,70
Fe ₂ O ₃	2,74	3,59
FeO	0,42	5,48
MnO	0,11	0,51
MgO	0,27	3,41
CaO	1,18	8,06
Na ₂ O	5,04	2,08
K ₂ O	4,43	2,91
P ₂ O	0,17	<0,10
CO ₂	1,32	6,82
S	<0,10	<0,10
F	0,03	0,05
Fe ₂ O ₃ (общ.)	3,01	9,67
Σ	99,26	99,63

Примечание. Содержание петрогенных оксидов определено методом силикатного анализа в Центре коллективного пользования «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН.

Наиболее мощная кварцевая жила с пирит-халькопиритовой минерализацией установлена на контакте вулканогенно-осадочных пород с дайками. Средняя мощность этой жилы составляет около 3 м. Кроме того, в пределах участка присутствуют пологопадающие, субсогласно залегающие со вмещающими породами кварцевые жилы северо-восточного простирания.

Минеральный состав руд

Южно-Магнетитового месторождения

В пределах месторождения были установлены несколько разновидностей рудных образований:

1. Гематит-магнетитовые руды (рис. 6).
2. Зоны метасоматических изменений с жильно-прожилковой сульфидно-кварцевой минерализацией.
3. Кварцевые жилы с сульфидной минерализацией.



Рис. 6. Зона контакта долеритовых порфиритов с гематит-магнетитовым рудным телом

Fig. 6. Contact zone of dolerite porphyrites with a hematite-magnetite orebody

Гематит-магнетитовые руды слагают небольшие по протяжённости (первые сотни метров) и маломощные (до 4 м) линзообразные тела сплошных и вкрапленных руд с серовато-чёрной окраской, развитые преимущественно в приконтактных частях даек долеритов. На поверхности за счёт окисления руды приобретают вишнёвый цвет (рис. 6). Простирание рудных тел – северо-восточное, а падение – юго-восточное. Структура тонкозернистая с характерной массивной, полосчатой и вкрапленной текстурой (рис. 7, а). По трещинам рудных тел отмечается ржаво-бурая окраска окисления. Гематит-магнетитовые руды по трещинам замещаются маломощными кварцевыми и кварц-карбонатными прожилками.

Главными минералами гематит-магнетитовых руд являются магнетит, гематит, пирит. Среди редких и второстепенных минералов можно отметить барит (рис. 8).

Магнетит образует практически сплошной рудный агрегат (рис. 8, а, с), который сложен зёрнами округлой, линзовидной, столбчатой, каплевидной, треугольной и неправильной формы размером от первых мкм до 70 мкм в поперечном сечении. По краям и трещинам минерал замещается прожилковидными и каёмчатыми выделениями гематита (рис. 8, а). Поверхность минерала неровная, сильно пористая, с многочисленными микро-

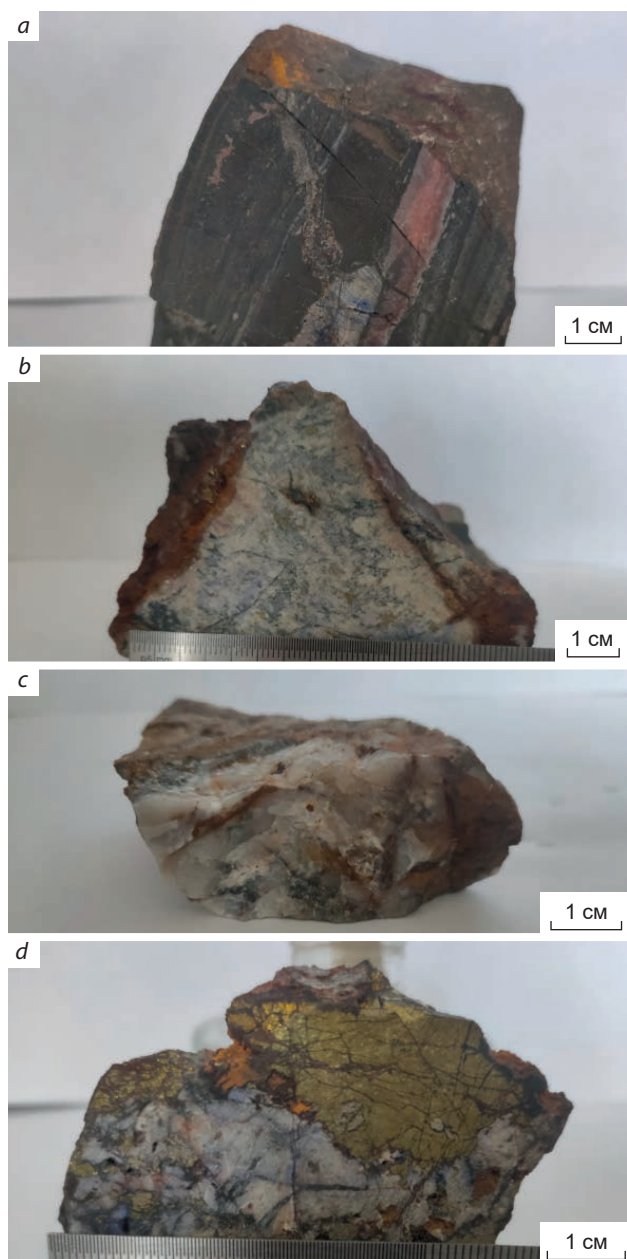


Рис. 7. Типы руд Южно-Магнетитового месторождения: *a* – образец полосчатой руды из гематит-магнетитового рудного тела; *b* – прожилково-вкрапленная сульфидно-кварцевая руда; *c* – кварц с редкой сульфидной минерализацией; *d* – золото-сульфидно-карбонат-кварцевая руда

Fig. 7. Types of ores of the Yuzhno-Magnetitovoye deposit: *a* – sample of banded ore from a hematite-magnetite orebody; *b* – veinlet-disseminated sulfide-quartz ore; *c* – quartz with rare sulfide mineralization; *d* – gold-sulfide-carbonate-quartz ore

дефектами, в которых диагностируются редкие выделения барита.

В качестве типоморфных особенностей, которые позволяют судить об условиях образования магнетитов, рассматриваются содержания элементов-примесей магнетита по результатам LA-ICP-MS анализа. В ходе работы было проанализировано восемь зёрен магнетита. Результаты исследований отражены на дискриминационных диаграммах [23, 26]. На диаграмме взаимоотношений суммы $Ca + Al + Mn$ к сумме $Ti + V$ (рис. 9, *a*) видно, что точки магнетитов попадают в одно компактное поле, значения которого характерны для месторождений скарнового генезиса. В поле скарновых месторождений точки составов магнетитов попадают и на другой диаграмме (рис. 9, *b*), в основе которой лежит взаимоотношение сумм $Al + Mn$ и $Ti + V$.

Ещё одним важнейшим генетическим индикатором для магнетита является его Co/Ni отношение (табл. 2) [22].

Так, для магнетитов скарновой природы характерны значения $Co/Ni > 1$, тогда как большинство магматических и метаморфогенных магнетитов отличаются преобладанием Ni в составе. Значения отношения Co/Ni в магнетитах Южно-Магнетитового месторождения варьируют в пределах 5–13, что подтверждает возможность образования магнетита в связи с процессами скарнирования.

Гематит отмечается в виде выделений игольчатой, столбчатой, округлой, линзовидной и неправильной формы размером от 5 мкм до 90 мкм. Кроме того, гематит образует прожилковидные и каёмчатые выделения, которые по краям и трещинам замещают зёрна магнетита (рис. 8, *a*).

Пирит первой генерации (пирит-1) отмечается в виде зёрен пентагондодекаэдрической формы со сглаженными краями. В краевых частях и по трещинам замещается каёмчатыми и прожилковидными выделениями гидроокислов железа (рис. 8, *b*).

Барит образует в магнетите округлые включения размером не более 10 мкм. Кроме того, диагностируются выделения неправильной формы с извилистыми очертаниями в кварце

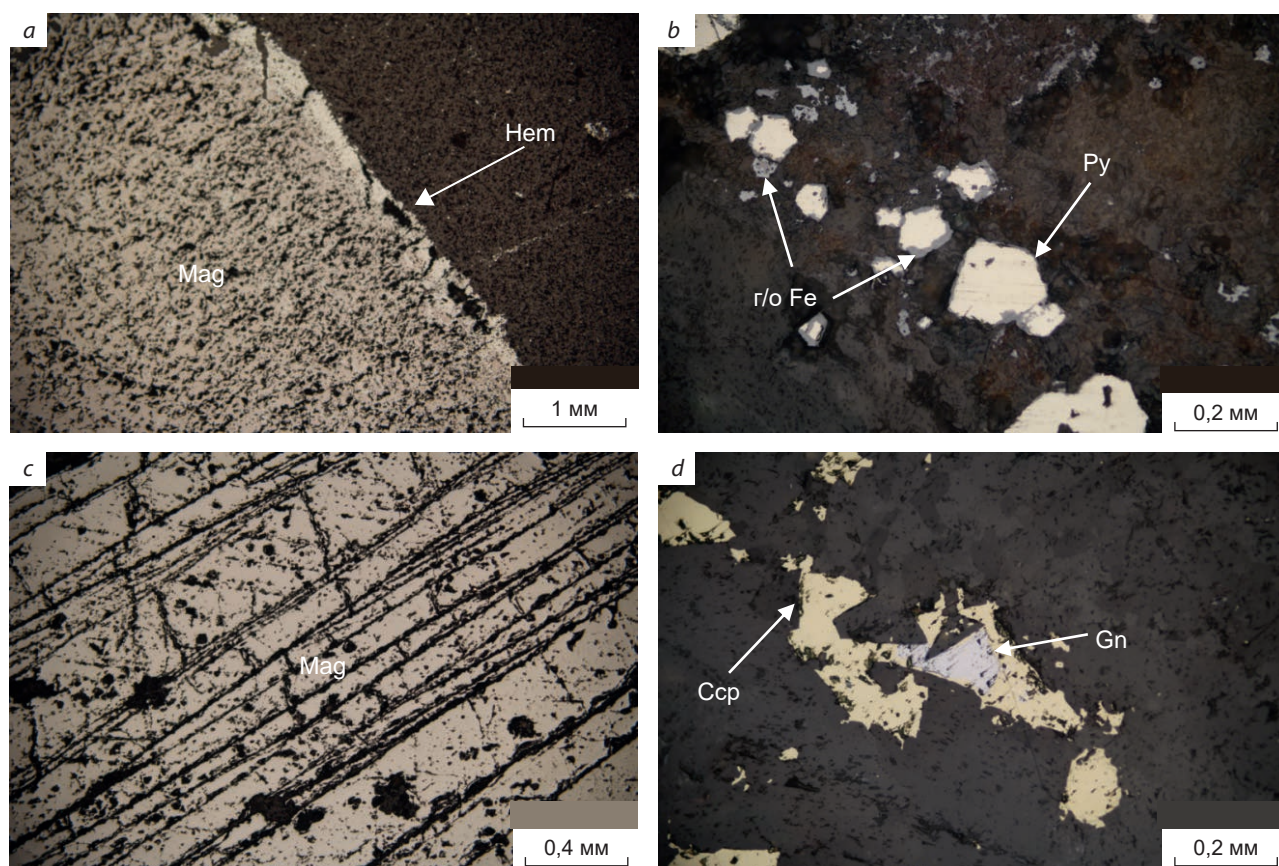


Рис. 8. Минеральный состав руд Южно-Магнетитового месторождения:

a – сплошной магнетитовый агрегат (Mag) интенсивно замещается выделениями гематита (Hem); *b* – по краям зёрен пирита (Py) первой генерации развиваются каёмчатые выделения гематита; *c* – сплошной магнетитовый агрегат; *d* – включения галенита (Gn) в халькопирите (Ccp)

Fig. 8. Mineral composition of ores of the Yuzhno-Magnetitovoye deposit:

a – a continuous magnetite aggregate (Mag) is intensively replaced by hematite (Hem) segregations; *b* – bordered hematite segregations develop along the edges of first-generation pyrite (Py) grains; *c* – a continuous magnetite aggregate; *d* – galena (Gn) inclusions in chalcopyrite (Ccp)

размером до 35 мкм по длинной оси. В редких случаях встречаются столбчатые выделения барита длиной до 150–180 мкм при максимальной мощности около 30 мкм, которые находятся в тесной минеральной ассоциации с гидроокислами железа.

Среди нерудных минералов наблюдаются кварц, карбонат, а также акцессорные минералы – апатит и монацит.

Кварц первой генерации (кварц-1) и *карбонат первой генерации* (карбонат-1; предположительно кальцит) слагают кристаллы неправильной и угловатой формы, которые заполняют пространство между зёрнами магнетита.

Монацит образует единичные включения круглой формы размером около 10–15 мкм. Минерал приурочен к игольчатым агрегатам гематита.

Апатит представлен зёрнами неправильной формы с неровной и трещиноватой поверхностью, которые замещаются столбчатыми выделениями мусковита. Находится в тесной ассоциации с магнетитом. Размер минерала достигает 200 мкм по длинной оси.

Главными рудными минералами **зон метасоматических изменений с прожилково-вкрапленной сульфидно-кварцевой минерализацией** являются пирит-2 и халькопирит. Ко

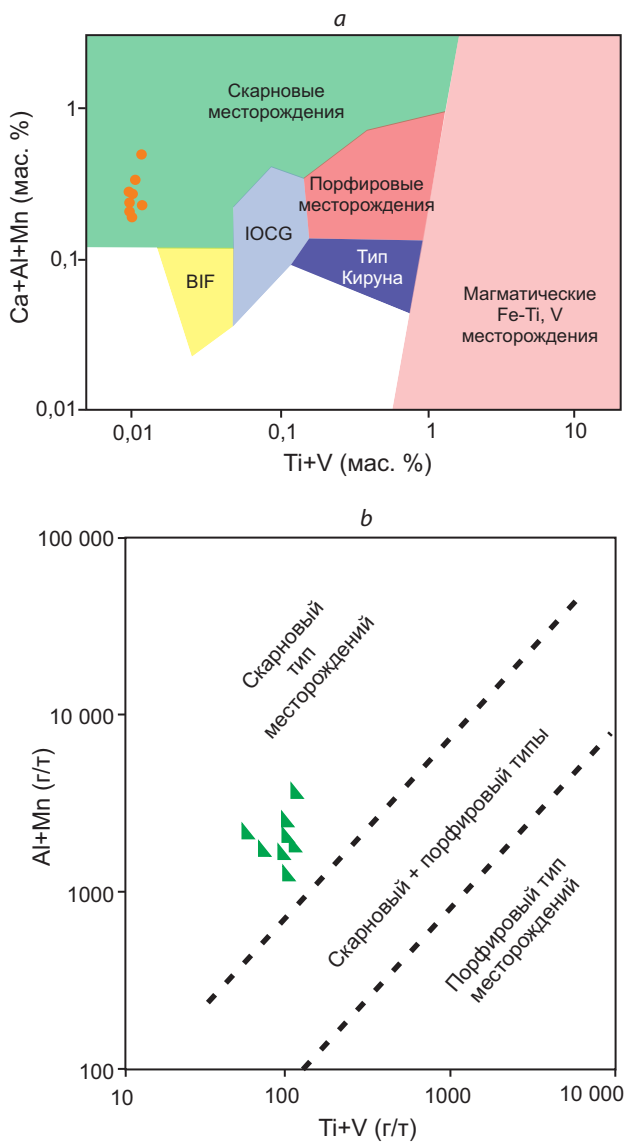


Рис. 9. Дискриминационные диаграммы условий образования магнетита первой генерации (магнетит-1) (на основе LA-ICP-MS анализа):

a: BIF – месторождения полосчатых железных руд; IOCG – окисленные железо-медно-золотые месторождения, Kiruna – тип апатит-магнетитовых месторождений [23]; *b* – диаграмма элементно-примесных отношений для скарных и порфировых систем [26]

Fig. 9. Discrimination diagrams of formation conditions of the first-generation magnetite (magnetite-1) (based on LA-ICP-MS analysis):

a: BIF – Banded Iron Formation ore deposits; IOCG – iron oxide-copper-gold deposits, Kiruna – the apatite-magnetite deposit type [23]; *b* – diagram of the impurity elements ratios for skarn and porphyry systems [26]

Табл. 2. Элементно-примесный состав магнетита по результатам LA-ICP-MS анализа

Table 2. Impurity-elements composition of magnetite, based on the LA-ICP-MS analysis results

Значение	Ca, ppm	Al, ppm	Mn, ppm	Ti, ppm
Мин.	794,69	1554,16	137,96	32,48
Макс.	1704,45	5445,58	524,98	92,26
Сред.	1263,04	3338,55	385,01	64,27
Значение	V, ppm	Co, ppm	Ni, ppm	Co/Ni
Мин.	45,94	42,46	3,05	5,31
Макс.	62,30	49,39	9,29	13,88
Сред.	54,43	45,13	6,45	7,70

второстепенным минералам относятся арсенопирит, глаукоdot и аллоклазит (рис 10).

Пирит второй генерации (пирит-2) представлен гипидиоморфными зёрнами округлой, кубической, треугольной, угловатой, округлой, столбчатой, гексагональной, но чаще всего неправильной формы со сглаженными краями, которые кристаллизовались в пентагондодэкаэдрической сингонии. Размер кристаллов в среднем варьирует от 5 мкм до 70 мкм по длинной оси, хотя встречаются и более крупные выделения размером до 650 мкм. По трещинам и краям минерал замещается ксеноморфными выделениями халькопирита и гидроокислами железа.

Халькопирит наблюдается в виде выделений неправильной формы с зубчатыми краями, которые приурочены к краевым частям зёрен магнетита и пирита-2. Поверхность минерала неровная, с многочисленными бороздами и микротрещинами, по которым отлагаются гидроокислы железа.

Арсенопирит встречается в виде кристаллов с призматической формой, которые приурочены к сидериту. Размер зёрен не более 20–25 мкм.

Аллоклазит $(\text{Co,Fe})_{1,02}\text{As}_{0,93}\text{S}_{1,05}$ отмечается в виде единичных выделений неправильной формы с извилистыми очертаниями, которые находятся в ассоциации с гематитом (рис. 11,



b). Размер выделений не превышает 5 мкм в поперечном сечении.

Глаукодом $(\text{Co,Fe})_{0,94}\text{As}_{0,8}\text{S}_{1,25}$ встречается в единичных случаях, образуя каёмчатые выделения, которые опоясывают краевые части зёрен пирита второй генерации (рис. 11, c).

Нерудные минералы. *Эпидот* образует редкие выделения округлой, неправильной или вытянутой формы со сглаженными краями, размером около 30 мкм по длинной оси. Находится в тесной ассоциации с серицитом (мусковит) и карбонатом (кальцит).

Мусковит представлен агрегатами чешуйчатой, пластинчатой, вытянутой, округлой, нитевидной и неправильной формы. Длина выделений может достигать 300 мкм при минимальной мощности около 5 мкм. Встречается совместно с карбонатом (кальцитом), эпидотом и кварцем-1.

Кварцевые жилы и прожилки с сульфидной минерализацией диагностируются во всех вмещающих комплексах на месторождении, а также занимают секущее положение в гематит-магнетитовых рудных телах. Мощность кварцевых жил и прожилков варьирует от нескольких см до более 3 м.

К числу главных рудных минералов в кварц-сульфидных кварцевых жилах относятся пирит (пирит-3) и халькопирит. Второстепенные минералы – барит, борнит, галенит и сфалерит. Редкие минералы – пирротин, гессит, тетрадимит, самородный теллур, штюцит, айкинит, висмутин, эмпрессит, шапбахит, лёллинит, лузонит, теннантит, виттихенит, а также ряд Ag-Bi-Te минеральных форм, размер которых не позволяет определить точное название минерала. Среди вторичных минералов отмечаются куприт, ковеллин, самородная медь, идаит и различные гидроокислы Fe и Cu.

Пирит-3 развит в составе кварцевых жил и прожилков, слагает зёрна гипидиоморфной, округлой и неправильной формы, иногда с изъеденными краями.

Халькопирит образует ксеноморфные выделения угловатой, каплевидной, округлой, но чаще всего неправильной формы (рис. 8, d) с извилистыми краями, размером от 15 мкм до нескольких мм. По краям и трещинам за-

мещается прожилковидными и каёмчатыми выделениями куприта, гидроокислов железа и самородной меди. В микродефектах и трещинах на поверхности минерала отлагаются выделения барита и включения самородного теллура, гессита, эмпрессита, а также ряд минеральных форм Au-Bi-Ag-Te состава, которым по результатам электронной микроскопии не удалось дать название. Также халькопирит наблюдается в виде эмульсионных вкрапленников в сфалерите (структура распада) и образует столбчатые выделения (продукт распада твёрдого раствора) в борните (рис. 10, c). Краевые части халькопирита довольно часто обрастают агрегатами ковеллина.

Барит представлен редкими зёрнами округлой, каплевидной, линзовидной, ромбической и неправильной формы с извилистыми краями размером от 5 мкм до 50 мкм в поперечном сечении, которые концентрируются по краям и трещинам в кварце, доломите, халькопирите и борните (рис. 10, b). Кроме того, по трещинам в халькопирите наблюдаются нитевидные выделения барита длиной до 130 мкм при мощности не более 5 мкм (рис. 10, a).

Борнит сложен выделениями округлой и неправильной формы размером от 15 до 60 мкм. Данный минерал совместно с халькопиритом образует решётчатые структуры распада (рис. 10, c). В трещинах минерала диагностируются единичные округлые включения барита и самородного теллура. В единичных случаях агрегаты борнит-халькопиритового состава замещаются выделениями виттихенита (рис. 13, d).

Галенит образует редкие включения округлой, линзовидной, овалообразной и угловатой формы в халькопирите и пирите (рис. 8, d; рис. 10, d). Размер включений не превышает 15 мкм.

Сфалерит представлен редкими зёрнами округлой формы размером от 5 мкм до 20 мкм, которые отлагаются в халькопирите (рис. 10, d), кварце, доломите и пирите второй генерации. В минерале отмечается эмульсионная вкрапленность халькопирита (структура распада).

Самородный теллур образует небольшие выделения округлой, грибообразной и каплевидной формы в халькопирите (рис. 12, c). Раз-

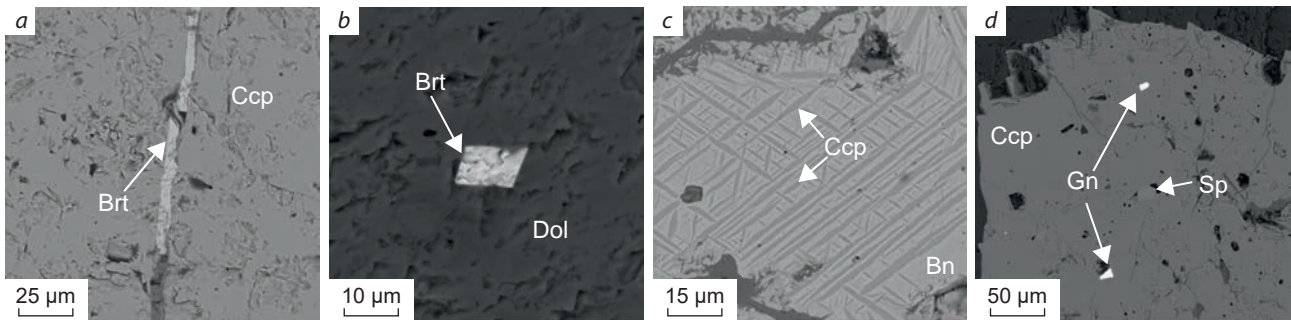


Рис. 10. Минеральный состав руд Южно-Магнетитового месторождения:

a – прожилковидное выделение барита (Brt) по трещине халькопирита (Ccp); *b* – включение барита в доломите (Dol); *c* – пластинчатые и решетчатые структуры распада твёрдого раствора халькопирит – борнит (Bn); *d* – включения галенита (Gn) и сфалерита (Sp) в халькопирите

Fig. 10. Mineral composition of ores of the Yuzhno-Magnetitovoye deposit:

a – stringer-like barite (Brt) segregation along a fracture in chalcopyrite (Ccp); *b* – barite inclusion in dolomite (Dol); *c* – lamellar and lattice structures of decomposition of the chalcopyrite – bornite (Bn) solid solution; *d* – galena (Gn) and sphalerite (Sp) inclusions in chalcopyrite

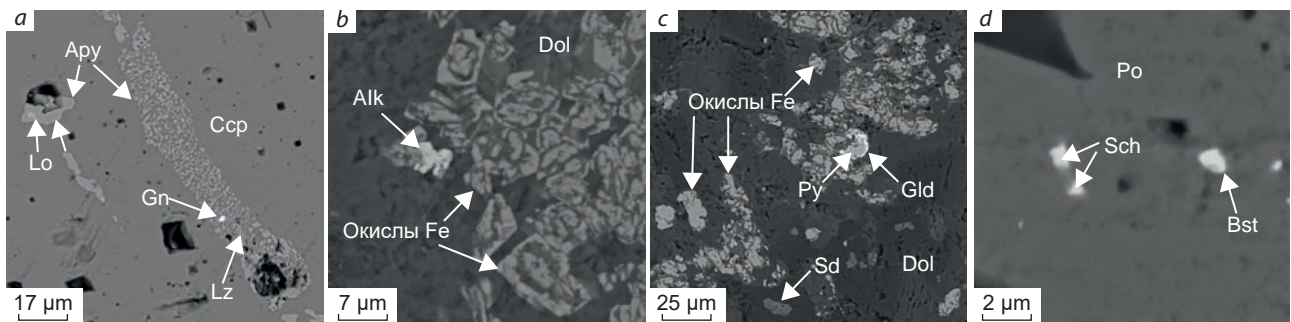


Рис. 11. Минеральный состав руд Южно-Магнетитового месторождения:

a – скелетное зерно арсенопирита (Apy), который замещается халькопиритом (Ccp), лёллингитом (Lo) и лузонитом (Lz); *b* – аллоклазит (Alk) в ассоциации с гематитом; *c* – зерно пирита (Py), обрастаемое оторочкой глаукодота (Gld); *d* – включения шапбахита (Sch) и висмутинита (Bst) в пирротине (Po)

Fig. 11. Mineral composition of ores of the Yuzhno-Magnetitovoye deposit:

a – skeletal grain of arsenopyrite (Apy) partially replaced by chalcopyrite (Ccp), loellingite (Lo), and luzonite (Lz); *b* – alloclasite (Alk) in association with hematite; *c* – pyrite grain (Py) overgrown with a rim of glaucodot (Gld); *d* – inclusions of shapbachite (Sch) and bismuthinite (Bst) in pyrrhotite (Po)

мер зёрен варьирует от 3 мкм до 7 мкм в поперечном сечении.

Штютцит (Ag_7Te_4) отмечается в виде единичных зёрен округлой формы, которые отлагаются в сидерите. Размер минерала не превышает первые мкм (рис. 12, *c*).

Айкинит ($\text{Pb}_{0,95}\text{Cu}_{1,32}\text{Bi}_{0,05}\text{S}_{3,67}$) представлен выделениями неправильной формы с извилистыми очертаниями, размером до 5 мкм, которые концентрируются в трещинах пирита второй генерации и в халькопирите (рис. 12, *d*).

Висмутин (Bi_2S_3) и *шапбахит* ($\text{Ag}_{0,5}\text{Pb}_0\text{Bi}_{0,2}\text{S}_{1,26}$) наблюдаются в виде единичных округлых включений размером не более нескольких мкм, которые отлагаются в пирротине и пирите (рис. 11, *d*; рис. 13, *b*).

Эмпрессит ($\text{Ag}_{1,1}\text{Te}_{0,88}$) образует зёрна неправильной формы со сглаженными углами, которые концентрируются по трещинам в пирите (рис. 13, *a*). Размер минерала около 5 мкм.

Лёллингит ($\text{Fe}_{1,16}\text{As}_{1,84}$), *лузонит* ($\text{Cu}_{2,75}\text{As}_{1,2}\text{S}_{4,04}$) представлены единичными выделения-

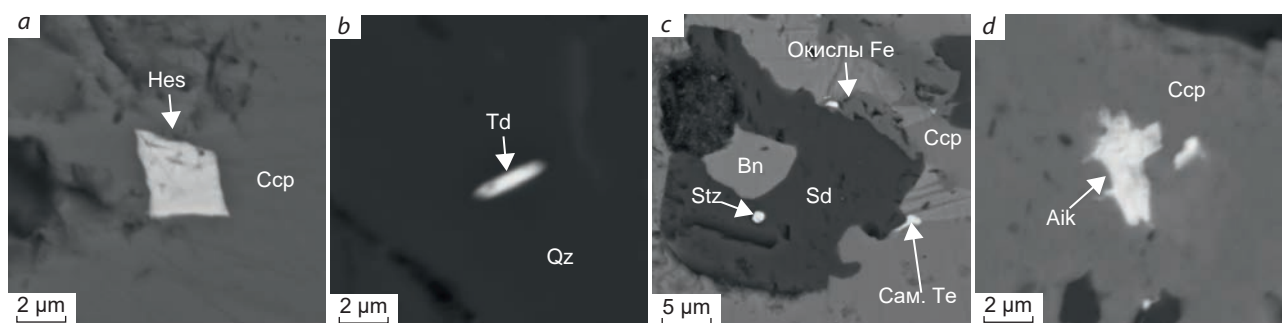


Рис. 12. Минеральный состав руд Южно-Магнетитового месторождения:

a – включение гессита (Hes) в халькопирите (Ccp); *b* – включение тетрадимита (Td) в кварце (Qz); *c* – округлое включение штютцита (Stz) в сидерите (Sd), выделение самородного Te в халькопирите; *d* – выделение айкинита (Aik) неправильной формы в халькопирите

Fig. 12. Mineral composition of ores of the Yuzhno-Magnetitovoye deposit:

a – hessite (Hes) inclusion in chalcopyrite (Ccp); *b* – tetradymite (Td) inclusion in quartz (Qz); *c* – rounded stützite (Stz) inclusion in siderite (Sd), native Te segregation in chalcopyrite; *d* – irregularly shaped aikinite (Aik) segregation in chalcopyrite

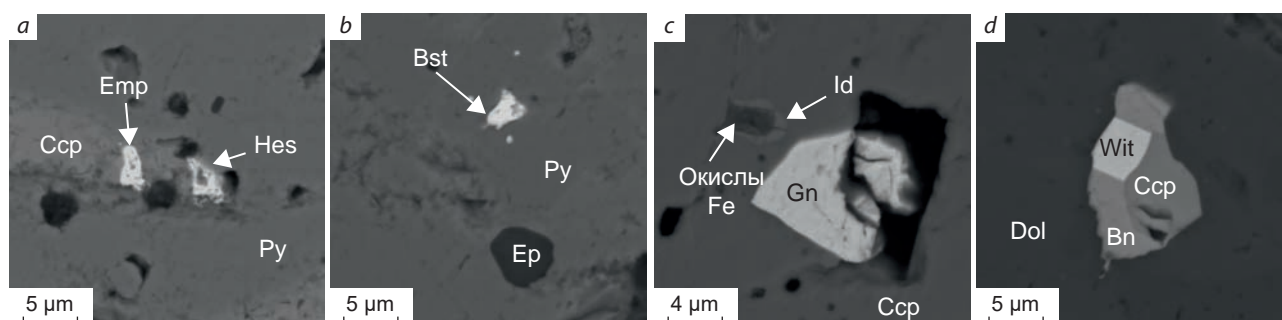


Рис. 13. Минеральный состав руд Южно-Магнетитового месторождения:

a – включения эмпрессита (Emp) и гессита (Hes) в халькопиритовом (Ccp) прожилке, который развивается по трещине в пирите (Py); *b* – выделение висмутинита (Bst) и эпидота (Ep) в пирите; *c* – оторочка идаита (Id), развивающаяся по краям гидроокислов железа; *d* – единый минеральный сросток халькопирита, борнита (Bn) и виттихенита (Wit) в доломите (Dol)

Fig. 13. Mineral composition of ores of the Yuzhno-Magnetitovoye deposit:

a – empressite (Emp) and hessite (Hes) inclusions in a chalcopyrite (Ccp) stringer along a fracture in pyrite (Py); *b* – bismuthinite (Bst) and epidote segregation in pyrite; *c* – idaite (Id) rim along the edges of iron hydroxide (Окислы Fe) segregations; *d* – mineral intergrowth of chalcopyrite, bornite (Bn) and wittichenite (Wit) in dolomite (Dol)

ми неправильной формы, которые приурочены к арсенипириту (рис. 11, а).

Виттихенит ($\text{Cu}_{2,98}\text{Bi}_{0,98}\text{S}_{3,04}$) не образует самостоятельных зёрен и выделений. Наблюдается лишь в составе единых минеральных сростков совместно с халькопиритом и борнитом (рис. 13, d). Размер минеральных агрегатов составляет 15–17 мкм.

Гипергенные минералы. *Куприт* образует выделения округлой, линзовидной и непра-

вильной формы с неровными очертаниями, размер выделений может достигать 100 мкм по длинной оси. Минерал приурочен к трещинам выделений халькопирита.

Ковеллин наблюдается в виде оторочек и выделений округлой и неправильной формы, которые замещают халькопирит, концентрируясь по краям и трещинам минерала. Размер выделений варьирует от 10 мкм до 50 мкм. Также ковеллин в нерудной массе образует

самостоятельные зёрна неправильной формы размером до 30 мкм. В единичных случаях диагностируются сростки ковеллина и самородного золота.

Самородная медь отмечается в редких случаях, образуя выделения неправильной формы с рваными краями размером до 7 мкм. Находится в тесной ассоциации с гидроокислами железа.

Гидроокислы железа представлены выделениями нитевидной, прожилковидной, каёмчатой и неправильной формы, которые интенсивно замещают зёрна пирита и выделения халькопирита, отлагаясь по краям и трещинам минералов (рис. 11, с; рис. 12, с; рис. 13, б, с). Ассоциируют с другими вторичными минералами.

Идаит ($\text{Cu}_{5,4}\text{Fe}_{0,91}\text{S}_{5,64}$) отмечается в виде угловатых включений в халькопирите (рис. 13, с). Размер зёрен достигает 15 мкм. Согласно П. Рамдору [17], идаит всегда является продуктом разложения борнита и является первым признаком окисления.

Жильные минералы. *Кварц* в золото-сульфидно-кварц-карбонатных прожилках представлен несколькими генерациями. Кварц второй генерации (кварц-2) образует относительно крупные кристаллы размером до нескольких мм. Судя по всему, зёрна кварца-2 в результате катаклаза подверглись дроблению, что привело к деформации кристаллической структуры минерала и появлению неоднородного волнистого погасания. Кварц третьей генерации (кварц-3) отлагается в краевых перекристаллизованных областях кварца-2, образуя тонкозернистые мозаичные агрегаты (рис. 14).

Карбонат (сидерит, доломит, кальцит) так же, как и кварц, диагностируется в двух генерациях. Карбонат второй генерации (карбонат-2) наблюдается в виде разноразмерных зёрен с неровными и извилистыми, иногда угловатыми краями. Карбонат третьей генерации (карбонат-3) отмечается в виде перекристаллизованных прожилковидных агрегатов, которые концентрируются по зонам дробления в кварце-2 и карбонате-2. Кроме того, мелко- и тонкозернистые зёрна карбоната-3

концентрируются в краевых частях зёрен кварца-2 и карбоната-2. Иногда карбонат-3 наблюдается в составе тонкоперетёртого материала, который отлагается в межзерновом пространстве кварца-2 и карбоната-2.

Химический состав рудных минералов представлен в таблице 3.

Минералы золота. Самородное золото на Южно-Магнетитовом месторождении по морфологии относится к неправильному (подчинённые формы заполняемых золотом полостей) морфологическому типу [15]. Размер выделений варьирует от первых мкм до 20 мкм по длинной оси. Каплевидные, вытянутые, лепёшковидные, амёбообразные и другие формы свидетельствуют о метасоматическом росте кристаллов и об их кристаллизации совместно с другими рудными минералами. Минералы золота пространственно приурочены к выделениям пирита второй генерации (пирит-2) и находятся в ассоциации с халькопиритом и ковеллином (рис. 15, а, б).

Значения пробности золота на Южно-Магнетитовом месторождении колеблются в пределах от 723 до 797 ‰ (табл. 4), что отвечает относительно низкопробному самородному золоту. Отсутствие вариаций значения пробности самородного золота может свидетельствовать о том, что минералы золота на Южно-Магнетитовом месторождении отлагались в один этап и имеют единый источник.

Кроме самородного золота, на месторождении наблюдаются единичные неназванные минеральные формы с составом, соответствующим фазе Cu-Au-Ag, которые находятся в тесной ассоциации с гидроокислами железа (рис. 15, с). Выделения имеют неправильную форму с округлыми краями, а их размер не превышает 5 мкм в поперечном сечении. Соединение состава Au-Ag-S диагностируется в виде единичного серповидного включения в халькопирите (рис. 15, д). Размер включения около 4 мкм. Незначительный размер этих соединений не даёт возможности более точно определить химический состав и дать название этим минеральным видам. Предварительно их можно диагностировать как медистое золото и ютенбогаардит.

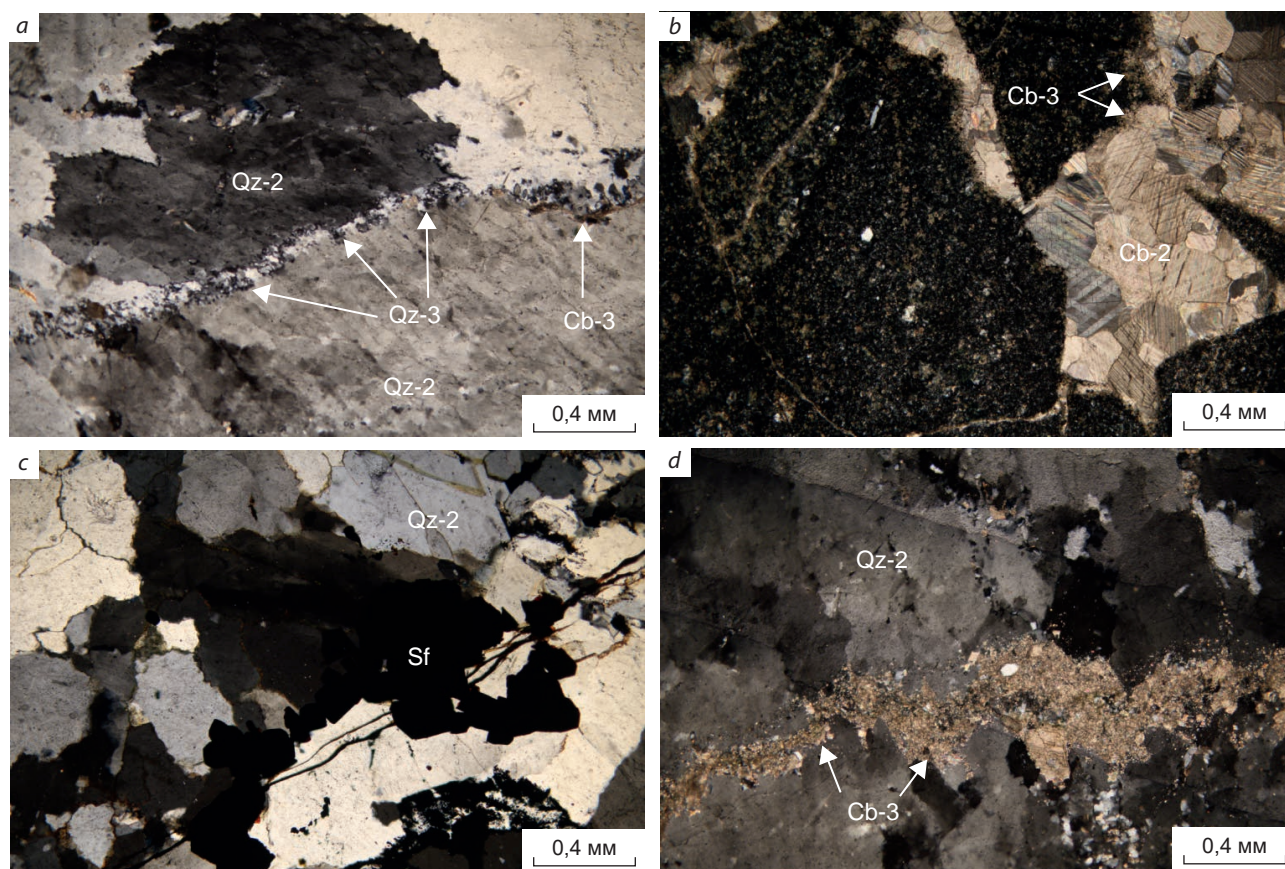


Рис. 14. Жильные минералы кварц-сульфидных жил и прожилков:

a – гранулированные зёрна кварца второй генерации (Qz-2) с частично перекристаллизованным мелкозернистым кварцем третьей генерации (Qz-3) и карбонатом третьей генерации (Cb-3) по границам зёрен; *b* – по краям разноразмерных, угловатых зёрен карбоната второй генерации (Cb-2) концентрируется тонкоперетёртый карбонатный материал (Cb-3); *c* – соотношение кварца (Qz-2) и сульфидных минералов (Sf); *d* – взаимоотношение среднезернистого кварцевого агрегата (Qz-2) и карбонатного агрегата (Cb-3)

Fig. 14. Gangue minerals of the quartz-sulfide veins and veinlets:

a – granulated grains of second-generation quartz (Qz-2) with partially recrystallized fine-grained third-generation quartz (Qz-3) and third-generation carbonate (Cb-3) along the grain boundaries; *b* – finely grinded carbonate material (Cb-3) is concentrated at the edges of different-sized, angular grains of second-generation carbonate (Cb-2); *c* – relationship between quartz (Qz-2) and sulfide minerals (Sf); *d* – relationship between medium-grained quartz aggregate (Qz-2) and carbonate aggregate (Cb-3)

Минеральные ассоциации руд

В ходе детального изучения минерального состава руд и вещественных характеристик вмещающих пород нами были выделены следующие рудные минеральные ассоциации: пирит-гематит-магнетитовая, сульфидно-карбонат-кварцевая и висмут-теллуридная, а также минеральная ассоциация зоны гипергенеза.

Пирит-гематит-магнетитовая ассоциация, связанная, по-видимому, с этапом скарно-

образования, характеризуется массовым отложением магнетита, который впоследствии подвергся процессу мартитизации, что привело к образованию гематита. Близодновременно с гематитом в небольших количествах отлагается барит. На этом же этапе формируются зёрна пирита первой генерации (пирит-1). На заключительной стадии скарнообразования появляются кварц и карбонат первых генераций (кварц-1 и карбонат-1), которые запол-

Табл. 3. Химический состав рудных минералов

Table 3. Chemical composition of ore minerals

Минерал	Сумма	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ag	Cd	Pb	Bi	Te	As	Se	S
Айкинит	99,83	9,26			14,64				34,39	19,97		1,07		20,50
Аллоклазит	100,24	6,04	30,11	1,40								42,30		20,40
Арсенопирит	100,19	35,87										43,52		20,80
Борнит	100,18	11,18			61,60									27,40
Висмутин	99,97				38,50					41,65				19,82
Галенит	100,21								86,96					13,25
Гессит	99,90						56,96				40,71			
Глаукодот	100,64	12,42	22,43	2,21								38,22		25,37
Идаит	99,90	8,85			59,85									31,21
Лёллингит	99,77	31,85										67,92		
Лузонит	99,43				37,47	6,44						19,70		28,16
Самородный Te	100,04										100,04			
Сфалерит	99,90	2,93				62,71		0,11						34,14
Шапбахит	100,22				0,94		27,77			19,62	32,31			19,59
Штюцит	99,39						99,39				39,36			
Эмпрессит	100,34						48,59			3,19	45,83		2,73	

Примечание. Химический состав минералов определялся с помощью растрового электронного микроскопа LEO-1430VP с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 в Центре коллективного пользования «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН (аналитик Е. В. Ходырева).

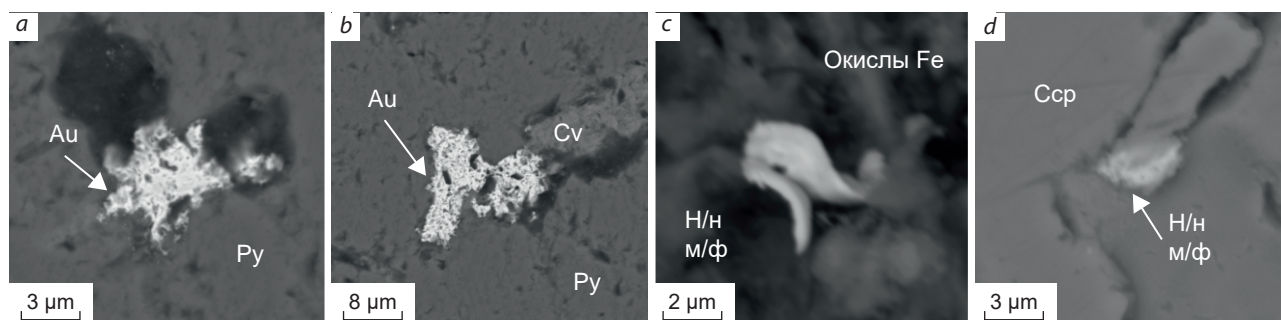


Рис. 15. Минеральные формы самородного золота:

a – выделение самородного золота (Au) в пирите (Py); *b* – сросток золота с ковеллином (Cv) в пирите; *c* – Cu-Au-Ag минеральная форма (Н/н м/ф) в ассоциации с окислами Fe; *d* – включение Au-Ag-S минеральной формы (Н/н м/ф) в халькопирите (Ccp)

Fig. 15. Mineral forms of native gold:

a – native gold (Au) segregation in pyrite (Py); *b* – gold intergrowth with covellite (Cv) in pyrite; *c* – Cu-Au-Ag mineral form (H/n m/f) in association with iron oxides (Окислы Fe); *d* – Au-Ag-S mineral form (H/n m/f) in chalcopyrite (Ccp)



Табл. 4. Состав самородного золота с Южно-Магнетитового месторождения

Table 4. Composition of native gold from the Yuzhno-Magnetitovoye deposit

№ п/п	Au (мас. %)	Ag (мас. %)
1	72,59	27,81
2	76,99	23,92
3	78,47	21,96
4	78,64	21,64
5	78,99	21,40
6	79,01	21,17
7	78,35	20,86
8	79,52	20,92
9	79,68	20,57
10	79,65	20,54
11	79,67	20,24

няют пространство между зёрнами магнетита-1.

Пирит-халькопирит-арсенопиритовая минеральная ассоциация является продуктом начальной стадии гидротермально-метасоматического этапа, которая сопровождается образованием пропилитов. Близодновременно с основными минеральными компонентами пропилитов (альбит, эпидот, хлорит, серицит) происходит массовое отложение пирита второй генерации (пирит-2), а также в небольших количествах отлагается халькопирит. Кроме того, на данной стадии образуется арсенопирит, слагающий угловатые зёрна в карбонате. С арсенопиритом ассоциируют другие соединения мышьяка, в частности его кобальтовые разновидности глаукоцит и аллоклазит, образующие непрерывный изоморфный ряд.

Сульфидно-карбонат-кварцевая ассоциация начинается с массового отложения кварца второй генерации (кварц-2) и карбоната второй генерации (карбонат-2). По зонам дробления в кварце-2 и карбонате-2 происходит отложение более поздних кварца третьей генерации (кварц-3) и карбоната третьей генерации (карбонат-3). Также близодновременно с карбонатом и кварцем начинают образовываться сульфидные минералы. Халькопирит и борнит очень часто находятся в сростании друг с другом, а пластинки халькопирита в виде табли-

чек и линз (распад твёрдого раствора) свидетельствуют об одновременном образовании данных минералов. Сфалерит содержит вкрапленность халькопирита (распад твёрдого раствора), что также может свидетельствовать об их синхронном отложении. Галенит отлагается значительно позже в трещинах и дефектах на поверхности халькопирита. Барит заполняет трещины и микродефекты в халькопирите и борните, что позволяет считать его более поздним минералом. На данном этапе также диагностируются поздние арсениды: лёллинит и лузонит, а также теннантит. С этой же минеральной ассоциацией связана кристаллизация самородного золота, которое отлагается в зёрнах пирита-2 и наблюдается в сростках с халькопиритом.

Висмут-теллуридная ассоциация наложена на более ранние и высокотемпературные минеральные парагенезисы. Рудные минералы представлены сульфотеллуридами (тетрадимит), сульфосолями Cu и Bi (виттихенит), теллуридами Ag (гессит, штютцит, эмпресит), сульфовисмутитами (шапбахит, айкинит), а также висмутином, самородным теллуром и несколькими Te-Bi-содержащими минеральными фазами, точно диагностировать которые не удалось из-за их мелких размеров. Минералы висмут-теллуридной ассоциации пространственно приурочены к трещинам, порам и микродефектам в кварце-2, карбонате-2, пирите-2, халькопирите и пирротине.

Условия рудообразования

Оценка температур рудообразования. Температурные условия образования рудных минералов оценены при помощи методов минеральной геотермометрии. Наличие арсенопирита в рудах месторождения позволило использовать арсенопиритовый геотермометр, который основан на зависимости состава минерала от его температуры и летучести [25].

Для расчёта температурных параметров используется атомное содержание As (%) в арсенопирите, который находится в ассоциации с пиритом (табл. 5). Оно варьирует от 29,06 до 33,51 ат. %, что соответствует температурам образования 323–513 °С.

Табл. 5. Расчёт температур минералообразования по арсенопиритовому геотермометру

Table 5. Calculation of the mineral formation temperatures by the arsenopyrite geothermometer

№ п/п	As (ат. %)	Fe (ат. %)	S (ат. %)	T, °C
1	29,06	33,48	37,46	323
2	30,77	33,36	35,87	396
3	33,51	34,10	32,39	513
4	30,57	33,56	35,87	387
5	31,06	34,49	34,45	408
6	31,29	34,70	34,01	418
7	31,62	34,99	33,40	432
8	30,49	35,86	33,65	384

На основании полученных данных мы можем сделать вывод, что арсенопирит и ассоциирующие с ним минералы, а также ряд других арсенидов (аллоклазит и глаукоdot), которые всегда образуют единый парагенезис, кристаллизовались в пределах вышеуказанных температур, соответствующих вероятному интервалу температур ранней стадии гидротермального этапа.

Температуру образования окколорудных пропилитов можно оценить с помощью хлоритового геотермометра, который активно применяется для изучения условий формирования рудных месторождений [8]. Для оценки температур использовалось следующее уравнение [8]:

$$T, \text{ }^\circ\text{C} = 39,73 + 180,64 \times (Al_{IV}) (\pm 15 \text{ }^\circ\text{C}),$$

где Al_{IV} – количество алюминия в тетраэдрической координации.

Установлено, что значения температур образования хлоритов попадают в интервал 146–273 °C (табл. 6).

Полученные нами результаты согласуются с температурами распада твёрдых растворов некоторых минералов. Так, в зёрнах борнита выделяются пластинчатые и столбчатые включения халькопирита, что свидетельствует об избытке железа в составе борнита. Такой распад происходит при понижении темпе-

Табл. 6. Результаты расчёта температур рудообразования на основе хлоритового геотермометра

Table 6. Calculation of the ore formation temperature by the chlorite geothermometer

№ п/п	Si (общ.)	Al_{IV}	T, °C
1	2,894	1,106	240
2	3,164	0,836	191
3	3,391	0,609	150
4	3,081	0,919	206
5	2,975	1,025	225
6	2,908	1,092	237
7	3,413	0,587	146
8	3,041	0,959	213
9	2,751	1,249	265
10	2,792	1,208	258
11	2,734	1,266	268
12	2,806	1,194	255
13	3,071	0,929	208
14	2,818	1,182	253
15	2,711	1,289	273
16	2,744	1,256	267
17	3,056	0,944	210

ратуры с 300 до 170 °C [9, 21]. Мелкая эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите появляется при температурах ниже 350–400 °C.

Согласно диаграмме стабильности минералов системы Au-Ag-Te [1], золото-теллуридная ассоциация формируется в относительно низкотемпературных условиях 150–280 °C. Известно, что при температуре 210 °C эмпресит преобразуется в штютцит и самородный теллур [24]. Как показано выше, все три минерала присутствуют в рудах, что свидетельствует о температурах минералообразования, близких к 210 °C.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что поздняя висмут-теллуридная ассоциация является относительно низкотемпературной и наложена на более ранние и высокотемпературные минеральные ассоциации.

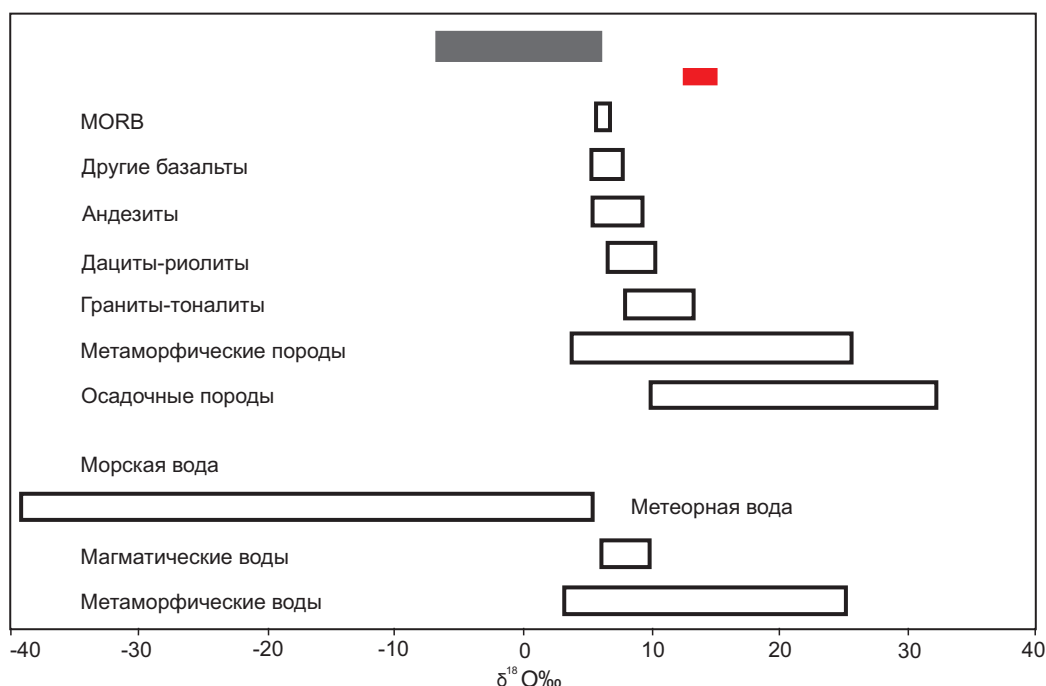


Рис. 16. Изотопный состав кислорода пород и минералов [11]:

серым цветом отмечены значения изотопов кислорода в магнетите с Южно-Магнетитового месторождения, красным цветом – значения изотопов кислорода в кварце с Южно-Магнетитового месторождения

Fig. 16. Oxygen isotopic composition of the rocks and minerals [11]:

oxygen isotope values in magnetite from the Yuzhno-Magnetitovoye deposit are shown in gray; oxygen isotope values in quartz from the Yuzhno-Magnetitovoye deposit are shown in red

Изотопные характеристики руд Южно-Магнетитового месторождения

Изотопный состав сульфидной серы. Результаты изотопного анализа сульфидной серы с разных типов руд Южно-Магнетитового месторождения варьируют от +0,8 ‰ до +17,1 ‰ (рис. 16). Значения изотопного состава серы в пирите колеблются в пределах от 0,8 до 12,2 ‰, в халькопирите – от +3,3 до +17,1 ‰ (табл. 7). Такие вариации изотопного состава серы могут быть обусловлены изменением физико-химических условий рудоотложения и вовлечением в систему серы, имеющей различное происхождение [2]. Значения $\delta^{34}\text{S} = 0 (\pm 3 \text{ ‰})$ свидетельствуют о мантийном или магматическом источнике серы, тогда как повышенные значения $\delta^{34}\text{S}$ связывают с поступлением серы из морской воды, а также сульфат-редукцией морских отложений [6]. Следовательно, в данном случае источник серы был гетерогенным: часть серы поступа-

ла из магматического источника, часть – из морских осадков.

Изотопный состав кислорода. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в магнетите изменяются от -6,3 до +5,2 ‰. Полученный интервал значений попадает в область величин, характерных для метеорных вод [10], но приближается к составу магматических вод (рис. 16). Измеренные значения согласуются с мнением о том, что большая часть магнетита образуется за счёт свободного кислорода, который поступает в земную кору с поверхностными водами в растворённом виде [10–12, 16]. Часть магнетита в данном случае формировалась за счёт магматических флюидов. Так же, как и для изотопного состава серы, данные по изотопному составу кислорода в магнетите свидетельствуют о смешении магматических и поверхностных вод.

Золотоносные гидротермально-метасоматические руды содержат две генерации кварца – кварц-2 (основная масса) и кварц-3 (тонкие

Табл. 7. Изотопный состав серы из сульфидных минералов и кислорода из кварца и магнетита

Table 7. Isotopic composition of sulfur from the sulfide minerals and that of oxygen from the quartz and magnetite

№ п/п	$\delta^{34}\text{S}$, ‰	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^{18}\text{Ofl}$, ‰	Минерал
1	+0,8			Пирит
2	+1,6			Пирит
3	+3,7			Пирит
4	+10,7			Пирит
5	+12,2			Пирит
6	+3,3			Халькопирит
7	+15,1			Халькопирит
8	+17,1			Халькопирит
9	+16,1			Халькопирит
10	+13,3			Пирротин
11		+12,9	+8,7	Кварц
12		+13,4	+9,2	Кварц
13		+13,4	+9,2	Кварц
14		+14,0	+9,8	Кварц
15		+14,3	+10,1	Кварц
16		-6,3		Магнетит
17		+0,1		Магнетит
18		+0,9		Магнетит
19		+1,1		Магнетит
20		+5,2		Магнетит

Примечание. Изотопный состав серы из сульфидных минералов определялся на масс-спектрометре Delta V Advantage в Центре коллективного пользования научным оборудованием многоэлементных и изотопных исследований СО РАН Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск (аналитик В. Н. Реутский). Изотопный состав кислорода из магнетита и кварца определялся на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 в Центре коллективного пользования «Геоспектр» Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ (аналитик В. Ф. Посохов).

прожилки и оторочки перекристаллизованного кварца). В рамках данного исследования был изучен изотопный состав кислорода из кварца второй генерации (кварц-2). Небольшой размер и незначительные количества не позволили нам выделить перекристаллизованный кварц третьей генерации (кварц-3). Известно, что деформации и перекристаллизация кварца не влияют на изотопный состав кислорода [27, 28], и вероятнее всего кварц-2

и кварц-3 имеют близкий изотопный состав и, соответственно, единый источник.

Величины $\delta^{18}\text{O}$ в кварце для Южно-Магнетитового месторождения составляют 12,9–14,3 ‰ (рис. 16, табл. 7). Узкий интервал значений может свидетельствовать о едином источнике минералообразующего флюида. Расчёт изотопного состава равновесного флюида для температуры 400 °С (за основу берётся среднее значение температур рудообразования, полученных методом минеральной геотермометрии) показал значения $\delta^{18}\text{O}$ от +8,7 до +10,1 ‰ (табл. 7). Такой интервал значений соответствует флюиду магматогенного происхождения.

Этапы и стадии минералообразования

На основании изучения минерального состава руд и вмещающих пород, учитывая наличие нескольких рудных минеральных ассоциаций, можно сделать вывод о многоэтапном и многостадийном характере процесса рудообразования (рис. 17).

Первый этап связан с процессом скарнирования. Скарны на дневной поверхности не проявлены, но установлены на глубоких горизонтах по данным бурения. Результаты исследования геохимических и изотопных характеристик магнетитов свидетельствуют в пользу скарновой природы этого минерала. В частности, это доказывается на основе индикаторных отношений элементов-примесей (по данным LA-ICP-MS анализа) в магнетите и значений изотопного состава кислорода в магнетите. Кроме того, часть значений изотопного состава серы в сульфидах и кислорода в кварце отвечают магматическому источнику рудообразующих элементов, что свидетельствует о связи оруденения с магматизмом. На этом основании сделан вывод о том, что процесс скарнирования привёл к образованию гематит-магнетитовой минерализации. Согласно литературным данным [19], температуры формирования известковых скарнов (которые были выявлены на глубоких горизонтах) составляют 640–450 °С.

Второй этап, гидротермально-метасоматический, обусловлен влиянием гидротермаль-



ных флюидов, предположительно связанных с дайковым магматизмом, продукты которого представлены кварцевыми сиенит-порфирами и долеритовыми порфиритами, прорывающими вулканогенно-осадочные породы олдындинской свиты. Однако не исключено, что формирование поздней гидротермальной минерализации обусловлено влиянием тех же скарнирующих растворов, но в условиях относительно пониженных P-T параметров, отвечающих стадии остывания рудно-магматической системы. Для решения этого вопроса необходимо проведение дополнительных исследований, в том числе изотопно-геохронологических. Гидротермально-метасоматические преобразования рудовмещающей вулканогенно-осадочной толщи представлены пропилитизацией, окварцеванием и аргиллизацией. Пропилитизация развита практически по всему рудному полю Южно-Магнетитового месторождения, тогда как зоны окварцевания развиты в пределах линейных минерализованных зон, приуроченных к экзоконтактовым частям даек. Аргиллизиты проявляются локально, в виде замещения алюмосиликатов агрегатом глинистых минералов.

Рудные минеральные ассоциации в составе гидротермально-метасоматического этапа проявляются в составе нескольких стадий. Первая стадия, пропилитовая, связана с развитием площадной пропилитизации и появлением таких минералов, как хлорит, альбит, эпидот, серицит, в меньшей степени – кварца и карбоната. Из рудных минералов на этой стадии формируются пирит-2, арсенопирит и частично халькопирит. Вторая стадия, кварц-сульфидная, характеризуется становлением золотоносных кварцевых жил и прожилков, содержащих сульфидную минерализацию. Жилы и прожилки сопровождаются зонами метасоматических изменений, проявленных как во вмещающих вулканогенных породах, так и в самих дайках. Третья стадия, висмут-теллуридная, наложена на более ранние относительно высокотемпературные минеральные ассоциации и связана с образованием сульфотеллуридов, сульфосолей и минеральных видов, содержащих Bi и Te. Формирование ми-

нералов этой стадии предположительно связано с процессом низкотемпературной аргиллизации.

Гипергенный этап характеризуется окислением гипогенных минералов с образованием гидроокислов железа и формированием зоны вторичного сульфидного обогащения, в результате которого образуются такие минералы, как ковеллин, идаит и куприт.

Заключение

Южно-Магнетитовое месторождение локализовано в толще вулканогенно-осадочных пород и приурочено к минерализованной зоне дробления и брекчирования вблизи даек сиенитов и долеритов, где развита кварцево-жилково-прожилковая и сульфидно-вкрапленная минерализация, а также присутствуют линзовидные тела магнетитовых руд.

Минералогическими исследованиями на месторождении выявлено около 30 рудных минералов, главными из которых являются магнетит, гематит, халькопирит и пирит, а среди второстепенных и редких минералов отмечаются борнит, барит, галенит, сфалерит, арсениды (арсенопирит, глаукоdot, аллоклазит, лузонит и лёллинит), минералы Bi и Te.

Самородное золото пространственно приурочено к зёрнам пирита второй генерации (пирит-2) и находится в ассоциации с халькопиритом. По морфологии минералы золота относятся к неправильному (подчинённые формы заполняемых золотом полостей) морфологическому типу. Пробность самородного золота варьирует от 723 до 797 ‰.

Оценки температур рудообразования проводились по минеральным парагенезисам и геотермометрам. Установлено, что минералообразование на ранней стадии гидротермально-метасоматического этапа происходило в интервале температур 513–323 °С. Поздняя висмут-теллуридная ассоциация формировалась в интервале 273–146 °С.

Изотопный состав сульфидной серы из рудных минералов Южно-Магнетитового месторождения попадает в интервал значений от +0,8 до +17,1 ‰ и свидетельствует о гетерогенном источнике серы. Результаты исследова-

Этап Стадия Минерал	Скарновый	Гидротермально-метасоматический				Гипергенный
		Пропи- литовая	Кварц- сульфидная	Висмут- теллуридная	Аргили- зитовая	
Т, °С	640–450	513–146				
Магнетит	■					
Пирит	■ I	■ II		■ III		
Гематит	■					■
Арсенопирит		■				
Халькопирит		■	■			
Борнит			■			
Сфалерит			■			
Пирротин						
Барит	.....			■	
Галенит				.....	
Аллоклазит		.....			
Глаукодот		.....			
Лёллингит				.....	
Лузонит				.....	
Теннантит				.....	
Тетрадимит				.....	
Штютцит				.....	
Эмпрессит				.....	
Гессит				.....	
Висмутинит				.....	
Шапбахит				.....	
Айкинит				.....	
Самородный Те				.....	
Виттихенит				.....	
Идаит						.....
Куприт						.....
Самородная Сu						■
Ковеллин						■
Гидроокислы Fe и Сu						■
Золото		.....				.....
Апатит	.....				
Кварц	■ I	■ II	■ III	■		
Карбонат	■ I	■ II	■ III	■		
Мусковит				■		
Хлорит				■		
Эпидот				■		
Глинистые минералы						■

Рис. 17. Последовательность минералообразования

Fig. 17. Mineral formation sequence



ния изотопного состава кислорода в магнетите отвечают значениям от -6,3 до +5,2 ‰ и ложатся в область значений, которые характерны для метеорных вод. Изотопный состав кислорода в кварце, попадающий в интервал от +12,9 до 14,3 ‰, может свидетельствовать о магматогенном источнике рудного кварца.

На основе морфологических характеристик и взаимоотношений минералов была установлена общая последовательность минералообразования и выделены минеральные ассоциации трёх этапов рудообразующего процесса: скарнового, гидротермально-метасоматического и гипергенного.

По особенностям геологического строения, минерального состава руд и по аналогии с соседним Назаровским месторождением, скарновая природа которого показана работами

предшественников [7], Южно-Магнетитовое отнесено к золото-скарновому формационному типу. Оба этих объекта схожи между собой по геологическому строению, характеру гидротермально-метасоматических преобразований вмещающих пород и минеральному составу руд, в том числе наличию висмутовой минерализации [18] в кварц-сульфидных прожилках. При этом, как и во многих случаях, золоторудная минерализация наложена на ранние скарновые минеральные ассоциации.

Исследования проведены в рамках государственного задания Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН (проект № АААА-А21-121011390003-9), экспедиционные и лабораторно-аналитические работы выполнены при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда № 22-17-00106.

Список литературы

1. Бортников Н. С., Крамер Х., Генкин А. Д., Крапива Л. Я., Санта-Крус С. Парагенезисы теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия (Республика Куба) // Геология рудных месторождений. 1988. – № 2. – С. 49–61.
2. Викентьев И. В. Условия формирования и метаморфизм колчеданных руд. – М.: Научный мир, 2004. – 322 с.
3. Викентьев И. В., Дамдинов Б. Б., Минина О. Р., Спирина А. В., Дамдинова Л. Б. Классификация процессов полиметаллического рудообразования и переходный VMS-SEDEX-MV-тип – пример гигантского Озёрного месторождения в Забайкалье, Россия // Геология рудных месторождений. – 2023. – Т. 65, № 3. – С. 201–236.
4. Гордиенко И. В., Нефедьев М. А. Курбино-Еравнинский рудный район Западного Забайкалья: геолого-геофизическое строение, типы рудных месторождений, прогнозная оценка и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57, № 2. – С. 114–124.
5. Гордиенко И. В., Нефедьев М. А., Платов В. С. Строение, минеральные типы рудных месторождений и перспективы освоения Еравнинского рудного района Западного Забайкалья // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН. – 2013. – № 1 (42). – С. 7–22.
6. Гричук Д. В., Леин А. Ю. Эволюция океанской гидротермальной системы и изотопный состав сульфидов // Доклады РАН. – 1991. – Т. 318, № 2. – С. 422–425.
7. Ковалев К. Р., Баулина М. В., Акимцев В. А., Аношин Г. Н. Стратиформные цинково-колчеданные руды и золоторудная минерализация на Назаровском месторождении // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44, № 10. – С. 936–978.
8. Котельников А. Р., Сук Н. И., Котельникова З. А., Щекина Т. И., Калинин Г. М. Минеральные геотермометры для низкотемпературных парагенезисов // Вестник ОНЗ РАН. – 2012. – Т. 4. – NZ9001.
9. Лавров О. Б., Кулешевич Л. В. Минеральные ассоциации золото-медно-сульфидных кварц-карбонатных жил в габбро-долеритах месторождения строительного камня Чевжавара (Южная Карелия) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2020. – № 17. – С. 312–316.
10. Лихачёв А. П. О переотложении рудогенных и петрогенных компонентов водными растворами // Геохимия. – 1975. – № 10. – С. 1459–1474.
11. Лихачёв А. П. Условия образования магнетита и его рудных скоплений // Отечественная геология. – 2017. – № 4. – С. 44–53.
12. Майсен Б., Беттчер А. Плавление водосодержащей мантии. – М.: Мир, 1979. – 118 с.

13. Минина О. Р., Гордиенко И. В., Дамдинов Б. Б., Ташлыков В. С., Гонегер Т. А., Скрипников М. С., Ланцева В. С., Хубанов В. Б., Кислов Е. В. Новые данные о возрасте рудовмещающих отложений Озёрного полиметаллического месторождения (Западное Забайкалье) // Литология и полезные ископаемые. – 2023. – № 3. – С. 299–314.
14. Минина О. Р., Руженцев С. В., Аристов В. А. Средний палеозой Еравнинской зоны Западного Забайкалья // Материалы международной конференции, посвященной памяти Е. А. Елкина: Биостратиграфия, палеогеография, события в девоне и карбоне. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011. – С. 110–112.
15. Петровская Н. В. Самородное золото (Общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). – М. : Наука, 1973. – 349 с.
16. Печерский Д. М., Геншафт Ю. С. Петромагнетизм континентальной литосферы и природа региональных магнитных аномалий // Российский журнал наук о Земле. – 2001. – Т. 3. – № 2.
17. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. – М. : Изд-во иностр. лит-ры, 1962. – 1119 с.
18. Рыжкова Ю. А., Новоселов К. А., Рассомахин М. А., Рожкова Е. А. Висмутовые минералы Назаровского золото-полиметаллического месторождения (Западное Забайкалье) // Минералогия. – 2025. – Т. 11, № 1. – С. 28–42.
19. Синяков В. И. Генетические типы скарновых рудообразующих систем. – Новосибирск : Наука, 1990. – 71 с.
20. Тарасова Р. С., Близнюк М. В., Бабкин И. Н. О формационном типе и генезисе Озерного свинцово-цинкового колчеданного месторождения // Геология и генезис эндогенных рудных формаций Сибири. – 1972. – Вып. 143. – С. 79–97.
21. Филимонова А. А. Опыты по нагреванию борнитсодержащих колчеданных руд // Изв. АН СССР, серия геологическая. – 1952. – № 3. – С. 76–88.
22. Чернышева Л. В. Магнетит / Типоморфизм минералов. – М. : Недра, 1989. – С. 266–287.
23. Dupuis C., Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types // Mineralium Deposita. – 2011. – V. 46, Is. 4. – P. 319–335.
24. Honea R. M. Empressite and stuetzite redefined // American Mineralogist. – 1964. – V. 49, № 3–4. – P. 325–338.
25. Kretschmar U., Scott S. D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application // Canadian Mineralogist. – 1976. – Special issue, № 14. – P. 364–386.
26. Nadoll P., Mauk J. K., Leveille R. A., Koenig A. T. Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States // Mineralium Deposita. – 2015. – V. 50, Is. 4. – P. 493–515.
27. O'Hara K., Sharp Z., Moecher D., Jenkin G. T. The effect of deformation on oxygen isotope exchange in quartz and feldspar and the significance of isotopic temperatures in mylonites // Journal of Geology. – 1997. – № 105. – P. 193–204.
28. Schulz B., Audren C., Triboulet C. Oxygen isotope record on fluid-rock-SiO₂ interaction during Variscan progressive deformation and quartz veining in the meta-volcanosediments of Belle-Ile (Southern Brittany) // Journal of Structural Geology. – 2002. – № 24. – P. 1281–1297.

References

1. Bortnikov N. S., Kramer Kh., Genkin A. D., Krapiwa L. Ya., Santa-Krus S. Paragenesis of tellurides of gold and silver in the Florencia gold deposit (Republic of Cuba) [Parageneses of gold and silver tellurides in the Florencia gold deposit (Republic of Cuba)], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 1988, No 2, pp. 49–61. (In Russ.)
2. Vikent'ev I. V. Usloviya formirovaniya i metamorfizm kolchedannykh rud [Conditions of formation and metamorphism of pyrite ores], Moskva, Nauchnyi Mir Publ., 2004, 322 p.
3. Vikent'ev I. V., Damdinov B. B., Minina O. R., Spirina A. V., Damdinova L. B. Klassifikatsiya protsessov polimetallicheskogo rudoobrazovaniya i perekhodnykh VMS-SEDEX-MV-tip – primer gigant'skogo Ozerogo mestorozhdeniya v Zabaikal'e, Rossiya [Classification of polymetallic ore formation processes and the transitional VMS-SEDEX-MV type – an example of the giant Ozernoye deposit in Transbaikalia, Russia], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2023, V. 65, No 3, pp. 201–236. (In Russ.)
4. Gordienko I. V., Nefed'ev M. A. Kurbinno-Eravninskii rudnyi raion Zapadnogo Zabaikal'ya: geologo-geofizicheskoe stroenie, tipy rudnykh mestorozhdenii, prognoznaya otsenka i perspektivy osvoeniya [Kurbino-Eravninsky ore region of Western Transbaikalia: geological and geophysical structure, types of ore deposits, forecast assessment and deve-



- lopment prospects], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of ore deposits], 2015, V. 57, No 2, pp. 114–124. (In Russ.)
5. Gordienko I. V., Nefed'ev M. A., Platov V. S. Stroenie, mineral'nye tipy rudnykh mestorozhdenii i perspektivy osvoeniya Eravninskogo rudnogo raiona Zapadnogo Zabaikal'ya [Structure, mineral types of ore deposits and development prospects of the Eravninsky ore region of Western Transbaikalia], *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle RAEN* [Bulletin of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences], 2013, No 1 (42), pp. 7–22. (In Russ.)
 6. Grichuk D. V., Lein A. Yu. Evolyutsiya okeanskoj gidrotermal'noi sistemy i izotopnyi sostav sul'fidov [Evolution of the oceanic hydrothermal system and the isotopic composition of sulfides], *Doklady RAN* [Reports of the Russian Academy of Sciences], 1991, V. 318, No 2, pp. 422–425. (In Russ.)
 7. Kovalev K. R., Baulina M. V., Akimtsev V. A., Anoshin G. N. Stratiformnye tsinkovo-kolchedannye rudy i zolotorudnaya mineralizatsiya na Nazarovskom mestorozhdenii [Stratiform zinc-pyrite ores and gold mineralization at the Nazarovskoye deposit], *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], 2003, V. 44, No 10, pp. 936–978. (In Russ.)
 8. Kotelnikov A. R., Suk N. I., Kotelnikova Z. A., Shchekina T. I., Kalinin G. M. Mineral'nye geotermometry dlya nizkotemperaturnykh paragenezisov [Mineral geothermometers for low-temperature parageneses], *Vestnik ONZ RAN* [Bulletin of the Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences], 2012, V. 4, NZ9001. (In Russ.)
 9. Lavrov O. B., Kuleshevich L. V. Mineral'nye assotsiatsii zoloto-medno-sul'fidnykh kvarts-karbonatnykh zhil v gabbro-doleritakh mestorozhdeniya stroitel'nogo kamnya Chevzhavara (Yuzhnaya Kareliya) [Mineral associations of gold-copper-sulfide quartz-carbonate veins in gabbro-dolerites of the Chevzhavara building stone deposit (South Karelia)], *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN* [Proceedings of Fersman scientific session of the Geological Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, No 17, pp. 312–316. (In Russ.)
 10. Likhachev A. P. O pereotlozhenii rudogennykh i petrogennykh komponentov vodnymi rastvorami [On the redeposition of ore-forming and petrogenic components by aqueous solutions], *Geokhimiya* [Geochemistry], 1975, No 10, pp. 1459–1474. (In Russ.)
 11. Likhachev A. P. Usloviya obrazovaniya magnetita i ego rudnykh sklopiy [Conditions of formation of magnetite and its ore clusters], *Otechestvennaya geologiya* [National geology], 2017, No 4, pp. 44–53. (In Russ.)
 12. Mysen B., Bettcher A. Plavlenie vodosoderzhashchei mantii [Melting of the hydrous mantle], Moscow, Mir Publ., 1979, 118 p.
 13. Minina O. R., Gordienko I. V., Damdinov B. B., Tashlykov V. S., Gonerger T. A., Skripnikov M. S., Lantseva V. S., Khubanov V. B., Kislov E. V. Novye dannye o vozraste rudovmeshchayushchikh otlozhenii Ozeronogo polimetallicheskogo mestorozhdeniya (Zapadnoe Zabaikal'e) [New data on the age of ore-bearing sediments of the Ozeronoye polymetallic deposit (Western Transbaikalia)], *Litologiya i poleznye iskopaemye* [Lithology and mineral resources], 2023, No 3, pp. 299–314. (In Russ.)
 14. Minina O. R., Ruzhentsev S. V., Aristov V. A. Srednii paleozoi Eravninskoi zony Zapadnogo Zabaikal'ya [Middle Paleozoic of the Eravninskaya zone of Western Transbaikalia], *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati E. A. Elkina: Biostratigrafiya, paleogeografiya, sobytiya v devone i karbone* [Proceedings of the international conference dedicated to the memory of E. A. Elkin: Biostratigraphy, paleogeography, events in the Devonian and Carboniferous], Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2011, pp. 110–112. (In Russ.)
 15. Petrovskaya N. V. Samorodnoe zoloto (Obshchaya kharakteristika, tipomorfizm, voprosy genezisa) [Native gold (General characteristics, typomorphism, issues of genesis)], Moscow, Nauka Publ., 1973, 349 p.
 16. Pecherskii D. M., Genshaft Yu. S. Petromagnetizm kontinental'noi litosfery i priroda regional'nykh magnitnykh anomalii [Petromagnetism of the continental lithosphere and the nature of regional magnetic anomalies], *Rossiiskii zhurnal nauk o Zemle* [Russian Journal of Earth Sciences], 2001, V. 3, No 2. (In Russ.)
 17. Ramdor P. Rudnye mineraly i ikh srastaniya [Ore minerals and their intergrowths], Moscow, Izdatel'stvo inostranno literature, 1962, 1119 p.
 18. Ryzhkova Yu. A., Novoselov K. A., Rassomakhin M. A., Rozhkova E. A. Vismutovye mineraly Nazarovskogo zoloto-polimetallicheskogo mestorozhdeniya

- (Zapadnoe Zabaikal'e) [Bismuth minerals of the Nazarovskoye gold-polymetallic deposit (Western Transbaikalia)], *Mineralogiya* [*Mineralogy*], 2025, V. 11, No 1, pp. 28–42. (In Russ.)
19. Sinyakov V. I. Geneticheskie tipy skarnovykh rudobrazuyushchikh system [Genetic types of skarn ore-forming systems], Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, 71 p.
20. Tarasova R. S., Bliznyuk M. V., Babkin I. N. O formatsionnom tipe i genezise Ozerного svintsovo-tsinkovogo kolchedannogo mestorozhdeniya [On the formation type and genesis of the Ozerное lead-zinc pyrite deposit], *Geologiya i genezis endogennykh rudnykh formatsii Sibiri* [*Geology and genesis of endogenous ore formations of Siberia*], 1972, Issue 143, pp. 79–97. (In Russ.)
21. Filimonova A. A. Opyty po nagrevaniyu bornit-soderzhashchikh kolchedannykh rud [Experiments on heating bornite-containing pyrite ores], *Izvestiya AN SSSR, seriya geologicheskaya* [*Bulletin of the USSR Academy of Sciences, geological series*], 1952, No 3., pp. 76–88. (In Russ.)
22. Chernysheva L. V. Magnetit [Magnetite], Tipomorfizm mineralov [Typomorphism of minerals], Moscow, Nedra Publ., 1989, pp. 266–287.
23. Dupuis C., Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types, *Mineralium Deposita*, 2011, V. 46, Issue 4, pp. 319–335.
24. Honea R. M. Empressite and stuetzite redefined, *American Mineralogist*, 1964, V. 49, No 3–4, pp. 325–338.
25. Kretschmar U., Scott S. D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application, *The Canadian Mineralogist*, 1976, Special issue, No 14, pp. 364–386.
26. Nadoll P., Mauk J. K., Leveille R. A., Koenig A. T. Geochemistry of magnetite from porphyry Cu and skarn deposits in the southwestern United States, *Mineralium Deposita*, 2015, V. 50, Issue 4, pp. 493–515.
27. O'Hara K., Sharp Z., Moecher D., Jenkin G. T. The effect of deformation on oxygen isotope exchange in quartz and feldspar and the significance of isotopic temperatures in mylonites, *Journal of Geology*, 1997, No 105, pp. 193–204.
28. Schulz B., Audren C., Triboulet C. Oxygen isotope record on fluid-rock-SiO₂ interaction during Variscan progressive deformation and quartz veining in the meta-volcanosediments of Belle-Ile (Southern Brittany), *Journal of Structural Geology*, 2002, No 24, pp. 1281–1297.

Москвитина Мария Леонидовна (homashca@mail.ru)

младший научный сотрудник¹

Дамдинов Булат Батуевич

доктор геолого-минералогических наук, заместитель генерального директора²

Извекова Александра Дмитриевна

кандидат геолого-минералогических наук, инженер-исследователь³

Дамдинова Людмила Борисовна

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник^{1,2}

¹ Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

² Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, г. Москва, Россия

³ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия