



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 549.283:553.411.071

DOI: 10.19110/geov.2022.6.2

Минералого-геохимические особенности руд золото-кварц-сульфидного проявления Верхнелекелецкое на Полярном Урале (кряж Манитанырд)

Т. П. Майорова^{1, 2}, Л. И. Ефанова¹, Н. В. Сокерина¹¹Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, *gmin2004@mail.ru, sokerina@geo.komisc.ru*²Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, *mayorova@geo.komisc.ru*

Золоторудное проявление Верхнелекелецкое золото-кварц-сульфидного типа локализуется в краевой части дайки габбро-долеритов леквожского комплекса нижнего ордовика. Рудная зона сложена пирит-серицит-кварцевыми метасоматитами с кварцево-жильной и прожилково-вкрапленной минерализацией. Золотосульфидные руды представлены пиритом с подчиненным количеством арсенопирита и в меньшей степени сфалерита. Галенит и халькопирит присутствуют в виде микровключений в пирите и арсенопирите. Характерными элементами-примесями в сульфидах являются мышьяк и сурьма, встречается никель. Установлены редкие минералы – тетраэдрит, сульфосоли свинца, ульманнит, герсдорфит. Основная форма нахождения золота – субмикронные и микронные выделения в пирите и арсенопирите. Элементы-примеси в золоте – серебро, редко встречается ртуть. Золото умеренно высокопробное и средней пробы, в присутствии ртути низкопробное. По минеральному составу руд, включая редкие минералы, рудопоявление Верхнелекелецкое имеет большую степень сходства с месторождением Верхненийуское-2. Сульфиды проявления Верхнелекелецкое характеризуются легким изотопным составом серы ($\delta^{34}\text{S} = -0.2 \div -3.5 \text{ ‰}$), близким к метеоритному стандарту, что свидетельствует об участии в рудообразовании глубинных источников серы и связи проявления с магматическими процессами.

Ключевые слова: золото, рудопоявления, пирит-арсенопиритовый тип, изотопный состав серы, Нияуская рудная зона, кряж Манитанырд, Полярный Урал.

Mineralogical and geochemical features of the ores of the Verkhnelekeletskeye gold-quartz-sulfide occurrence in the Polar Urals (Manitanyrd Ridge)

Т. П. Mayorova^{1, 2}, L. I. Efanova¹, N. V. Sokerina¹¹Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar,²P. Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Syktyvkar

The Verkhnelekeletskeye gold occurrence of gold-quartz-sulfide type is localized in the marginal part of the gabbro-dolerite dike of the Lower Ordovician Lekvozhsky complex. The ore zone is composed of pyrite-sericite-quartz metasomatites with quartz-vein and vein-disseminated mineralization. The gold-sulfide ores are represented by pyrite with a subordinate amount of arsenopyrite and, to a lesser extent, sphalerite. Galena and chalcopyrite are present as microinclusions in pyrite and arsenopyrite. Characteristic impurity elements in sulfides are arsenic and antimony, nickel is also found. We identified rare minerals – tetrahedrite, lead sulphosalts, ulmannite, gersdorffite. The main form of gold occurrence is submicron and micron segregations in pyrite and arsenopyrite. Impurity elements in gold are silver, mercury is rare. Gold is moderately high-grade and medium-grade, in the presence of mercury – low-grade. In terms of the mineral composition of ores, including rare minerals, the Verkhnelekeletskeye ore occurrence is very similar to the Verkhneniyayuskoye 2 deposit. The sulfides of the Verkhnelekeletskeye occurrence are characterized by a light sulfur isotopic composition ($\delta^{34}\text{S} = -0.2 \div -3.5 \text{ ‰}$), close to the meteorite standard, which indicates the participation of deep sulphur sources in ore formation and its association with magmatic processes.

Keywords: gold, ore occurrences, pyrite-arsenopyrite type, sulphur isotopic composition, Niyayu ore zone, Manitanyrd ridge, Polar Urals.

Введение

В Тимано-Североуральской золотоносной провинции наиболее перспективным на данный момент является Манитанырдский золоторудно-россыпной

район на Полярном Урале, в пределах которого расположено золотосульфидное месторождение с оцененными запасами золота, мышьяка, серебра, висмута, многочисленные проявления коренного золота

Для цитирования: Майорова Т. П., Ефанова Л. И., Сокерина Н. В. Минералого-геохимические особенности руд золото-кварц-сульфидного проявления Верхнелекелецкое на Полярном Урале (кряж Манитанырд) // Вестник геонаук. 2022. 6(330). С. 10–25. DOI: 10.19110/geov.2022.6.2.

For citation: Mayorova T. P., Efanova L. I., Sokerina N. V. Mineralogical and geochemical features of the ores of the Verkhnelekeletskeye gold-quartz-sulfide occurrence in the Polar Urals (Manitanyrd Ridge). Vestnik of Geosciences, 2022, 6(330), pp. 10–25, doi: 10.19110/geov.2022.6.2.



и пункты минерализации, а также небольшая россыпь [6]. Золотоносный потенциал этого района оценен не в полной мере. Наиболее хорошо изучено мелкое по запасам месторождение Верхненияюское-2 и проявление Нияхойское-2. На месторождении Верхненияюское-2 установлен состав метасоматитов, детально изучена минералогия руд, включая редкие минералы, и самородное золото, определены условия и последовательность рудообразования, источники рудного вещества, предложены модели формирования месторождения [1, 5, 7, 11, 12]. На рудопроявлении Нияхойское-2 проведено детальное изучение вещественного состава руд, установлены типоморфные особенности сульфидов и самородного золота, последовательность минералообразования и некоторые параметры рудного процесса, источники рудного вещества [8, 9]. В тоже время ряд перспективных рудопроявлений остаются слабо или недостаточно изученными. К таковым, в частности, относится проявление Верхнелекелецкое, расположенное на юго-западном замыкании Нияюской рудной зоны [6]. По данным предшественников, проводивших поисковые и ревизионные работы на золото в период 1963—1988 годы, проявление Верхнелекелецкое отнесено к жильной золото-кварц-сульфидной (золотомышьяковой) формации с пирит-арсенопиритовым типом руд, аналогичных таковым на месторождении Верхненияюское-2 и проявлении Нияхойское-2 [2]. Содержания элементов в руде, по данным атомно-абсорбционного анализа, составили (%): Zn — 0.18, Pb — 0.7, Cu — 0.02, Hg — 0.0005. Максимальные содержания: Au — 3.3 г/т, Ag — 18 г/т. Детальные минералогические исследования руд не проводились, форма нахождения золота в рудах оставалась неизвестной, генетические аспекты и связь с процессами рудообразования в районе не рассмотрены, дальнейшие перспективы рудопроявления не ясны. Нами получены первые данные о минеральном составе и геохимических особенностях руд проявления Верхнелекелецкое, типоморфных признаках рудных минералов и золота, источниках рудного вещества и связи с процессом рудообразования в Манитаньрдском золоторудном районе.

Геологическое строение района и рудопроявления Верхнелекелецкое

В структуре Полярного Урала кряж Манитаньрд занимает место в Западно-Уральской складчатой зоне и представляет собой автохтон в виде антиклинория, сложно построенной антиклинальной складки, ориентированной в северо-восточном направлении и опрокинутой на северо-запад с падением осевых плоскостей на юго-восток с углами 60—75° [3]. Ядро антиклинали сложено верхнерифейскими и вендскими породами бедамельской серии и энганепэйской свиты, крылья — венд-кембрийскими отложениями манитаньрдской серии (рис. 1).

Породы бедамельской серии (RF₃-V₂bd) представлены лавами и туфами базальтов, андезитами, дацитами и риолитами общей мощностью 2000—2700 м. Энганепэйская свита (V₂-E₁en) характеризуется грубым переслаиванием туфопесчаников, туфоконгломератов мощностью 1200—1500 м. На размытой поверхности докембрийских пород с угловым несогласием

залегает отложения манитаньрдской серии (E-O₁mnt) — конгломераты, гравелиты, кварцитопесчаники, алевролиты мощностью 500—800 м.

Интрузивные породы в Манитаньрдском районе развиты незначительно (рис. 1). Отмечаются немногочисленные небольшие тела габбро и габбро-долеритов, которые относятся к экструзивно-субвулканическому комплексу нижней части бедамельской серии позднего рифея — венда, а также гранитов и гранодиоритов позднерифейского нияюского комплекса. Наиболее широко распространены интрузии и дайки габбро и габбро-долеритов леквожского комплекса раннего ордовика, ориентированные в северо-восточном направлении и прорывающие породы бедамельской серии и энганепэйской свиты. Все породы района подверглись региональному метаморфизму зеленосланцевой фации.

Для центральной части района характерны крупные разрывные нарушения преимущественно север-северо-восточного простирания. К ним приурочены тела габбро и габбро-долеритов, зоны интенсивного рассланцевания и дробления пород, их метасоматические изменения (серцитизация, хлоритизация, эпидотизация).

Золотосульфидно-кварцевые и золотосульфидные проявления Манитаньрдского района располагаются цепочкой вдоль Нияюской рудной зоны — линейно вытянутой тектонической структуры северо-восточного простирания (рис. 1). Месторождение Верхненияюское-2 локализуется в вулканиках бедамельской серии, все остальные рудопроявления — в вулканогенно-терригенных породах энганепэйской свиты.

Рудопроявление Верхнелекелецкое расположено в юго-западной части Нияюской рудной зоны, в истоках р. Лек-Елец (рис. 1; 2, а). Оно локализуется в краевой части дайки долеритов мощностью от 4 до 6 м. По данным предшественников долериты отнесены к леквожскому комплексу нижнего ордовика (рис. 2, а). Рудная зона представляет собой полосу метасоматитов переменной мощности (0.5—2 м), параллельную контакту дайки, с вкрапленной сульфидной минерализацией, четковидной кварцевой жилой и многочисленными прожилками, также содержащими сульфидную (золото-арсенопирит-пиритовую) минерализацию. Породы дайки и рудной зоны разбиты густой сетью трещин. Кварцевая жила имеет максимальную мощность 40 см и протяженность около 5 м. Руды массивные и густо вкрапленные (рис. 2, б).

Рудопроявление было открыто в 1983 г. Н. И. Хорошкевым по результатам металлометрической и золотометрической съемок, проведенных в 1963—1964 гг. и выявивших на этой площади аномальные содержания мышьяка и золота. В траншее-расчистке № 1540, заложенной в краевой части дайки габбро-долеритов, была вскрыта четковидная кварц-пирит-арсенопиритовая жила с максимальными содержаниями золота — 3.3 г/т, серебра — 18 г/т (рис. 2, б) и сопутствующих элементов (%): Pb — до 0.7, Cu — до 0.02, Hg — до 0.5—3.0. В массивных и густо вкрапленных пиритовых рудах без кварца содержание золота падает до 0.1—0.45 г/т и до 0.05 г/т в самих габбро-долеритах. В 1988 г. А. М. Чулаевским на рудопроявлении выявлена наиболее яркая аномалия (№ 100) площадью 0.578 км², в которой содержания Au, As, Bi, Cu, Mo, Co достигают

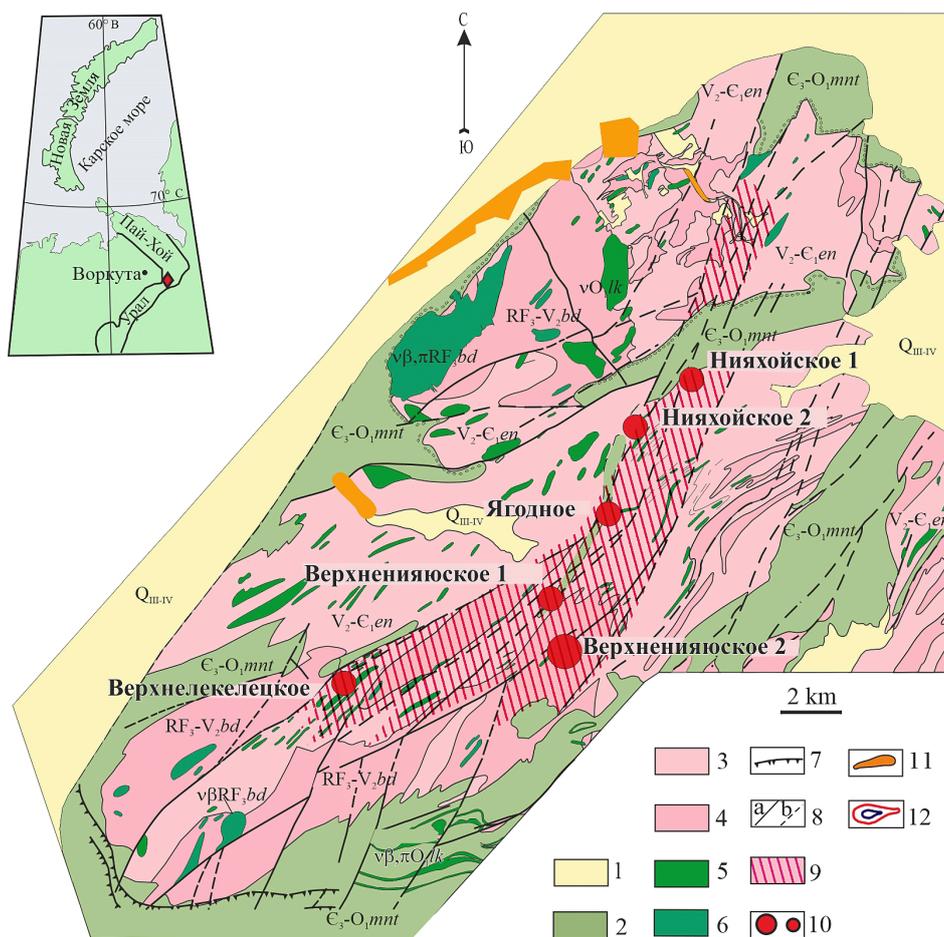


Рис. 1. Геологическое строение района и золоторудные проявления Манитаньрдского района (с дополнениями и изменениями [3]):

1 — четвертичные отложения; 2 — манитаньрдская серия нерасчлененная (верхний кембрий — нижний ордовик); 3 — энганепейская свита (верхний венд — нижний кембрий); 4 — бедамельская серия нерасчлененная (верхний рифей — венд). Интрузии: 5 — леквожский комплекс: оливиновые габбро и долериты, пикродолериты; 6 — нижнебедамельский комплекс: габбро, габбро-долериты; 7 — тектонические покровы; 8 — разрывные нарушения: а — достоверные, б — предполагаемые; 9 — Нияйская рудная зона; 10 — золоторудные месторождения (а) и проявления (б); 11 — россыпные проявления золота; 12 — моноэлементные аномалии золота и свинца

Fig. 1. Geological structure of the region and gold ore occurrences of the Manitanyrd region (with additions and changes, [3]).

1 — Quaternary deposits; 2 — undivided Manitanyrd series (Upper Cambrian — Lower Ordovician); 3 — Enganepe formation (Upper Vendian — Lower Cambrian); 4 — undivided Bedamel series (Upper Riphean — Vendian). Intrusions: 5 — Lekvozhsy complex: olivine gabbro and dolerites, picrodolerites; 6 — Nizhnebedamel complex: gabbro, gabbrodolerites; 7 — tectonic covers; 8 — disjunctive dislocations: a — reliable, b — probable; 9 — Niyayu ore zone. 10 — gold deposits (a) and occurrences (b); 11 — alluvial occurrences of gold. 12 — monoelement anomalies of gold and lead

рудогенного уровня. Размах содержаний в контуре аномалий золота (в $n \cdot 10^{-3}$ г/т) — 2—250 при среднем содержании 17 и местном геохимическом фоне 1.

Макроскопически строение рудной зоны характеризуется брекчиевидной текстурой. В брекчии выделяются обломки удлиненно-угловатой формы светло-зеленого цвета с мелкопятнистой текстурой и четкими границами, насыщенные тонкой вкрапленностью пирита, и овальной формы серого цвета, в которых также отмечается рассеянная вкрапленность пирита (рис. 3).

Кварцевые прожилки с густо вкрапленной рудной минерализацией тяготеют к границам обломков, реже секут их, утыкаясь при этом в границы соседнего обломка (рис. 3, d). В пределах штупа они образуют ко-

ротки (от 2 до 10 см) субпараллельные или разноориентированные (иногда линзовидные) прожилки толщиной от 2—8 мм до 1.5—2.0 см (рис. 3, с, d). Границы прожилков часто также субпараллельны (рис. 3, с). Кварц серый, в более крупных прожилках в центральной части отмечаются участки светло-серого кварца. Тонкие прожилки почти полностью сложены рудными минералами с подчиненным количеством кварца, в более толстых прожилках рудная минерализация тяготеет к зальбандам. Кварцевые прожилки с обильной рудной минерализацией являются, по-видимому, самими поздними, поскольку выполняют трещины между обломками в брекчии и утыкаются в границы обломков. Сама рудная брекчия, скорее всего, имеет тектоническое происхождение.

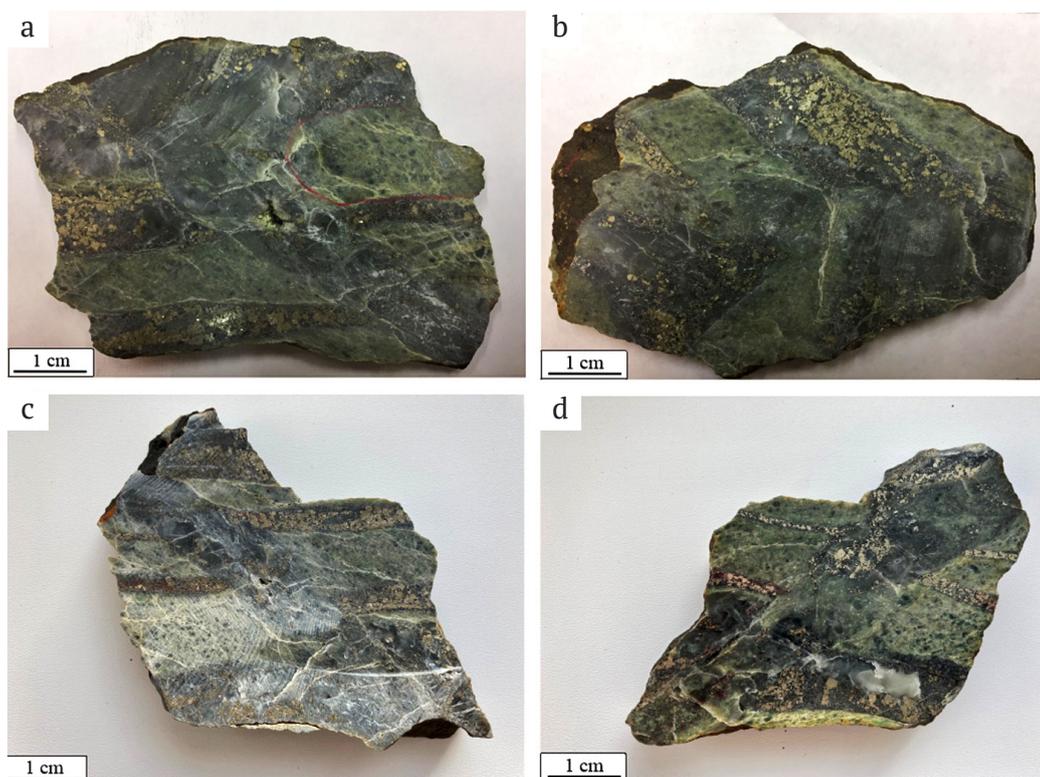


Рис. 3. Брекчиевидная макротекстура руды, распределение кварц-сульфидных прожилков
Fig. 3. Brecciated macrotexture of the ore, distribution of quartz-sulfide veinlets

Материал и методы

Материалом для исследования послужил штуф руды с проявлениями Верхнелекеецкое из коллекций Л. И. Ефановой. Для изучения состава рудовмещающих пород и руд были изготовлены шлифы и аншлифы. Петрографические и минералогические исследования проводились в ЦКП «Наука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар). Микроскопическое описание шлифов выполнялось на оптическом микроскопе Nikon Eclipse LV 100 ND. Текстуры, структуры руд и состав рудных минералов определялся в аншлифах на сканирующем электронном микроскопе «TescanVega» 3 LMN (Tescan, Чехия) с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 (Oxford Instruments, Oxford, UK) (операторы Е. М. Тропников, А. С. Шуйский). Анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 15 нА, диаметре пучка до 1 мкм и времени на регистрацию спектров 600 тыс. импульсов. Для визуализации распределения примеси As в пирите небольшая часть анализов и BSE-изображения выполнены на сканирующем электронном микроскопе ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM с энергодисперсионной приставкой TrueSight EDS 25 mm² (оператор В. А. Радаев). Анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 0.85 мкА, размере пучка 180 нм и области возбуждения до 5 мкм с использованием программного обеспечения xT SEM.

Анализ элементов-примесей в пирите проводился в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург): на Au — методом атомно-абсорбционной спектроскопии, на Co, Ni, Cu, Zn, Ge, Se, Mo, Ag, Sb, Te, Pb, Bi, As — методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Пределы обнаруже-

ния (ppm): Co (0.5), Ni (1.0), Cu (1.0), Zn (1.0), Ge (0.1), Se (0.1), Mo (0.6), Ag (0.01), Sb (0.1), Te (0.2), Pb (1.0), Bi (0.1), As (0.5); Au — 0.002 г/т.

Изотопный анализ серы выполнен в лаборатории стабильных изотопов ЦКП ДВГИ ДВО РАН (Владивосток). Изотопный состав серы пирита определялся на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (ThermoFinnigan, Bremen, Germany) с использованием двойной системы напуска по методике В. А. Гриненко [4]. Анализировались мономинеральные пробы пирита массой 10 мг. Соотношение изотопов серы представлено относительно международного стандарта VCDT. Подготовка образцов для масс-спектрометрического изотопного анализа серы арсенопирита проведена локальным лазерным методом с использованием фемтосекундного комплекса лазерной абляции NWR Femto [13, 15]. Соотношение изотопов серы измеряли на массах 127 (³²SF⁵⁺) и 129 (³⁴SF⁵⁺) на масс-спектрометре MAT-253 (Thermo Fisher Scientific, Germany). Измерения проведены относительно лабораторного рабочего стандарта, калиброванного по международным стандартам IAEA-S-1, IAEA-S-2 и IAEA-S-3. Результаты измерений $\delta^{34}\text{S}$ обоими методами приведены относительно международного стандарта VCDT и выражены в промилле (‰). Точность анализов $\delta^{34}\text{S}$ составляла ± 0.20 ‰ (2 σ).

Рудовмещающие породы

Вмещающая рудную минерализацию порода представляет собой *кварц-биотитсодержащий порфировидный метадолерит*, мелкозернистый, с реликтовой габброфитовой или офитовой структурой (шлиф 1144-1). Порода утратила первичный минеральный состав и со-



стоит из нацело измененного плагиоклаза (55–65 %), амфиболизованного клинопироксена (30–40 %) с небольшим количеством хлоритизированного биотита (2–3 %) и ксеноморфного кварца (2–3 %). Акцессорные минералы — апатит, циркон, сульфиды. Вторичные минералы представлены альбитом, серицитом, соссюритом, амфиболом, хлоритом, титанитом, лейкоксеном.

Плагиоклаз присутствует в виде редких таблитчатых зерен размером 1.5–2 мм или беспорядочно ориентированных табличек размером 0.4–1 мм, нацело альбитизирован, серицитизирован и соссюритизирован. Альбит с двойниковым полисинтетическим строением содержит тонкозернистый эпидот и тонкочешуйчатый серицит, их распределение подчеркивает первично-зональное строение минерала. Реликтовый таблитчатый клинопироксен (размер 0.4–0.8 мм) нацело замещен тускло-зеленой роговой обманкой или агрегатом ее мелких призматических зерен. Роговая обманка, в свою очередь, пятнами хлоритизирована с выделением сгустков титанита. Биотит и кварц размером от 0.2–0.7 до 1–1.2 мм располагаются по границам породообразующих минералов, обрастают зерна клинопироксена. Биотит полностью хлоритизирован с выделением нитевидно-струйчатых скоплений титанита. Кварц выполняет промежутки между породообразующими минералами, корродирует их или образует с ними сростки. Встречаются призматические кристаллы циркона размером около 0.2 мм и зерна апатита размером от 0.05 до 0.2 мм. Рудный минерал представлен лейкоксенизированным ильменитом или титаномагнетитом, образует ксеноморфные зерна размером 0.1–0.3 мм, часто обрастается биотитом.

В рудной зоне по метадолериту развивается *пирит-серицит-кварцевый метасоматит* (шл. 1144-2, 1145-1, 1145-2). Текстура сланцеватая, полосчатая с элементами пятнистой. Структура лепидогранобластовая с элементами реликтовой (магматической?). Порода состоит из агрегата разноморфного кварца (40–70 %), тонкочешуйчатого серицита (30–60 %) с незначительным количеством лейкоксена и титанита (1–2 %), с единичными зернами циркона. В них присутствует неравномерная рассеянная вкрапленность сульфидов (от 2–3 до 10–15 %).

Матрикс породы сложен кварц-серицитовым агрегатом. Резко возрастает количество кварца, который имеет радиально-волнистое погасание, иногда однородную оптическую ориентировку. Кварц образует мелко- и среднезернистый агрегат зерен размером 0.1–0.8 мм, развитых в виде пятен или стебельчатых выделений, обрастающих пирит. Встречаются участки зерен кварца, цементирующегося пылеватым агрегатом рудного минерала. Серицит в виде ориентированных листочков со слабой желтоватой окраской, размером 0.005–0.02 мм (в результате частичной перекристаллизации, с укрупнением до 0.1 мм) развит совместно с кварцем. Среди них в незначительном количестве присутствует радиально-лучистый альбит, который совместно с кварцем обрастает кристаллики пирита. Лейкоксен в парагенезисе с медово-желтым титанитом располагается в серицит-кварцевом матриксе породы или образует псевдоморфозы по реликтовым вкрапленникам темноцветного минерала. Отмечается присутствие единичных мелких (0.05 мм) призмочек

циркона. Кристаллы сульфидов размером от 0.05 до 1 мм довольно многочисленны, на них наблюдаются каемки стебельчатого кварца.

Порода, подвергаясь метасоматозу, практически утратила первичное строение и состав, но присутствие псевдоморфоз по плагиоклазу и темноцветному минералу, а также скоплений лейкоксена позволяет предположить ее первично-магматическую природу и основной состав, что, впрочем, прекрасно видно в обнажении.

Минеральный состав руд

В кварцевых прожилках текстура руд полосчатая, от густо до убого вкрапленной, местами гнездовая. Структура преимущественно гипидиоморфнозернистая, мелко- и среднезернистая. Размер рудных минералов колеблется в широких пределах — от 0.1 до 1 мм, но некоторые прожилки выполнены агрегатом более крупных зерен сульфидов, в основном пирита — до 2 мм.

По минеральному составу руды являются пиритовыми с подчиненным количеством арсенопирита, который, однако, на некоторых участках преобладает. Неравномерность распределения пирита и арсенопирита в рудных прожилках и их взаимоотношения хорошо проявляются на многослойных картах ЭДС распределения элементов (рис. 4).

Основным второстепенным минералом на рудопроявлении является сфалерит. В рудных прожилках скопления сфалерита располагаются полосами, образуя вместе с пиритом и арсенопиритом полосчатую текстуру (рис. 5), или отдельными гнездами.

Пирит

Пирит чаще всего образует выделения неправильной, близкой к изометричной формы (рис. 4, а) или гипидиоморфные кристаллы (рис. 5, а), реже кристаллы кубической формы (рис. 4, б). Большинство кристаллов и зерен пирита сильно трещиноватые, подвергшиеся катаклазу. Основной примесью в пирите является As, содержание которого колеблется от 0.29 до 3.14 мас. % (среднее — 1.53 мас. %), в части зерен пирита примесь As не обнаружена. Проанализировано 50 зерен пирита, выполнено 59 определений их состава. Частота встречаемости примеси As в пирите составила 59 %. При этом на участках, обогащенных арсенопиритом, всегда присутствует примесь As в пирите, а на участках преимущественного развития пирита примесь As в нем не фиксируется. В табл. 1 приведены типичные анализы состава пирита с высокими и низкими значениями содержания As, без примеси As (не обнаружена), при этом сохранена частота встречаемости примеси.

Достаточно часто встречаются зерна пирита, в которых примесь As распределена неравномерно. На BSE-изображениях участки пирита, обогащенные примесью As, имеют более светлый тон и более темный тон, если примесь As не обнаружена (рис. 6). Однако контраст между участками едва различим, хотя разница в содержании примеси As может достигать 3 мас. % (рис. 6, с).

Неравномерное распределение примеси As выявляет неоднородное строение зерен пирита. Четкой зо-

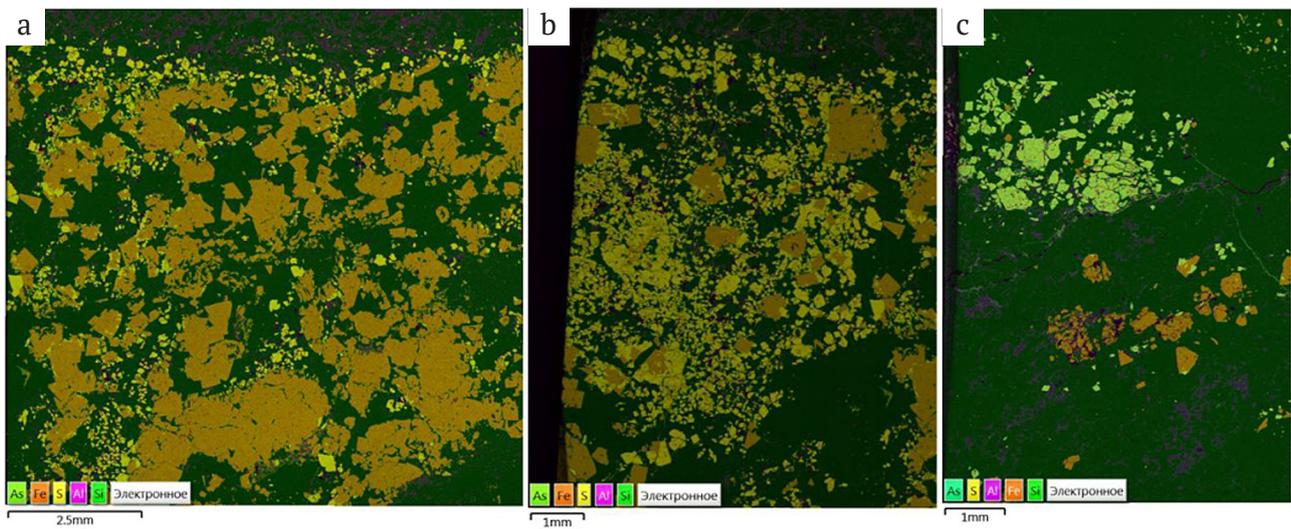


Рис. 4. Соотношение и взаиморасположение пирита и арсенопирита в рудных прожилках проявления Верхнелекеецкое: а — преобладает пирит (анш. ЛК-1, участок 2), б — преобладает арсенопирит (анш. ЛК-1, участок 1), с — арсенопирит (зеленое) и пирит (коричневое) разобщены в пространстве (анш. ЛК-1, участок 3)

Fig. 4. Ratio and arrangement of pyrite and arsenopyrite in ore veinlets of the Verkhnelekeletskiye occurrence: a — pyrite predominates (sec. LK-1, site 2), b — arsenopyrite predominates (sec. LK-1, site 1), c — arsenopyrite (green) and pyrite (brown) are separated in space (sec. LK-1, area 3)

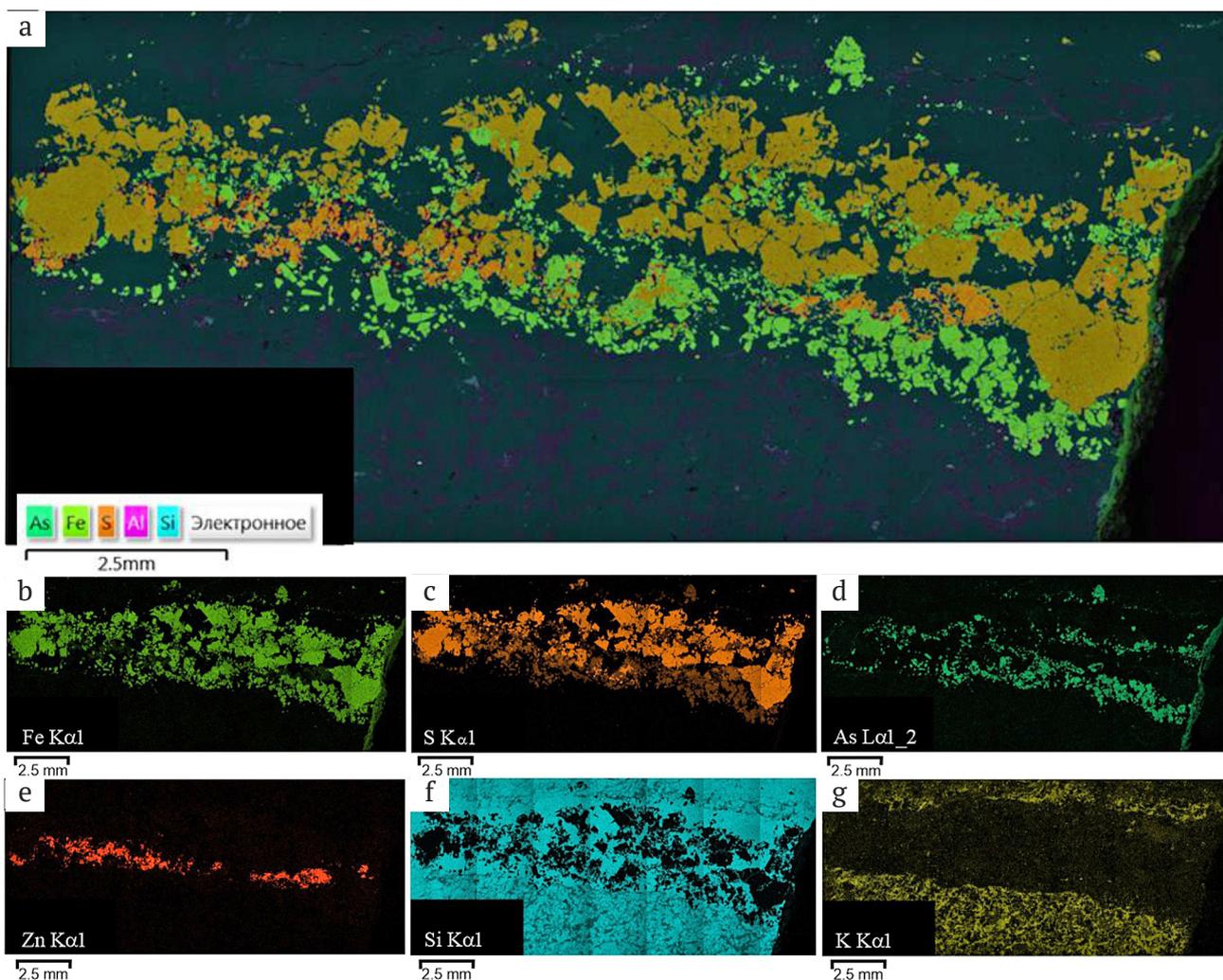


Рис. 5. Взаимоотношения пирита, арсенопирита и сфалерита в рудных прожилках проявления Верхнелекеецкое (а), поэлементные карты распределения рудных (б–е) и породообразующих (f, g) элементов, которые показывают распределение кварца и серицита

Fig. 5. Interrelations of pyrite, arsenopyrite, and sphalerite in ore veinlets of the Verkhnelekeletskiye occurrence (a), elemental maps of the distribution of ore (b–e) and rock-forming (f, g) elements, which show the distribution of quartz and sericite



Таблица 1. Химический состав пирита (мас. %)
Table 1. Chemical composition of pyrite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Fe	As	S	Сумма / Total
ЛК-1	2-14	47.05	0.72	52.26	100.03
	2-15	46.73	0.53	52.55	99.81
	3-3	46.50	2.61	50.85	99.96
	3-5	46.80	н.о.	52.69	99.48
ЛК-2	1-2	45.32	2.36	51.99	99.68
	2-13	45.82	н.о.	54.10	99.92
ЛК-4	6-4	46.11	н.о.	53.19	99.30
	13-3	45.56	0.29	52.65	98.50
	14-2	45.59	3.14	51.16	99.90
ЛК-8	3-2	46.78	н.о.	53.87	100.65

Примечание. Н. о. — не обнаружено. Анализ выполнен на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMH (предел обнаружения As ≤ 0.2 мас. %).

Note. Н. о. — not detected. The analysis was performed with TESCAN VEGA 3 LMH scanning electron microscope (detection limit As ≤ 0.2 wt. %).

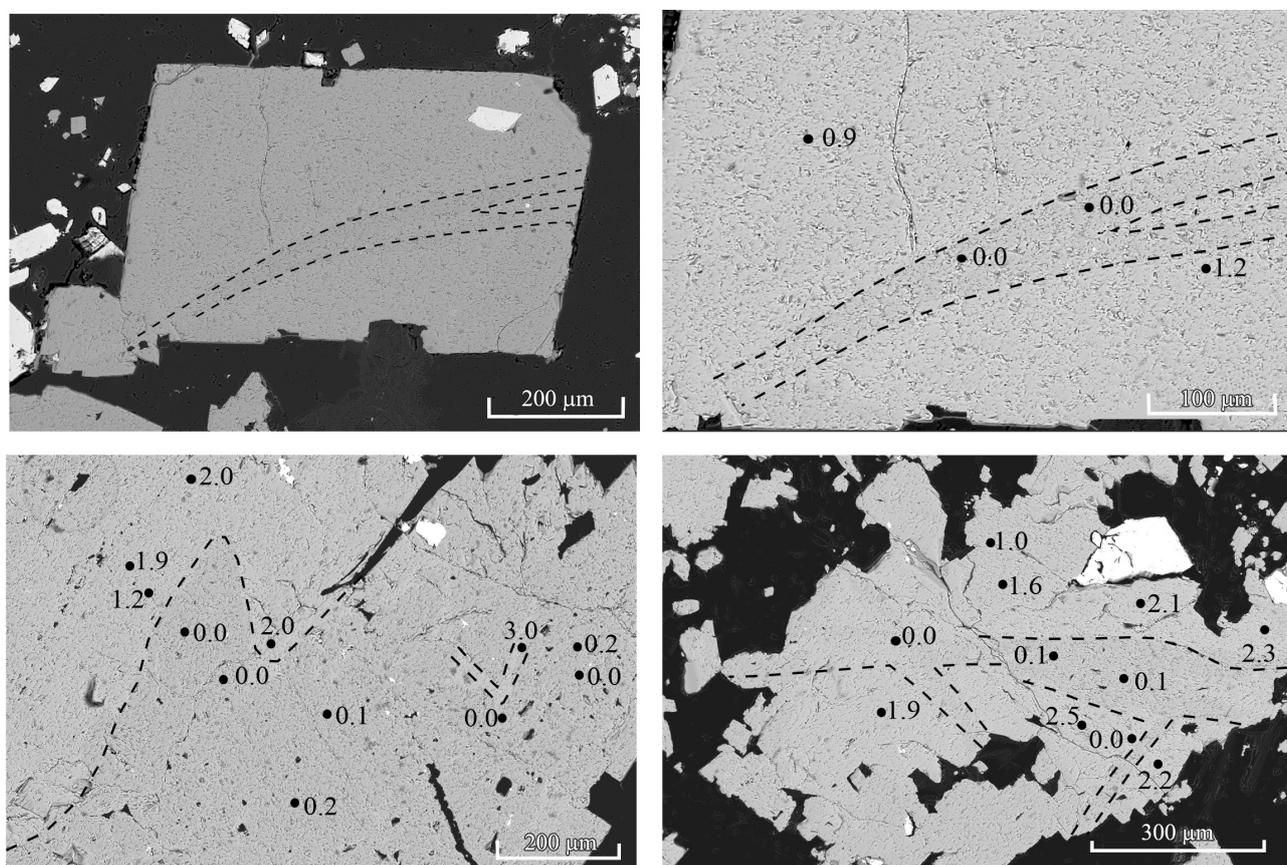


Рис. 6. Неясно-зональное распределение примеси мышьяка в кристаллах пирита. На фото показаны точки анализа, цифры — содержание As, мас. %. BSE-изображения и анализы состава пирита выполнены на сканирующем электронном микроскопе ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM (предел обнаружения As ≤ 0.1 мас. %)

Fig. 6. Vague zonal distribution of arsenic impurities in pyrite crystals is unclear. The photo shows analysis points, the numbers show the As content, wt. %. BSE images and analyzes of the pyrite composition were performed with ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM scanning electron microscope (detection limit As ≤ 0.1 wt. %)

нальности в распределении As наблюдать не удалось, но имеется тенденция обогащения As внешних зон выделений пирита (рис. 6). По-видимому, содержание As возросло в гидротермальном растворе к концу процесса, причем прирост содержания As в пирите достигал 3 мас. %.

Арсенопирит

Арсенопирит образует кристаллы ромбо-призматического габитуса или гипидиоморфные выделения (рис. 7, а–с). Размеры зерен арсенопирита лежат в пре-

делах от 0.02 до 0.2 мм. Основной примесью в арсенопирите является Sb, ее содержание колеблется от 0.26 до 1.80 мас. % (среднее — 0.84 мас. %), в части зерен примесь Sb не обнаружена. Выполнено порядка 70 определений состава арсенопирита, проанализировано 60 зерен. Частота встречаемости примеси Sb в арсенопирите составила 32 %. В табл. 2 приведены типичные анализы состава арсенопирита с максимальным разбросом содержаний примеси Sb.

Достаточно часто встречаются зональные кристаллы арсенопирита (рис. 7, b, c, d, f). В их центральных частях в виде ядра или в краевой части наблюда-

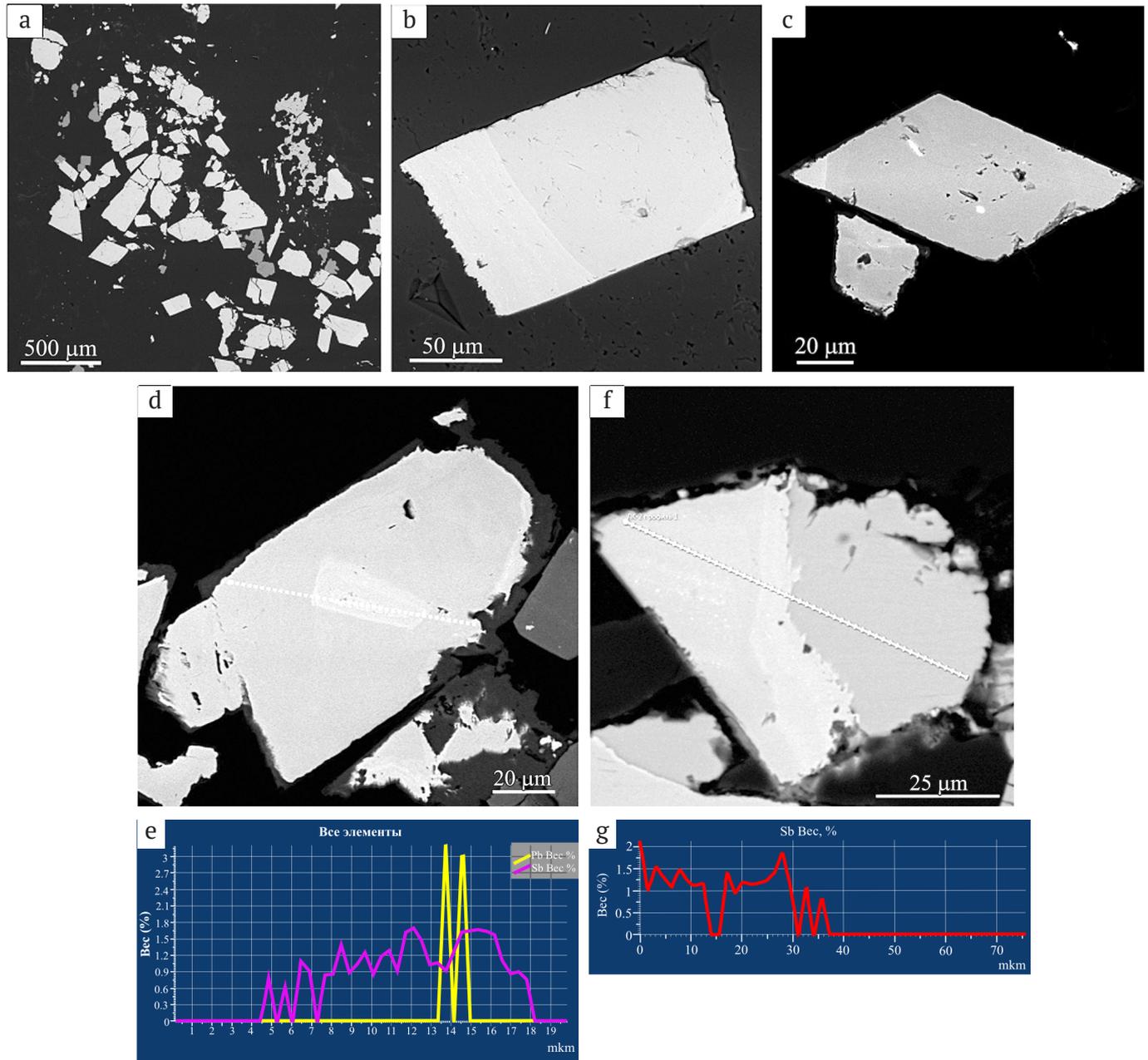


Рис. 7. Арсенопирит: гипидиоморфные выделения (а) и кристаллы (b, c) (анш. ЛК-3/2, ЛК-4); зональные кристаллы арсенопирита: центральная светлая зона с галенитом (белые точки) и фазой состава Pb-Sb-S (серое) (d), распределение Pb и Sb в профиле через центральную зону зерна арсенопирита (e) (анш. ЛК-1/6); сросток арсенопирита с эмульсионной вкрапленностью Pb-Sb-S и сфалерита (справа) (f), распределение Sb в профиле I-II (g) (анш. ЛК-2/4)

Fig. 7. Arsenopyrite: hypidiomorphic segregations (a) and crystals (b, c) (sec. LK-3/2, LK-4); zoned arsenopyrite crystals: central light zone with galena (white dots) and Pb-Sb-S phase (gray) (d), distribution of Pb and Sb in the profile through the central zone of arsenopyrite grains (e) (sec. LK-1/6); intergrowth of arsenopyrite with emulsion dissemination of Pb-Sb-S and sphalerite (right) (f), Sb distribution in profile I-II (g) (sec. LK-2/4)



Таблица 2. Химический состав арсенопирита (мас. %)
 Table 2. Chemical composition of arsenopyrite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Fe	As	Sb	S	Сумма / Total
ЛК-1	1-6	38.19	38.13	0.30	23.70	100.32
	2-10-1	36.79	38.67	1.58	22.63	99.67
ЛК-2	2-2	34.22	43.94	н.о.	21.85	100.01
	2-7	34.28	42.59	0.91	22.69	100.47
	4-1	33.72	44.23	1.32	20.8	100.07
ЛК-3	2-3	34.65	42.32	0.42	22.55	99.94
	2-4	34.62	42.98	н.о.	22.39	99.99
	2-5	34.51	42.30	0.26	22.13	99.21
	2-8	33.26	44.54	1.80	20.04	99.63
ЛК-4	17-1	34.27	43.00	н.о.	21.77	99.04

Примечание. Н. о. — не обнаружено. Анализ выполнен на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMN (предел обнаружения Sb ≤ 0.2 мас. %).

Note. Н. о. — not detected. The analysis was performed with TESCAN VEGA 3 LMN scanning electron microscope (detection limit Sb ≤ 0.2 wt. %).

ются более светлые по тону участки с эмульсионной вкрапленностью ярких точек. Эти участки обогащены Sb и Pb (рис. 7, е) или только Sb (рис. 7, г). Более темная зона арсенопирита имеет обычный состав и не содержит Sb. Яркие точки представляют собой фазу состава Pb-Sb-S с переменным соотношением Pb и Sb размером 300–400 нм или PbS (галенита) такой же размерности. Точная диагностика этих нановыделений затруднена из-за чрезвычайно малых размеров, определения проведены на качественном уровне по наличию характерных элементов.

Спорадически в составе арсенопирита отмечается примесь Ni в количестве от 0.89 до 2.88 мас. %.

Сфалерит

Сфалерит образует ксеноморфные выделения размером до 0.2 мм в ассоциации с арсенопиритом и пиритом (рис. 5; 7, ф). Рассеянная вкрапленность хорошо образованных выделений сфалерита размером от 5 до 20 мкм встречается в кварце, рядом располагаются кристаллики рутила и выделения галенита размером около 5 мкм каждый. Выполнено 21 определение состава сфалерита. В табл. 3 приведены результаты анализов наиболее типичных составов минерала.

Сфалерит характеризуется стабильным составом. Основными примесями в нем являются Fe с общим колебанием содержания от 5.68 до 7.25 мас. % (разница в значениях — 1.57 мас. %, среднее — 6.75 мас. %) и Cd — от 0.49 до 0.92 мас. % (разница в значениях — 0.43 мас. %, среднее — 0.68 мас. %).

Тетраэдрит

Тетраэдрит является одним из наиболее распространенных редких минералов в рудопроявлении Верхнелекелецкое. Минерал образует тонкую рассеянную вкрапленность в кварце наряду с другими сульфидными (пиритом, арсенопиритом, сфалеритом, пирротинитом, галенитом) и нерудными — слюдой, титанитом. Тетраэдрит образует индивидуальные ксеноморфные выделения в интерстициях между зернами кварца. Размер выделений 4–5 мкм. Чаше тетраэдрит отмечается в виде микровключений размером от 2 до 20 мкм в пирите, редко в сфалерите. В составе тетраэдрита постоянно присутствует примесь Ag (1.08–3.81 мас. %), Zn (0.62–4.94 мас. %), Fe (3.53–5.94 мас. %, иногда до 8.91 мас. %) (табл. 4).

Усредненная эмпирическая формула тетраэдрита: $(\text{Cu}_{9.02}\text{Fe}_{1.90}\text{Zn}_{0.75}\text{Ag}_{0.33})_{12.00}\text{Sb}_{4.04}\text{S}_{12.96}$.

Таблица 3. Химический состав сфалерита (мас. %)
 Table 3. Chemical composition of sphalerite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Zn	Fe	Cd	S	Сумма / Total
ЛК-1	4-1	59.34	7.25	0.62	33.28	100.49
	4-4	59.85	6.19	0.49	33.12	99.65
	7-2	58.83	7.08	0.75	33.15	99.80
	7-3	61.23	5.68	0.53	32.76	100.20
ЛК-2	2-17	57.53	6.77	0.63	34.17	99.10
	2-19	57.08	6.69	0.92	33.41	98.10
ЛК-3	1-6	57.81	6.82	0.82	34.23	99.69
	1-9	58.22	6.96	0.83	34.09	100.11
	1-10	57.72	6.82	0.79	34.28	99.61
	2-13	58.81	5.90	0.73	34.37	99.81

Таблица 4. Химический состав тетраэдрита (мас. %)
Table 4. Chemical composition of tetrahedrite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Cu	Fe	Sb	S	Zn	Ag	Сумма/ Total
ЛК-3	15-1	34.4	5.40	30.40	25.65	1.60	2.03	99.48
	16-1	32.9	4.67	29.05	24.83	1.67	1.73	98.89
	17-1	34.13	5.34	30.57	25.41	1.11	3.20	99.77
ЛК-4	18-1	32.22	5.94	28.24	24.63	4.94	3.02	98.98
	22-3	34.49	5.38	29.29	24.52	2.83	1.61	98.11

Сульфосоли

На рудопроявлении Верхнелекелецкое нами обнаружен минерал системы Pb-Sb-S. Он встречается в виде микровключений в пирите и арсенопирите, имеет широкий диапазон размерности — от 500 нм, чаще 2–10 мкм, редко до 50 мкм. Наблюдаются как его индивидуальные выделения, так и сростки с галенитом, тетраэдритом и халькопиритом. В редких случаях отмечаются его сростки с пиритом в кварце (рис. 8, а). Состав минеральных фаз переменный, содержание основных компонентов составляет (мас. %): Pb — 55.33–56.19; Sb — 24.07–25.84; S — 17.00–20.10 (табл. 5). В системе Pb-Sb-S (сульфосоли или сульфоантимониды) выделяется несколько групп минералов: плагионита, буланжерита, робинсонита, моёлоита — всего 9 минералов,

которые отличаются разным соотношением основных компонентов (рис. 8). На тройной диаграмме Pb-Sb-S составы минералов проявления Верхнелекелецкое располагаются близко к точке состава буланжерита (рис. 8). Предварительно можно диагностировать минерал состава Pb-Sb-S, обнаруженный на проявлении Верхнелекелецкое как буланжерит. Средний химический состав пересчитывается на формулу $Pb_{5.33}Sb_{4.1}S_{10.90}$.

На проявлении Верхнелекелецкое нами установлены минералы никеля — ульманнит и герсдорфит.

Ульманнит

Минерал образует выделения изометричной формы или частично ограниченные кристаллы в кварце (рис. 9). Встречается в сростках с пирротинном. Размер

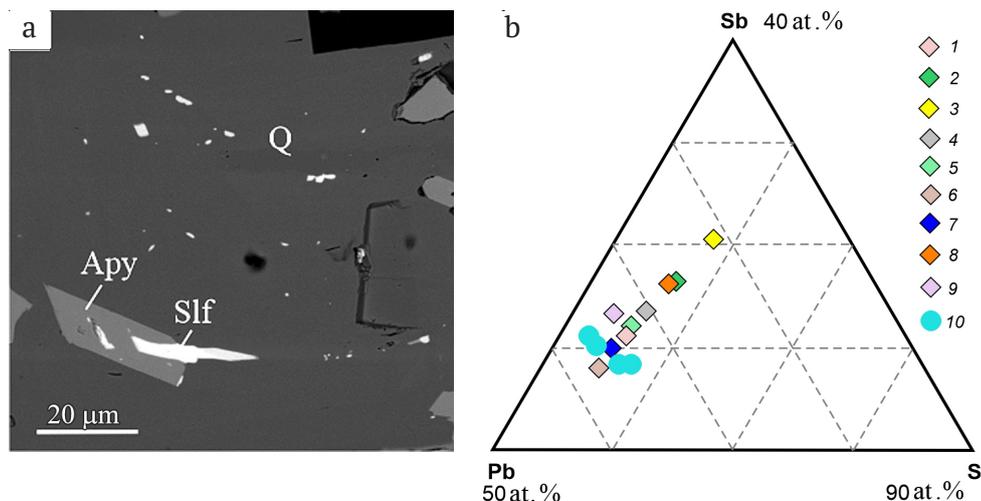


Рис. 8. Сросток минерала системы Pb-Sb-S (Slf) с арсенопиритом в кварце (а); диаграмма состава минералов системы Pb-Sb-S (b) (1 — семсейит, 2 — плагионит, 3 — фюлеппит, 4 — гетероморфит, 5 — плюмосит, 6 — фалькманит, 7 — буланжерит, 8 — робинсонит, 9 — моёлоит, 10 — сульфосоли рудопроявления Верхнелекелецкое, табл. 5)

Fig. 8. Intergrowth of a mineral of the Pb-Sb-S (Slf) system with arsenopyrite in quartz (a); diagram of compositions of minerals of the Pb-Sb-S system (1 — semseite, 2 — plagionite, 3 — fuleppite, 4 — heteromorphite, 5 — plumosite, 6 — falkmanite, 7 — boulangerite, 8 — robinsonite, 9 — moeloite, the sulfosalt of the Verkhnelekeletskeye ore occurrence, table 5)

Таблица 5. Химический состав сульфосоли (мас. %)
Table 5. Chemical composition of sulfosalt (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Pb	Fe	Sb	S	Сумма / Total
ЛК-1	5-3	49.55	1.96	21.21	17.38	90.09
	5-5	48.87	2.54	21.71	17.75	90.86
ЛК-2	3-1	55.51	1.47	25.84	17.00	99.82
ЛК-6	2-1	56.19	н.о.	25.40	17.79	99.38

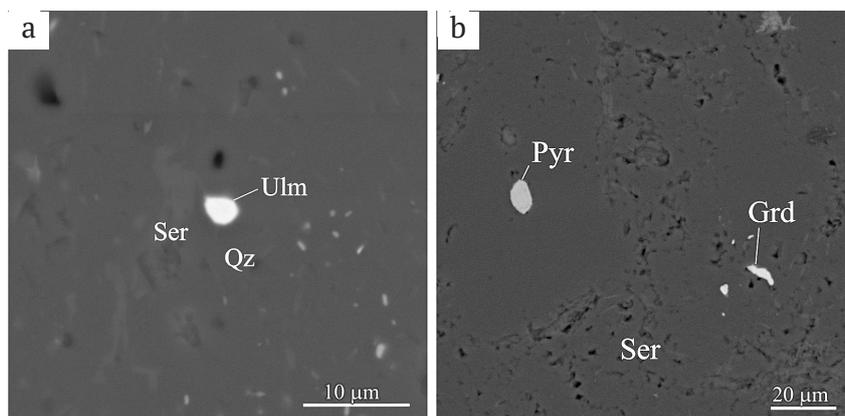


Рис. 9. Ульманнит (Ulm) в серицит-кварцевом (Ser-Qz) агрегате (a), герсдорфит (Grd) и пирротин (Pyr) (b)
Fig. 9. Ulmannite (Ulm) in sericite-quartz (Ser-Qz) aggregate (a), gersdorfite (Grd) and pyrrhotite (Pyr) (b)

Таблица 6. Химический состав ульманнита (мас. %)
Table 6. Chemical composition of ulmannite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Ni	Sb	As	S	Сумма / Total
ЛК-3	14-1	26.46	56.47	1.79	15.26	99.99
	18-1	26.45	56.80	1.17	15.03	99.45
	19-1	25.87	56.93	1.46	15.25	99.50
ЛК-6-1	4-1	26.64	56.15	1.90	15.04	99.73
	5-1*	26.37	55.56	2.52	14.82	99.92
	25-1	26.13	56.52	2.16	15.87	100.69

Примечание. *В результатах анализа присутствует Fe (0.65 мас. %) из вмещающего арсенопирита.

Note. * The analysis results contain Fe (0.65 wt. %) of host arsenopyrite.

Таблица 7. Химический состав герсдорфита (мас. %)
Table 7. Chemical composition of gersdorfite (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Ni	Co	As	S	Fe	Ti	Si	Сумма / Total
ЛК-2	9-3	16.49	2.13	37.94	21.78	14.15	1.19	6.93	100.61
ЛК-6-1	21-1*	24.33	н.о.	47.43	20.46	8.12	н.о.	н.о.	101.03

Примечание. *В результатах анализа фиксируется Sb (0.69 мас. %).

Note. * 0.69 wt. % Sb is recorded in the analysis results.

выделений от 3 до 20 мкм. Химический состав (табл. 6) пересчитывается на формулу $Ni_{0.95}Sb_{0.98}As_{0.03}S_{0.99}$.

Герсдорфит

Минерал встречается в единичных выделениях удлиненной формы, размером около 2 мкм в кварце в сростании с пирротинном, отсюда высокие содержания Si и Fe в результатах анализа (табл. 7, ан. 9–3). Зерно размером 10 мкм в кварце с примесью серицита, рядом расположено выделение пирротина (рис. 9). Химический состав пересчитывается на формулу $(Ni_{0.63}Co_{0.08})_{0.71}As_{1.14}S_{0.86}$.

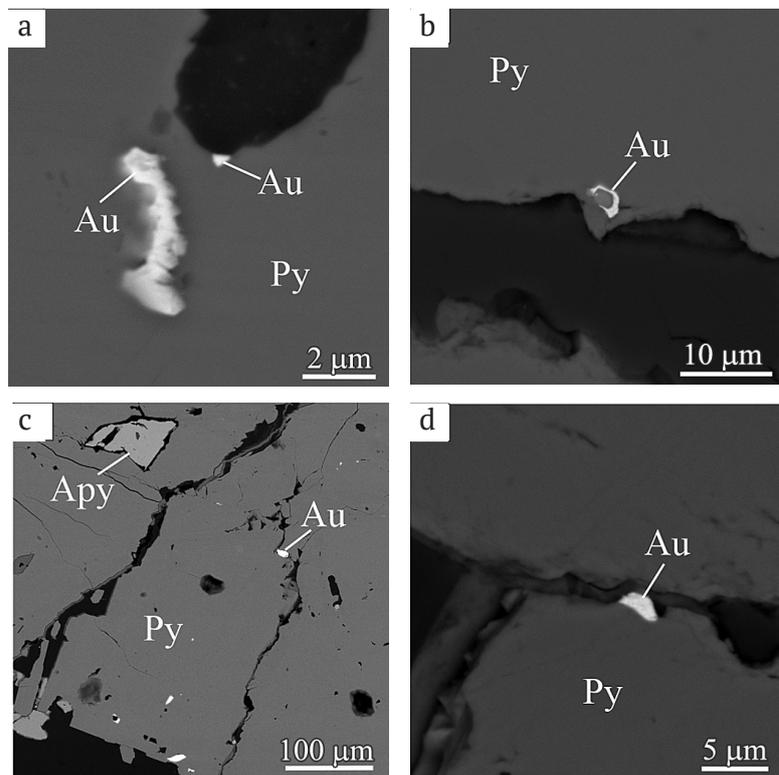
Золото

В рудах проявления Верхнелекеецкое золото обнаружено только в виде субмикронных включений в пирите и арсенопирите. Установлено 18 золотинок размером от 300–500 нм до 10 мкм, в большинстве

1–5 мкм. Из-за малых размеров частиц золота, сопоставимых с размером области генерации рентгеновского излучения, часть полученных анализов состава золота нельзя считать количественными. Если минимальный размер исследуемого объекта около 1 мкм, сумма элементов приведена к 100 %. Форма золотинок близка к изометричной, редко встречается удлиненная. Как правило, приуроченности частиц золота к трещинкам в пирите и арсенопирите не наблюдается (рис. 10).

Основной примесью в золоте является серебро, содержание которого колеблется от 14.42 до 27.65 мас. % (табл. 8). В двух золотинок обнаружены высокие содержания Hg. В связи с этим пробность золота варьирует в широких пределах. Умеренно высокопробного золота (816–857 ‰) — 55 %, средней пробности (724–762 ‰) — 27 %, низкопробного (606–677 ‰) — 18 %.

Кроме описанных выше минералов, в рудах установлены небольшие количества галенита, халькопирита, пирротина, единичные зерна хромшпинелида.


Рис. 10. Золото в пирите:

a — на контакте с рутилом (черное) (ЛК-4-17); b — с высоким содержанием Hg (ЛК-8-1), c — с включениями фазы Pb-Sb-S и галенита (ЛК-2-1), d — с высоким содержанием Hg (ЛК-8-3). BSE-изображения

Fig. 10. Gold in pyrite:

a — on contact with rutile (black) (ЛК-4-17); b — with a high content of Hg (ЛК-8-1), c — with inclusions of Pb-Sb-S phase and galena (ЛК-2-1), d — with a high content of Hg (ЛК-8-3). BSE-images

Таблица 8. Химический состав субмикронного золота в пирите и арсенопирите проявления Верхнеелекецкое (мас. %)

Table 8. Chemical composition of submicron gold in pyrite and arsenopyrite from the Verkhnelekeletskeye occurrence (wt. %)

№ аншлифа Polished section No.	№ анализа Analysis No.	Au	Ag	Hg	Сумма / Total	Пробность, ‰ Fineness, ‰
ЛК-2	1-4	81.81	18.21	н. о.	100.03	818
ЛК-4	16-1	84.66	15.35	н. о.	100.01	845
	17-2	81.54	18.34	н. о.	99.88	816
	17-3	81.58	18.01	н. о.	99.59	819
ЛК-6-1	1-1	72.35	27.65	н. о.	100.00	724
	2-1	84.95	15.05	н. о.	100.00	850
	2-2	74.13	25.87	н. о.	100.00	741
	2-3	76.23	23.77	н. о.	100.00	762
ЛК-6-п-3	22-1	86.23	14.42	н. о.	100.65	857
ЛК-8	1-1	61.58	20.07	9.35	91.00	677
	3-1	56.80	25.91	10.97	93.68	606

Галенит присутствует в виде обособленных включений (размером до 6 мкм) в пирите и арсенопирите или в составе комплексных микровключений с тетраэдритом и фазой Pb-Sb-S. Из-за малого размера выделения анализ состава галенита некорректный, т. к. включает элементы минералов-хозяев (Fe, As) и порообразующих элементов, но вполне уверенно диагностируется по атомному соотношению свинца и серы. Галенит изредка встречается в виде ангедральных выделений в кварце, образуя рассеянную вкрапленность или гнез-

дообразные скопления. Халькопирит встречается редко, в небольшом количестве, образуя микронные включения (до 20 мкм) в пирите и арсенопирите, в виде индивидуальных выделений или в сростках с тетраэдритом и фазой Pb-Sb-S.

Выделения киновари обнаружены предположительно только в одном участке аншлифа. Они представлены тончайшими чешуйками длиной 2–3 мкм, приуроченными к слюдистому агрегату и ориентированными по его слоистости. Из-за крайне малых раз-



меров выделений идентифицировать их как киноварь можно только по присутствию в результатах анализа минералообразующих элементов (Hg и S) и их атомному соотношению. Породообразующие и акцессорные минералы (кроме кварца): серицит, титанит, рутил, монацит, ксенотим, циркон, минералы Th и U.

Изотопы серы

Данные по изотопам серы сульфидов представлены в табл. 9. Сульфиды в рудах проявления Верхнелекелецкое обогащены легким изотопом серы и имеют значения $\delta^{34}\text{S}$ в диапазоне от -1.2 до -3.5 ‰. Вариации значений: $\delta^{34}\text{S}$ от -1.2 до -1.5 ‰ — для пирита, от -2.3 до -3.5 ‰ — для арсенопирита, т.е. арсенопирит имеет несколько более облегченный состав серы. Изотопный состав серы сульфидов проявлений варьирует в весьма узком диапазоне — $\Delta\delta^{34}\text{S} = 2.3$ ‰.

Таблица 9. Изотопные составы серы сульфидов на проявлении Верхнелекелецкое

Table 9. Isotope contents of sulfide sulfur in the Verkhnelekeletskeye occurrence

№ образца Sample No.	Минерал Mineral	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ ‰
LK-1	Пирит / Pyrite	-1.5
LK-2		-1.2
LK-1a	Арсенопирит Arsenopyrite	-2.4
LK-1b		-2.3
LK-1c		-3.5

Обсуждение результатов

Рудопроявление Верхнелекелецкое выделяется среди других золотопроявлений Манитанырдского района по геологическому строению. Это пока единственное обнаруженное проявление, которое локализуется в краевой части дайки габбро-долеритов леквожского комплекса нижнего ордовика.

Рудная минерализация приурочена к зоне брекчирования габбро-долеритов, вмещающей более позднее прожилково-вкрапленное и кварцево-жильное оруденение. В рудной зоне интрузивная порода преобразована и превращена в пирит-серицит-кварцевый метасоматит.

По минеральному составу руды проявления Верхнелекелецкое аналогичны рудам Верхненияюского-2 и Нияхойского-2, но являются преимущественно пиритовыми с подчиненным количеством арсенопирита. В качестве основного второстепенного минерала присутствует сфалерит. В отличие от месторождения Верхненияюское-2, на котором четко проявлена поздняя галенит-халькопирит-сфалеритовая стадия, на проявлении Верхнелекелецкое галенит и халькопирит встречаются только в виде микровключений в пирите и арсенопирите. В отношении редких рудных минералов также наблюдается большое сходство с другими рудопроявлениями. На Верхнелекелецком установлен тетраэдрит, сульфосоли свинца (предположительно буланжерит). Специфическими чертами минералогии рудопроявления является повышенное содержание примеси As в пирите и его зо-

нальное распределение, повышенное содержание и зональное распределение Sb в арсенопирите. Впервые для района здесь обнаружены минералы никеля — ульманнит и герсдорфит.

Золото на рудопроявлении обнаружено только в виде субмикронных включений в пирите и арсенопирите. Основной примесью в золоте является серебро, ртуть встречается спорадически, в отличие от других рудопроявлений, где ртутистое золото встречается часто и имеет типоморфное значение. По распределению пробности золота (умеренно высокопробное и средней пробности) рудопроявление сопоставимо с Нияхойским-2 [8].

Для определения условий образования гидротермальной минерализации традиционно используются методы термобарометрии. Изучение флюидных включений в кварце основных золотопроявлений района (Верхненияюское-1 и -2, Нияхойское-2) позволило установить температурный интервал минералообразования, состав минералообразующих растворов и состав газовой фазы [7, 12]. Для изучения флюидных включений на проявлении Верхнелекелецкое были изготовлены полированные пластинки толщиной 200—300 мкм из кварц-сульфидных прожилков и кварцевых обособлений в самой рудной брекчии. Исследование проводилось на микроскопе Amplival (Carl Zeiss Jena) с использованием длиннофокусного объектива 50×, DW 10.6. При максимальном увеличении флюидных включений визуально не обнаружено. Отсутствие видимых флюидных включений (больше 2 мкм) можно объяснить довольно равномерным поступлением флюидного раствора при минералообразовании, без резких колебаний температур и давлений.

Сульфиды (пирит и арсенопирит) проявления Верхнелекелецкое характеризуются легким изотопным составом серы ($\delta^{34}\text{S} = -0.2 \div -3.5$ ‰), близким к метеоритному стандарту, узким диапазоном вариаций ($\Delta\delta^{34}\text{S} \leq 2.3$ ‰), что обычно свойственно системам с магматическими источниками серы [10, 14]. Это свидетельствует об участии глубинных источников серы в рудообразовании и его связи с магматическими процессами. По этому признаку проявление аналогично месторождению Верхненияюское-2 [7].

Особенности локализации и строения рудопроявления Верхнелекелецкое и минерального состава руд позволяют высказать предположение об условиях его образования. Возраст даек габбро-долеритов леквожского комплекса в Енганепэ-Манитанырдском районе считается раннеордовикским на основании отсутствия интрузий среди карбонатных отложений хантейской свиты среднего ордовика. Это подтверждается данными изотопного датирования Sm/Nd-методом (476 ± 61 млн лет [3]), полученными по монофракциям амфиболов, плагиоклаза и валовому составу габброидов. Однако абсолютный возраст долеритов рудопроявления Верхнелекелецкое не определялся. После становления интрузии в ее краевой части произошло дробление пород с образованием зоны брекчирования. По ослабленной зоне поступали гидротермальные растворы, которые вызвали метасоматические преобразования, в результате которых обломки первичных габброидов превратились в пирит-серицит-кварцевые метасоматиты и были сцементированы кварцем. На следующем этапе при

проявлении сколовых напряжений и раскрытию трещин по ним снова поступали гидротермальные растворы, несущие рудные компоненты. Если принять на основании геологических данных возраст интрузии долеритов раннеордовикским, то возраст золоторудной минерализации можно определить как послераннеордовикский. На настоящий момент на рудопроявлении можно выделить только одну стадию — золото-пирит-арсенопиритовую с тонкодисперсным золотом, сопоставимую с ранней стадией рудообразования на месторождении Верхнеиясское-2 [7]. Вероятно, поздняя (галенит-халькопирит-сфалеритовая) стадия проявилась слабо и представлена микроминерализацией в пирите и арсенопирите.

Заключение

Несмотря на то, что пока свободного золота в рудах проявления Верхнелекелецкое обнаружить не удалось ввиду его недостаточной изученности из-за ограниченного количества материала, рудопроявление представляет интерес для дальнейшей разведки. Содержание золота в руде по данным атомно-абсорбционного анализа составляет 2.16 и 2.65 г/т (ЦЛ ВСЕГЕИ). Возраст дайки долеритов и золото-арсенопирит-пиритовой минерализации остается дискуссионным и требует продолжения исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Республики Коми в рамках научного проекта № 20-45-110006.

Литература

1. Вахрушев С. Н., Макаров А. Б. Минералогическо-геохимические особенности руд и метасоматитов золото-мышьяковых проявлений одного из районов // Геохимия и минералогия первичных и вторичных ореолов. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1986. С. 84–93.

2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Q-41 — Воркута. Объяснительная записка / М. А. Шишкин, А. П. Астапов, Н. В. Кабатов и др. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.

3. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XI (Елецкий). Объяснительная записка / М. А. Шишкин, О.Н. Малых, П.Е. Попов, Л.С. Колесник. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 217 с.

4. Гриненко В. А. Приготовление двуокиси серы для изотопного анализа // Журн. неорганической химии. 1962. № 7. С. 2578–2582.

5. Ефанова Л. И., Карчевский А. Ф. Вариант геолого-поисковой модели золоторудных объектов (минерализованных зон с золотосульфидным оруденением, жильно-прожилковых зон с золото-кварц-сульфидным оруденением) применительно к площади хребта Манитаньрд // Материалы XV Геологического съезда Республики Коми. Т. III. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2009. С. 181–188.

6. Ефанова Л. И., Кузнецов С. К., Тарбаев М. Б., Майорова Т. П. Золотоносность Манитаньрдского района и перспективы наращивания ресурсного потенциала (Полярный Урал) // Руды и металлы. 2020. № 3. С. 39–51.

7. Кузнецов С. К., Майорова Т. П., Сокерина Н. В., Филиппов В. Н. Золоторудная минерализация Верхнеиясского

месторождения на Полярном Урале // Записки РМО. 2011. Ч. СХХХ. № 4. С. 58–71.

8. Майорова Т. П., Ефанова Л. И. Проявление золото-мышьяковистого типа Нияхойское-2 на Полярном Урале (кряж Манитаньрд) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 8. С. 33–41.

9. Майорова Т. П., Устюгова К. С. Минералогические и изотопно-геохимические особенности золоторудных проявлений Енганепэ-Манитаньрдского района (Полярный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 12. С. 4–10.

10. Рай Р., Омото Х. Обзор исследований изотопов серы и углерода применительно к проблеме генезиса руд // Стабильные изотопы и проблемы рудообразования. М.: Мир, 1997. С. 176–212.

11. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГТА, 2001. 622 с.

12. Сокерина Н. В., Зыкин Н. Н., Ефанова Л. И., Шанина С. Н., Симакова Ю. С. Условия формирования кварцевых жил золоторудных проявлений Манитаньрдского района (Приполярный Урал) // Литосфера. 2010. № 2. С. 100–111.

13. Ignatiev A. V., Velivetskaya T. A., Budnitskiy S. Y., Yakovenko V. V., Vysotskiy S. V. and Levitskii V. I. Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femtosecond laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution // Chemical Geology, 2018. V. 493. P. 316–326.

14. Ohmoto H., Rye R. O. Isotopes of sulfur and carbon // Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York. 1979. P. 509–567.

15. Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., Yakovenko V. V., Vysotskiy S. V. An improved femtosecond laser-ablation fluorination method for measurements of sulfur isotopic anomalies ($\Delta^{33}\text{S}$ and $\Delta^{36}\text{S}$) in sulfides with high precision // Rapid Commun. Mass Spectrom, 2019. V. 33. P. 1722–1729.

References

1. Vakhrushev S. N., Makarov A. B. *Mineralogo-geokhimiicheskiye osobennosti rud i metasomatitov zolotomyslysh'yakovykh proyavleniy odnogo iz rayonov* (Mineralogical and geochemical features of ores and metasomatites of gold-arsenic manifestations of one of the regions). Geochemistry and mineralogy of primary and secondary halos. Sverdlovsk, Publishing House of the USC AS USSR, 1986, pp. 84–93.

2. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Ural series. Sheet Q-41 — Vorkuta. Explanatory note. M. A. Shishkin, A. P. Astapov, N. V. Kabatov et al. St. Petersburg: VSEGEI, 2007, 541 p.

3. State geological map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Second edition. Series Polar Urals. Sheet Q-41-XI (Yeletsky). Explanatory note. M. A. Shishkin, O. N. Malykh, P. E. Popov, L. S. Kolesnik. Moscow: MF VSEGEI, 2013, 217 p.

4. Grinenko V. A. *Prigotovleniye dnuokisi sery dlya izotopnogo analiza* (Preparation of sulfur dioxide for isotopic analysis). Journal of Inorganic Chemistry, 1962, No. 7, pp. 2578–2582.

5. Efanova L. I., Karchevsky A. F. *Variants geologo-poiskovoy modeli zolotorudnykh ob'ektov (mineralizovannykh zon s zoloto-sul'fidnym orudneniyem, zhil'no-prozhilkovykh zon s zoloto-kvarc-sul'fidnym orudneniyem) primenitel'no k ploshchadi khrehta Manitanyrd* (A variant of the geological prospecting model of gold objects (mineralized zones with gold-sulfide mineralization, vein-vein zones with gold-quartz-sulfide mineralization) in relation to the area of the Manitanyrd Ridge). Proceedings of



the 15th Geological Congress of the Komi Republic, V. III, Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2009, pp. 181–188.

6. Efanova L. I., Kuznetsov S. K., Tarbaev M. B., Maiorova T. P. *Zolotonosnost' Manitanyrdskogo rayona i perspektivy narschivaniya resursnogo potentsiala* (Polyarnyy Ural) (Gold content of the Manitanyrd region and prospects for increasing the resource potential (Polar Urals)). *Ores and metals*, 2020, No. 3, pp. 39–51.

7. Kuznetsov S. K., Maiorova T. P., Sokerina N. V., Filippov V. N. *Zolotorudnaya mineralizatsiya Verkhneyayuskogo mestorozhdeniya na Polyarnom Urale* (Gold mineralization of the Verkhniayuskoye deposit in the Polar Urals). *Proceedings of RMS*, 2011, Ch. CXXXX, No. 4, pp. 58–71.

8. Mayorova T. P., Efanova L. I. *Proyavleniye zolotomyslyakovistogo tipa Niyakhoyskoye-2 na Polyarnom Urale (kryazh Manitanyrd)* (Niyakhoyskoe-2 occurrence of the gold-arsenic type in the Polar Urals (Manitanyrd Ridge)). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 2019, No. 8, pp. 33–41.

9. Mayorova T. P., Ustyugova K. S. *Mineralogicheskiye i izotopno-geokhimicheskiye osobennosti zolotorudnykh proyavleniy Yengayep-e-Manitanyrdskogo rayona* (Polyarnyy Ural) (Mineralogical and isotope-geochemical features of gold ore manifestations of the Enganepe-Manitanyrdsky region (Polar Urals)). *Vestnik of IG Komi SC UB RAS*, 2015, No. 12, pp. 4–10.

10. Rai R., Omoto H. *Obzor issledovaniy izotopov sery i ugleroda primenitel'no k probleme genezisa rud* (Review of stud-

ies of sulfur and carbon isotopes in relation to the problem of ore genesis). *Stable isotopes and problems of ore formation*. Moscow: Mir, 1997, pp. 176–212.

11. Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Polenov Yu. A. *Mestorozhdeniya zolota Urala* (Ural gold deposits). Yekaterinburg. Publishing house of the USMU, 2001, 622 p.

12. Sokerina N. V., Zykin N. N., Efanova, S. N. Shanina, and Simakova Yu. *Usloviya formirovaniya kvartsevykh zhil zolotorudnykh proyavleniy Manitanyrdskogo rayona (Pripolyarnyy Ural)* (Conditions for the formation of quartz veins of gold ore occurrences in the Manitanyrd region (Polar Urals)), 2010, No. 2, pp. 100–111.

13. Ignatiev A. V., Velivetskaya T. A., Budnitskiy S. Y., Yakovenko V. V., Vysotskiy S. V. and Levitskii V. I. Precision analysis of multisulfur isotopes in sulfides by femtosecond laser ablation GC-IRMS at high spatial resolution. *Chemical Geology*, 2018, V. 493, pp. 316–326.

14. Ohmoto H., Rye R. O. *Isotopes of sulfur and carbon. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York, 1979, pp. 509–567.

15. Velivetskaya T. A., Ignatiev A. V., Yakovenko V. V., Vysotskiy S. V. An improved femtosecond laser-ablation fluorination method for measurements of sulfur isotopic anomalies ($\Delta^{35}\text{S}$ and $\Delta^{36}\text{S}$) in sulfides with high precision. *Rapid Commun. Mass Spectrom*, 2019, V. 33, pp. 1722–1729.

Received / Поступила в редакцию 31.05.2022