



МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ,  
ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 552.08 : 553.08 : 550.42 (571.121)

## Микропримеси в пирите золоторудных проявлений хребта Манитанырд (Полярный Урал)

Ефанова Л. И.<sup>1</sup>, Ковальчук Н. С.<sup>1</sup>, Майорова Т. П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия

<sup>2</sup> Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, г. Сыктывкар, Россия

**Аннотация.** Изучен микроэлементный состав пирита – главного концентратора золота в зонах сульфидизации на рудопоявлениях хребта Манитанырд. Оруденение относится к жильному золото-сульфидно-кварцевому, а также золото-сульфидному типу. Установлен широкий набор рудогенных элементов, являющихся элементами-спутниками золота в пирите, соответствующих геохимическим особенностям поздней галенит-халькопирит-сфалеритовой ассоциации рудного процесса, а также его заключительной стадии, выраженной в появлении элементов, отражающих минералогию блёклых руд, сульфосолей висмута. В пирите из жильных и минерализованных зон, руд месторождения и вторичных литогеохимических аномалий установлен один и тот же набор элементов-спутников золота – Ag, Cu, Zn, Pb, As. В пирите золото-сульфидно-кварцевых жил Au имеет тесные корреляционные связи с основными элементами рудной ассоциации. В пирите минерализованных зон все корреляционные связи Au с рудогенными элементами отсутствуют. Полностью изменяется и парная корреляция между рудогенными элементами. Показано, что выявленные различия корреляционных связей между Au и рудогенными элементами в пирите являются критерием оценки литогеохимических аномалий и позволяют наметить стратегию поисков новых рудных объектов в Манитанырдском районе.

**Ключевые слова:** золото-сульфидно-кварцевая минерализация, минерализованные зоны, пирит, тонкодисперсное золото, литогеохимические аномалии, ICP-MS, Манитанырд, Полярный Урал.

Для цитирования: Ефанова Л. И., Ковальчук Н. С., Майорова Т. П. Микропримеси в пирите золоторудных проявлений хребта Манитанырд (Полярный Урал). Руды и металлы. 2024. № 2. С. 28–45. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10007.

## Microimpurities in pyrite of gold ore occurrences of the Manitanyrd ridge (the Polar Urals)

Efanova L. I.<sup>1</sup>, Kovalchuk N. S.<sup>1</sup>, Mayorova T. P.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> IG FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

<sup>2</sup> Pitirim Sorokin SyktSU, Syktyvkar, Russia

**Annotation.** The microelement composition was studied of pyrite, the main concentrator of gold in sulfidation zones in ore occurrences of the Manitanyrd Ridge. The ore mineralization is assigned to the gold-sulfide-quartz vein and gold-sulfide types. We determined a wide range of ore-forming elements, associated with gold in pyrite. These elements correspond to geochemical features of the late galena-chalcopyrite-sphalerite mineral assemblage of the ore process, as well as to its final stage expressed in the appearance of elements reflecting the mineralogy of gray ores and bismuth sulfosalts. Pyrites from the vein and mineralized zones, from the ores of the deposit and from the secondary lithochemical anomalies, were found to contain the same set of the gold satellite elements: Ag, Cu, Zn, Pb, As. In pyrite of the gold-sulfide-quartz veins, Au has close correlations with the main elements of the ore association. In pyrite of the mineralized zones, all the correlations between Au and the ore-forming elements are absent. The pairwise correlation between the ore-forming elements in these zones also changes completely. It is demonstrated that the identified differences in correlations between Au and the ore-forming elements in pyrite are a criterion for assessment of the lithochemical anomalies and allow one to propose a strategy of prospecting for new ore objects in the Manitanyrd region.

**Keywords:** gold-sulfide-quartz mineralization, mineralized zones, pyrite, fine-dispersed gold, lithochemical anomalies, ICP-MS, Manitanyrd, Polar Urals.

For citation: Efanova L. I., Kovalchuk N. S., Mayorova T. P. Microimpurities in pyrite of gold ore occurrences of the Manitanyrd ridge (the Polar Urals). Ores and metals, 2024, № 2, pp. 28–45. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10007.



**Введение.** Район исследований с многочисленными проявлениями коренного золота (Верхнеияуское-1 и 2, Нияхойское-1 и 2, Ягодное, Верхнелекелецкое) находится на западном склоне Полярного Урала в пределах хребта Манитанырд в административных границах Республики Коми. Открытию рудопроявлений способствовали многочисленные поисковые работы, проведённые в 1960–70 гг. прошлого столетия (А. С. Пекки и А. П. Рауш, 1961; В. А. Колпаков, 1962). Наиболее масштабные разведочные работы с проходкой горных выработок, скважин и двух штолен поставлены на Верхнеияуских и Нияхойских проявлениях (К. Н. Севастьянов и др., 1965). В 1988 г. проведены опытно-методические работы по совершенствованию методики разбраковки и оценки геохимических аномалий, включавшие опробование коренных выходов и бурение единичных скважин (А. М. Чулаевский, 1988). С середины 1980-х гг. началось активное изучение россыпной золотоносности района и кор выветривания (В. И. Повонский, 1983; А. П. Ермоленко, 1988; Н. Г. Новакова, 1992). В 2007–2009 гг. в пределах хребтов Манитанырд и Енганэпэ проведены литохимические поиски по вторичным ореолам рассеяния (Л. И. Ефанова, 2009). В результате наряду с известными рудопроявлениями в районе установлены многочисленные геохимические аномалии Au и его элементов-спутников, большинство из которых не заверено.

В настоящее время Манитанырдский район считается одним из промышленно перспективных золотоносных районов на Полярном Урале [7], однако изученность рудопроявлений и пунктов минерализации остаётся недостаточной. Выявление природы геохимических аномалий по вторичным ореолам рассеяния является актуальной задачей поисков новых рудных объектов в районе. Ключом к пониманию природы этих аномалий могут служить свойства пирита, который является доминирующим минералом-концентратором золота и серебра во многих месторождениях мира и России [3, 10, 21], в том числе в золоторудных проявлениях Манитанырдского района [9, 25]. Кроме того, пирит – важнейший минерал, ко-

торый может содержать субмикроскопическое («невидимое») золото [4, 17, 26], а его состав признан одним из важнейших индикаторов условий рудообразования [5, 13, 27, 28]. Именно поэтому крайне важно провести анализ микроэлементов, входящих в состав пирита, определить характер минеральных включений, установить связи между элементами-спутниками золота в минерале и оценить их влияние на формирование геохимических аномалий по вторичным ореолам рассеяния золота.

**Геологическое строение района. Краткая характеристика месторождения и рудопроявлений золота.** Размещение месторождения и рудопроявлений золота контролируется протяжённой зоной разломов северо-восточного простирания (рис. 1) [7]. Это пакет сближенных тектонических нарушений шириной около 3–4 км, характеризующийся широким развитием зон расланцевания, катаклаза, милонитизации, гидротермальных изменений вмещающих пород (хлоритизация, эпидотизация, окварцевание, пиритизация) и внедрением даек габбро-долеритового состава.

В зоне рудоконтролирующих разломов выявлен целый ряд геохимических аномалий по вторичным ореолам рассеяния, оконтуривающих как известные рудопроявления, так и зоны рассеянной минерализации. Почти все золотоносные аномалии (Au 0,006–1,5 г/т) сопровождаются комплексом элементов (г/т): Ag (0,1), Zn (150), Pb (30), Cu (100), As (100), а также Mo, Sn, Bi, Ba, Sr, соответствующих минералого-геохимическим особенностям руд на проявлениях золота. При прогнозе типа скрытого оруденения, сопряжённого с аномалиями, предполагалось наличие минерализации с полиминеральным составом руд.

Рудовмещающими породами на рудопроявлениях золота являются верхнерифейско-вендские образования *бедамельской серии* – лавы и туфы базальтов, андезитов, дацитов, реже риолитов с линзами известняков общей мощностью 2000–2700 м, а также вулканогенно-осадочные отложения *енганэпейской свиты* верхнего венда – нижнего кембрия: флишоидное переслаивание туфопесчаников, ту-

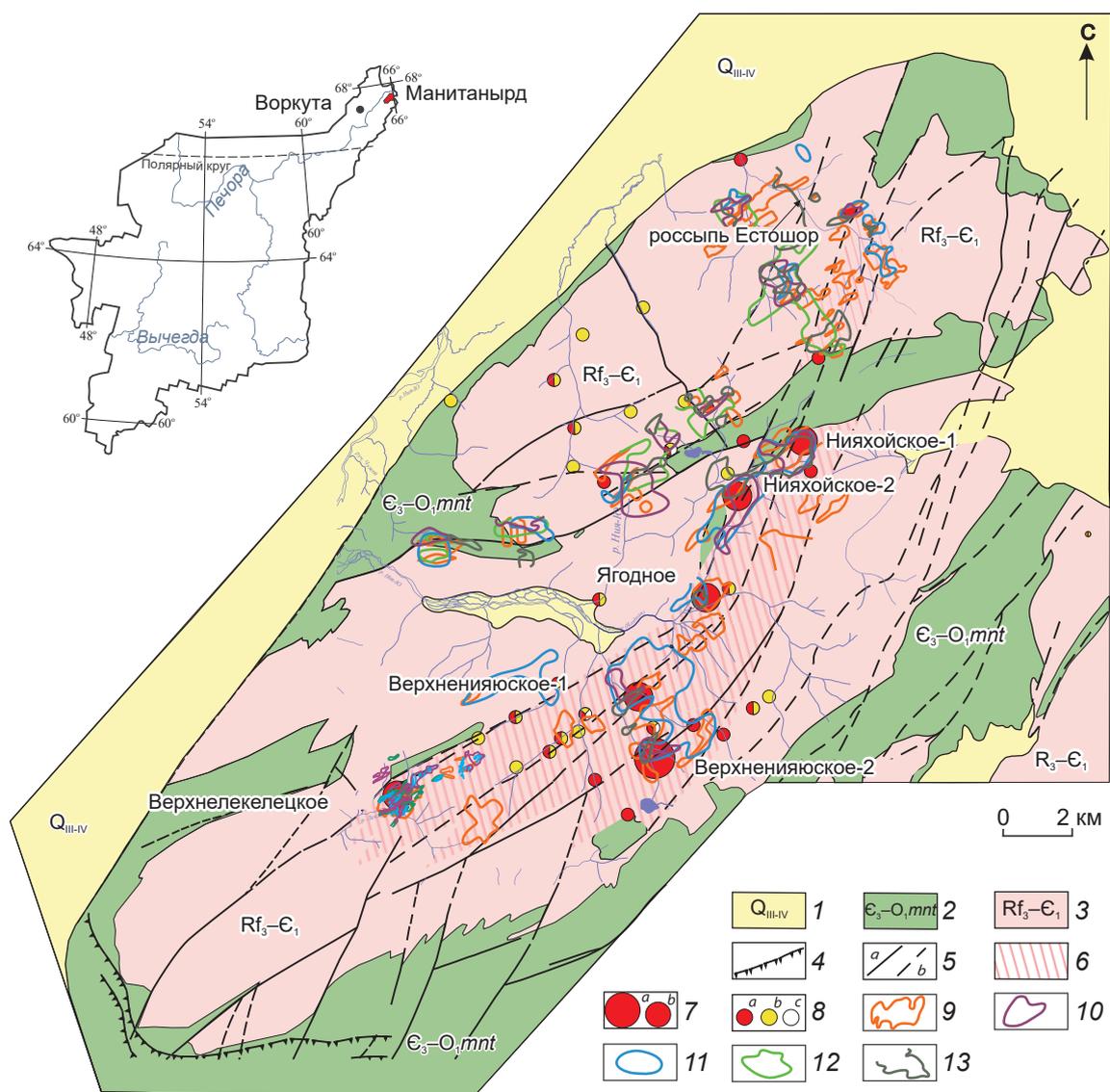


Рис. 1. Литохимические аномалии золота и сопутствующих элементов Манитанырдского района. Составлено на основе [18] с дополнениями:

1 – четвертичные отложения; 2 – манитанырдская серия: конгломераты, гравелиты, кварцитопесчаники; 3 – вулканогенно-терригенные и вулканогенные отложения энганэпейской свиты и бедамельской серии; 4 – тектонические покровы; 5 – разрывные нарушения: *a* – достоверные, *b* – предполагаемые; 6 – Нияюская рудная зона; 7 – месторождение (*a*) и проявления (*b*) Au; 8 – пункты минерализации: *a* – Au, *b* – Ag, *c* – As; литохимические аномалии по вторичным ореолам рассеяния: 9 – Au в контуре > 6 мг/т, 10 – Zn, 11 – Pb, 12 – Cu, 13 – As

Fig. 1. Lithochemical anomalies of gold and associated elements in the Manitynyrd region. Compiled based on [18], with additions:

1 – Quaternary sediments; 2 – Manitynyrd series: conglomerates, gravelites, quartzite sandstones; 3 – volcanogenic-terrigenous and volcanogenic deposits of the Enganepey formation and Bedamel Series; 4 – tectonic nappes; 5 – faults: *a* – reliable, *b* – supposed; 6 – Niyayu ore zone; 7 – ore deposit (*a*) and occurrences (*b*) of gold; 8 – points of mineralization: *a* – gold, *b* – silver, *c* – arsenic; lithochemical anomalies in secondary dispersion halos: 9 – outlines of Au > 6 mg/t, 10 – Zn, 11 – Pb, 12 – Cu, 13 – As



фоалевролитов и туфогравелитов мощностью 1200–1500 м. Манитаньрдская серия верхнего кембрия – нижнего ордовика с угловым несогласием залегает на эрозионной поверхности пород бедамельской серии и энганпейской свиты. Она сложена конгломератами, гравелитами, кварцитопесчаниками, алевролитами. Мощность серии сильно изменчива – от 500 до 800 м (см. рис. 1).

Все породы района претерпели региональный метаморфизм зеленосланцевой фации [19]. Широко развиты гидротермальные кварцевые, кварц-хлоритовые, кварц-эпидотовые, сульфидно-кварцевые, баритовые, аксинитовые, кварц-карбонатные жилы и прожилки, выполняющие трещины северо-восточного простирания, ориентированные согласно сланцеватости пород.

На рудопроявлениях до глубины 15–60 м, реже до 150–190 м развита зона окисления и дезинтеграции, в которой рудные минералы в разной степени окислены.

Месторождение Верхненияюское-2 относится к жильному золото-сульфидно-кварцевому типу. Горными и буровыми работами в полосе шириной около 100 м прослежены четыре рудные зоны: Полярная, Северная, Промежуточная и Южная. Все зоны сложены жилами и прожилками кварц-сульфидного, кварцевого и кварц-хлоритового состава. Жильные образования катаклазированы, часто брекчированы, имеют мощность от нескольких сантиметров до первых дециметров, с редкими раздувами до 0,5–0,8 м, которые очень быстро выклиниваются. В кварцевых жилах развиты линзы и прожилки сульфидных руд, с которыми связаны наиболее высокие содержания золота (первые десятки г/т). На месторождении среднее содержание Au 4,8 г/т. Что же касается вмещающих метасоматически изменённых пород (базальтоиды, реже туфопесчаники), то в них можно наблюдать тонкое прожилкование и вкрапленность рудной минерализации, благодаря которой развивается слабая золотоносность (0,2–2,5 г/т, редко до 5–6 г/т). Оруденелые участки прослеживаются вблизи рудных жил и в их межжильном пространстве. По данным разведки, запасы месторождения Верхненияюское-2 составили

3,4 т Au и 10,9 т Ag, месторождение признано малоперспективным, мелким с упорными пирит-арсенопиритовыми рудами. Дальнейшая разведка не проводилась, хотя оруденение было прослежено скважинами до глубины 240 м с перспективами увеличения запасов золота на глубину и на флангах месторождения.

Все остальные рудопроявления (Нияхойское-1, Нияхойское-2, Ягодное, Верхненияюское-1) приурочены к более молодым отложениям позднего венда – раннего кембрия: туфопесчаникам, туфосланцам, альбит-серицитовым сланцам с редкими прослоями эффузивов основного состава. Для них также характерно развитие золото-кварц-сульфидных жил и, кроме того, прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации во вмещающих породах. Зоны катаклаза, милонитизации и эпигенетических изменений совместно с пиритом (1–2 %) формируют облик минерализованных зон. Визуально они выделяются высокой дислоцированностью и ржаво-бурой окраской пород мощностью первые метры – десятки метров. Содержания золота невысокие и колеблются от 0,01 до 2,4 г/т на мощность в первые метры. Участками в минерализованных зонах появляются маломощные (0,05–0,1 м) кварц-сульфидные прожилки, с которыми связано оруденение с наиболее значимыми содержаниями золота (от 5,6–20,4 г/т до ураганных). Характер контакта рудных жил резкий, прилегающие к жилам вмещающие породы в разной степени золотоносны.

Характерно, что рудная минерализация не проникает в верхнекембрийско-нижнеордовикские породы манитаньрдской серии, что позволяет считать возраст оруденения допалеозойским.

**Минеральный состав руд.** Сульфидная (в первую очередь пиритовая) минерализация на всех вышеперечисленных рудопроявлениях локализована в кварцевых жилах и прожилках, а также в минерализованных зонах. Содержание рудных минералов колеблется от 1–2 % (во вмещающих породах и жилах) до 70 % (в жилах).

*Минеральный состав золото-сульфидно-кварцевых жил.* Строение рудных жил слож-

ное, они характеризуются развитием сближенных кварцевых, сульфидно-кварцевых и сульфидных прожилков, выполняющих трещины скалывания и отрыва. Наряду с пиритом и арсенопиритом в рудах присутствуют сфалерит, галенит, халькопирит, а также редкие минералы – гисенит, фрейбергит, ауростибит, самородный висмут, тетраэдрит, теннантит, кубанит, штернбергит. С рудными минералами ассоциирует золото, образующее как самородные выделения в промежутках между рудными минералами, так и включения в сульфидах. Нерудные минералы представлены кварцем, которому сопутствуют слюды, хлорит, альбит, изредка эпидот. В зоне окисления широко развиты вторичные гипергенные минералы: халькозин, ковеллин, гётит, лимонит, скородит, церуссит. Максимальное содержание золота по результатам пробирного анализа бороздовых проб достигает 32,1 г/т на мощность 1,05 м, по отдельным секционным пробам колеблется от следов до 29,7 г/т и даже 92,4 г/т на мощность 0,2 м. В пробах высокие содержания золота сопровождаются повышением содержания серебра, однако нередко случаи, когда по данным аналитических исследований присутствует только серебро (до 70,2 г/т) при отсутствии золота (Северная зона месторождения Верхнеияуское-2).

На основании изучения взаимоотношений рудных жил и прожилков установлены два последовательно образовавшихся парагенезиса руд, впервые отмеченные при разведке месторождения Верхнеияуское-2 (К. Н. Севастьянов и др., 1965), а позднее подтверждённые исследованиями С. Н. Вахрушева [2], В. Н. Сазонова [15], С. К. Кузнецова [9], Т. П. Майоровой [11] и др. На начальном этапе сформировались сложные по морфологии кварцево-жильные, а также гнездово-прожилковые скопления пирита и арсенопирита, развитые в жилах и их зальбандах. С пиритом и арсенопиритом ассоциирует тонкодисперсное (0,001–0,005 мм) высокопробное золото I (Au – 80–90 мас. %, Ag – 10–20 мас. %, Hg < 0,8 мас. %). Образование поздней рудной ассоциации происходило после перерыва и дробления ранее сформированного кварцево-сульфидного агрегата.

Эти образования представляют вкрапленность, прожилки и гнёзда агрегатов пирита, халькопирита, сфалерита, галенита и видимых частиц самородного золота. Указанная ассоциация является цементом для раздробленных участков руды. Здесь же в сростании с сульфидами спорадически отмечаются висмутин, самородный висмут, блёклые руды, самородное серебро. Со сфалеритом и халькопиритом тесно связано золото II неправильной, дендритовидной или удлинённой формы, размером от мельчайшего (менее 1 мкм) до 0,01–0,02 мм. Содержание золота изменяется от 30 до 90 мас. %, содержание серебра – от 10 до 65 мас. %. Характерным второстепенным компонентом является ртуть, которая в количестве 1–3 мас. % постоянно фиксируется в низкопробном золоте, кюстелите и золотистом серебре. При содержании золота выше 65–70 мас. % содержание ртути ниже предела обнаружения (0,8 мас. % Hg).

*Минеральный состав золото-сульфидных минерализованных зон.* В минерализованных зонах отмечены вкрапления пирита, отличающиеся по форме и размерам (до 2 мм). По морфологии установлено абсолютное преобладание трёх основных форм кристаллов пирита: кубической {100}, пентагондодекаэдрической {210} и октаэдрической {111}. Но в большинстве случаев облик кристаллов обусловлен комбинацией форм {100}, {210} и {111} с преобладанием одной из них.

При микрорудных исследованиях в пирите обнаружены микровключения: халькопирит, теллуровисмутит и тетрадимит, колорадоит, алтаит, калаверит. В протоочных пробах из гипергенно изменённых пород минерализованных зон почти всегда обнаруживаются частицы золота величиной от 0,1 до 0,5 мм. Золото рудного облика кристалломорфное и сложной формы. Пробность золота 891–948 ‰, основная примесь – серебро. В зоне окисления кристаллы пирита псевдоморфно замещены гётитом.

**Объекты, материалы и методы исследования.** Материалом для исследования послужили 15 монофракций пирита, выделенных из концентратов рудных проб, с первоначальным



весом 3–12 кг, измельчённых до 1 мм. Пробы отобраны из рудных жил на месторождении Верхнеияюское-2 (шесть проб) и проявлении Верхнеияюское-1 (три пробы), из минерализованных зон (гидротермально-изменённых пиритизированных пород) – Ягодное (четыре пробы), Нияхойское-2 (две пробы). По результатам атомно-абсорбционного анализа в этих пробах ранее установлены повышенные содержания золота (от 0,01 до > 1 г/т). Анализ микроэлементного состава пирита выполнен методом масс-спектропии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на масс-спектрометре Agilent 7700x (Agilent Technologies) в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН (аналитик Г. В. Игнатъев). Разложение растёртого до порошка пирита проводилось путём кислотного вскрытия пробы в герметично закрытых фторопластовых сосудах в микроволновой печи (Sineo MDS-10), использовались навески массой 0,1 г. Нижние пределы обнаружения элементов (ppm): Mo, Be, Sc, Cs, W – 0,01; V – 0,002; Th – 0,001. Две пробы пирита (Верхнеияюское-2, Ягодное) проанализированы на группу рудных элементов (Au, As, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, Se, Mo, Ag, Sb, Te, Pb, Bi) в Центральной исследовательской лаборатории ФГБУ «ВСЕГЕИ» (г. Санкт-Петербург) на масс-спектрометре Agilent 7700x (аналитики В. А. Шишлов, В. Л. Кудряшов). Нижние пределы обнаружения элементов, ppm: Ag – 0,01; As, Co – 0,5; Ni, Cu, Zn, Pb – 1; Ge, Se, Sb, Bi – 0,1; Te – 0,2; Mo – 0,6. Содержание Au определялось атомно-абсорбционным методом, нижний предел обнаружения – 0,002 ppm.

Для минералогических исследований были изготовлены полированные шлифы из образцов руд и монтированные в эпоксидной смоле зёрна пирита. Всего изучено более 100 зёрен пирита из концентратов. Состав пирита определялся на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max (аналитик Е. М. Тропников). Напряжение 20 кВ, ток пучка 15 нА, диаметр пучка до 1 мкм, время набора спектров 60–80 с (600 тыс. импульсов). Характеристические линии: Ка для Fe, Cu, Zn, S; La для Ag, As; Ma для Pb, Au.

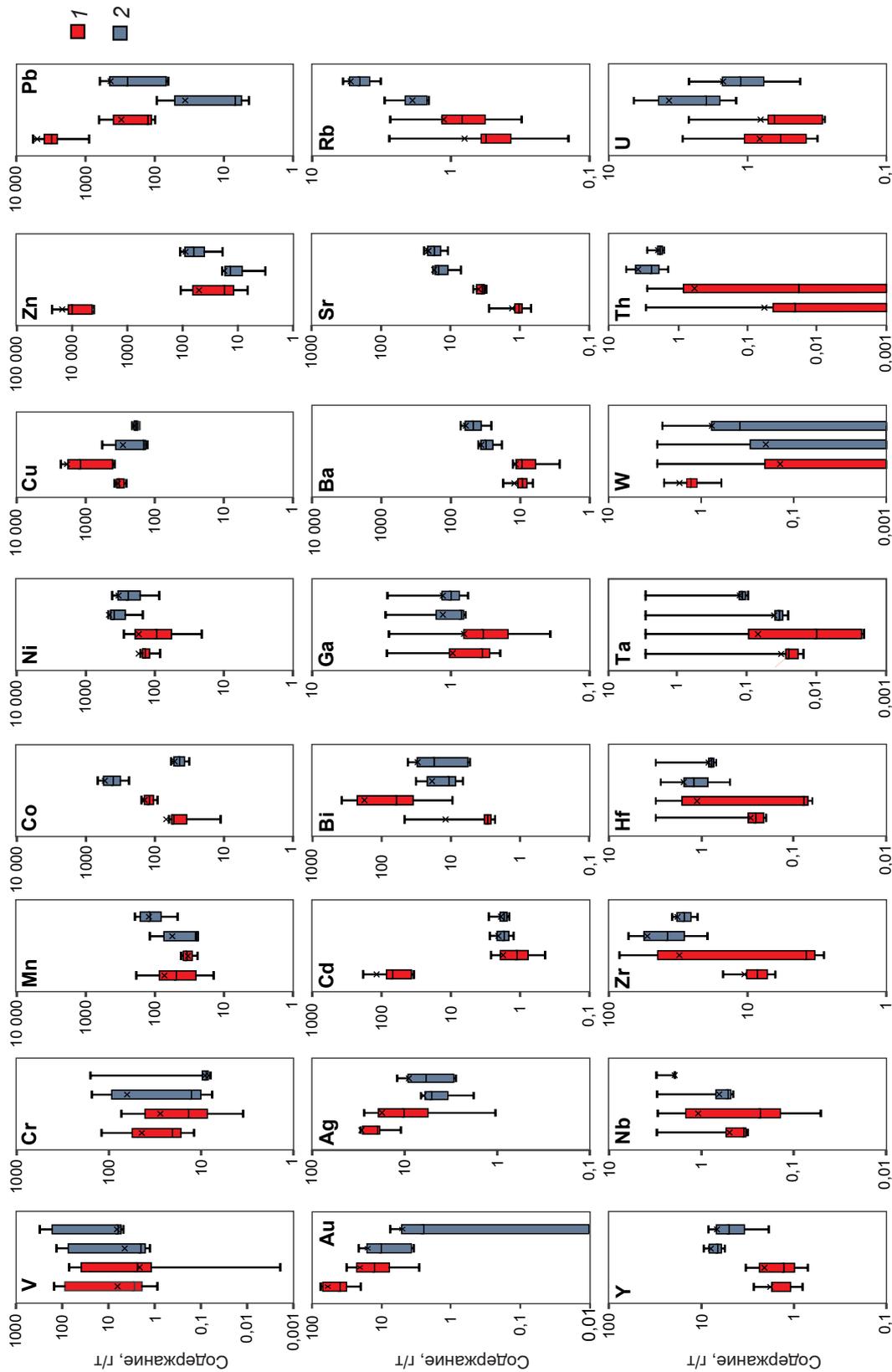
Погрешность определения (мас. %): Fe – 0,15, As – 0,22, S – 0,14, Cu – 0,29, Pb – 0,69, Au – 0,5, Ag – 0,38, Zn – 0,2. В качестве стандартов использовались чистые металлы для Fe, Cu, Zn, Ag, Au, Pb; FeS<sub>2</sub> для Fe, S; PbTe для Pb; InAs для As. Изображения получены в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE) при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Для анализа многомерной статистики использовался программный пакет Statistica (версия 10.0). Проведена стандартизация исходных переменных, общее количество исследованных образцов – 15. Для получения информации о неоднородности пирита и взаимосвязях между элементами-примесями применён корреляционный анализ. Корреляция между двумя переменными считалась значимой при абсолютном значении коэффициента ( $r$ ) больше 0,7. Построена корреляционная матрица и выявлены корреляционные связи между парами элементов. Далее переменные кластеризованы иерархическим (древовидным) методом с использованием различных мер расстояния и различных правил объединения (связывания) кластеров. Выбран наиболее информативный способ (метод Варда, мера расстояния – 1-коэффициент корреляции Пирсона). На основе данных кластерного анализа построены дендрограммы.

**Результаты исследования. Геохимия и минералогия пирита.** Геохимия пирита. Для дальнейшего прогнозирования золотого оруденения важно изучить микроэлементный состав пирита, определить характер минеральных включений, установить связь между элементами-спутниками золота в пирите, отобранном из жильных и минерализованных зон.

По данным ICP-MS анализа, в пирите установлен широкий набор микропримесей с вариациями содержаний от 0,  $n$  до  $n \cdot 10^4$  ppm. Среди них выделены следующие группы элементов: *рудогенные* (Cu, Zn, Pb, Bi, Mo, W, Au, Ag), *петрогенные* (Mn, V, Cr, Ni, Co), *редкие и рассеянные* (Li, Be, Sc, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Hf, Ta, Th, U), *редкоземельные* (от La до Lu) (рис. 2; таблица).

Набор микропримесей для всех проявлений один и тот же, но для пирита жильных



**Рис. 2. Диаграмма размаха содержания микропримесей в пирите:**  
1 – золото-сульфидно-кварцевые жилы (Верхнеияуское-2, Верхнеияуское-1); 2 – минерализованные зоны (Ягодное, Ниякхойское-2); границы «ящика» – первый и третий квартили, горизонтальная черта в «ящике» – медиана, крестик – среднее значение содержания

**Fig. 2. Diagram showing the range of concentrations of the microimpurities in pyrite:**  
1 – gold-sulfide-quartz veins (Verkhneyayuskoye-2, Verkhneyayuskoye-1); 2 – mineralized zones (Yagodnoye, Niyakhoiskoye-2). The boundaries of the “box” are the first and third quartiles; the horizontal line in the “box” is the median; the cross is the average content value



Таблица. Содержание элементов-примесей в пирите, г/т

Table. Content of trace elements in pyrite, g/t

Элемент	Золото-сульфидно-кварцевые жилы						Минерализованные зоны					
	Верхненияуское-2			Верхненияуское-1			Ягодное			Нияхойское-2		
	Min	Max	Mid (n = 5)	Min	Max	Mid (n = 3)	Min	Max	Mid (n = 3)	Min	Max	Mid (n = 2)
V	0,89	18	6,52	нпо	3,9	2,13	1,3	10	4,47	4,8	8,3	6,55
Cr	12	115	44	3,5	66	27,83	7,6	171	63,87	8,1	10	9,05
Mn	14	186	72	24	40	33	24	119	55,67	<b>47</b>	<b>195</b>	<b>121</b>
Co	35	86	67,4	107	169	138	<b>323</b>	<b>757</b>	<b>526</b>	38	64	51
Ni	121	192	167	58	314	168	<b>272</b>	<b>576</b>	<b>456</b>	<b>166</b>	<b>491</b>	<b>329</b>
Cu	287	399	345	<b>423</b>	<b>3107</b>	<b>1858</b>	141	581	289	186	202	194
Zn	<b>4445</b>	<b>28 488</b>	<b>15 032</b>	12	112	49	8,4	24	17,13	41	131	86
Pb	<b>2620</b>	<b>7462</b>	<b>4982</b>	<b>114</b>	<b>651</b>	<b>303</b>	5,7	94	36,03	<b>70</b>	<b>800</b>	<b>435</b>
Mo	нпо	0,19	0,06	нпо	2,3	0,85	нпо	19	6,34	0,56	1,5	1,03
Au	<b>33</b>	<b>83</b>	<b>59,6</b>	<b>7,9</b>	<b>37</b>	<b>20,97</b>	<b>3,8</b>	<b>28</b>	<b>16,27</b>	0,01	<b>10</b>	<b>5,01</b>
Ag	<b>19</b>	<b>36</b>	<b>29,2</b>	<b>5,7</b>	<b>32</b>	<b>17,57</b>	3,5	8,3	6,23	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>9</b>
Cd	<b>39</b>	<b>236</b>	<b>121</b>	0,79	3	1,76	1,5	2,7	2,07	1,6	2,2	1,9
Bi	<b>2,7</b>	<b>47</b>	<b>11,96</b>	<b>36</b>	<b>407</b>	<b>177</b>	<b>8,8</b>	<b>34</b>	<b>18,6</b>	<b>5,8</b>	<b>54</b>	<b>29,9</b>
Ga	0,53	1,9	0,97	0,39	1,2	0,79	0,82	1,7	1,13	0,88	1,4	1,14
Ge	14	18	15,8	14	16	14,67	19	22	20	15	16	15,5
Ba	8,1	19	11,96	6,1	16	11,7	25	46	36,33	<b>37</b>	<b>82</b>	<b>59,5</b>
Sr	0,94	1,5	1,27	3,4	4,7	3,9	11	21	17	14	27	20,5
Rb	0,37	1,4	0,8	0,57	1,7	1,12	1,5	2,7	1,9	<b>3,9</b>	<b>6,7</b>	<b>5,3</b>
Y	1,1	3	1,78	1	3,6	2,07	<b>6,2</b>	<b>10</b>	<b>7,87</b>	<b>3,5</b>	<b>10</b>	<b>6,75</b>
Nb	0,33	0,86	0,49	0,14	2,7	1,05	0,48	0,86	0,63	1,9	1,9	1,9
Cs	нпо	0,04	0,01	нпо	0,04	0,02	нпо	0,09	0,04	0,66	1,9	1,28
La	1,3	2,3	1,6	2,3	5,6	4	<b>7,2</b>	<b>22</b>	<b>12,7</b>	4,8	7,1	5,95
Ce	2,5	4,7	3,18	4,4	13	8,43	<b>7,9</b>	<b>40</b>	<b>22,63</b>	9,8	16	12,9
Pr	0,29	0,59	0,39	0,56	1,7	1,09	<b>1,7</b>	<b>5,1</b>	<b>3,17</b>	1,3	2,5	1,9
Nd	1,2	2,4	1,58	2,1	6,2	4	<b>6,5</b>	<b>20</b>	<b>12,5</b>	5,3	11	8,15
Sm	0,24	0,51	0,33	0,31	0,82	0,62	<b>1,1</b>	<b>3,8</b>	<b>2,43</b>	<b>1,4</b>	<b>3,4</b>	<b>2,4</b>
Eu	0,07	0,2	0,12	0,07	0,22	0,16	0,32	1	0,58	0,41	0,97	0,69
Gd	0,35	0,71	0,48	0,39	1,2	0,84	1,5	4,8	3	1,6	3,5	2,55
Tb	0,04	0,11	0,07	0,04	0,13	0,09	0,18	0,5	0,34	0,15	0,46	0,31
Dy	0,25	0,68	0,39	0,18	0,78	0,45	1	2,3	1,67	0,78	2,4	1,59
Ho	0,04	0,12	0,08	0,04	0,17	0,1	0,19	0,39	0,3	0,16	0,49	0,33
Er	0,17	0,43	0,26	0,19	0,67	0,38	0,62	1,3	0,97	0,48	1,5	0,99
Tm	0,02	0,07	0,04	0,03	0,1	0,06	0,08	0,19	0,13	0,07	0,21	0,14
Yb	0,17	0,34	0,23	0,21	0,75	0,46	0,53	1,2	0,87	0,48	1,5	0,99
Lu	0,02	0,07	0,04	0,05	0,13	0,09	0,12	0,23	0,16	0,08	0,26	0,17
Be	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0,13	0,74	0,44
Li	0,12	1,8	0,6	0,15	0,57	0,43	0,47	1,9	1,01	1,3	1,7	1,5
Sc	нпо	2,5	0,76	нпо	нпо	нпо	нпо	1,4	0,47	нпо	2,3	1,16
Zr	7,3	16	10,44	3,3	85	30,87	<b>29</b>	<b>82</b>	<b>53</b>	26	38	32
Hf	0,21	0,43	0,28	0,07	3	1,05	<b>0,82</b>	<b>2,1</b>	<b>1,47</b>	0,71	0,88	0,8
Ta	0,02	0,06	0,03	0,002	0,18	0,07	0,03	0,05	0,04	0,11	0,14	0,13
W	<b>1,1</b>	<b>2</b>	<b>1,68</b>	нпо	0,39	0,14	нпо	0,57	0,2	нпо	1,5	0,76
Th	нпо	0,22	0,06	нпо	1,7	0,58	<b>2</b>	<b>6,4</b>	<b>3,83</b>	<b>1,8</b>	<b>2,2</b>	<b>2</b>
U	0,38	1,5	0,82	0,29	1,1	0,8	<b>1,6</b>	<b>7</b>	<b>3,67</b>	<b>0,77</b>	<b>2,2</b>	<b>1,49</b>
As			41 500						348			
Te			2,31						3,41			

Продолжение таблицы

Элемент	Золото-сульфидно-кварцевые жилы						Минерализованные зоны					
	Верхнеияюское-2			Верхнеияюское-1			Ягодное			Нияхойское-2		
	Min	Max	Mid (n = 5)	Min	Max	Mid (n = 3)	Min	Max	Mid (n = 3)	Min	Max	Mid (n = 2)
Se			0,42						14,9			
Th/U			0,07			0,73			1,05			1,35
ΣREE	22,2	27,23	24,57	24,86	44,11	35,43	<b>47,94</b>	<b>125</b>	<b>81,44</b>	41,8	67,29	54,55
ΣLREE/ ΣHREE	9,78	20,04	15,64	9,19	21,15	15,43	9	10,44	9,93	5,52	10,02	7,77
La/Yb	5,86	7,78	6,98	5,47	13,66	10,03	10,23	18,33	14,05	4,73	10	7,37
Eu/Eu*	0,71	1,01	0,86	0,57	0,81	0,66	0,49	0,76	0,65	0,83	0,85	0,84

Примечание.  $Eu/Eu^* = Eu_n / (Sm_n + Gd_n) / 2$ , нормировано к хондриту [24]; нпо – ниже предела обнаружения. Для расчёта средних содержаний элемента с нпо использовалось значение  $1/2$  предела обнаружения,  $n$  – число определений.

образований характерны высокие содержания рудогенных элементов (г/т): Ag (5,7–36), Zn (12–28488), Cd (3–236), Pb (114–7462), Cu (287–3107), Bi (2,7–407), у вкрапленного пирита минерализованных зон содержания ниже, но остаются достаточно высокими: Ag (2,6–15), Zn (8,4–131), Cd (1,5–2,7), Pb (5,7–800), Cu (129–581), Bi (5,8–54).

В пирите из минерализованных зон обнаружены микровключения минералов, в определённой мере отражающие минеральный состав и геохимическую специализацию вмещающих его пород. Об этом свидетельствует набор петрогенных элементов (г/т): V (1,3–140), Cr (2,9–171), Mn (24–195).

Пирит из жильных и минерализованных зон незначительно отличается друг от друга по набору элементов-примесей, но их содержания различаются, так же как и корреляционные связи между элементами.

**Золото.** Интерес с позиции металлоносности представляет Au, содержания которого в пирите из сульфидно-кварцевых жил (Верхнеияюское-2, Верхнеияюское-1) от 8 до 83 г/т, немного ниже в пирите минерализованных зон (Ягодное, Нияхойское-2) – от 3,8 до 28 г/т. Отметим, что указанные содержания являются высокими для оценки потенциальной золотоносности как жил, так и минерализованных зон. Для Au в пирите из жильных зон устойчивой является положительная корреляция ( $r$  – коэффициент корреляции) с Pb ( $r = +0,86$ ),

Ag ( $r = +0,75$ ), а также парой Zn ( $r = +0,68$ ) – Cd ( $r = +0,66$ ). Что же касается минерализованных зон, то у Au нет положительной связи с рудогенными элементами, напротив, проявлены сильные отрицательные связи с Zn ( $r = -0,71$ ), Cd ( $r = -0,71$ ), Ga ( $r = -0,78$ ), а также с петрогенными V ( $r = -0,91$ ) и Mn ( $r = -0,85$ ).

**Серебро.** Содержание серебра в пирите всегда ниже, чем золота (см. табл.). По данным корреляционного анализа, Ag в пирите из жильных зон связано положительной корреляцией с Au ( $r = +0,75$ ) и Pb ( $r = +0,72$ ) и значимой отрицательной с Th ( $r = -0,72$ ). В пирите из минерализованных зон Ag показывает значимую пропорциональную связь с Pb ( $r = +0,9$ ), но теряется связь с Au (рис. 3, б). Наличие серебра в пирите жильных зон обусловлено изоморфной примесью в микровключениях золота, а также присутствием микровключений Ag-содержащих блёклых руд.

**Цинк.** В пирите из сульфидно-кварцевых жил по аномально высоким максимальным значениям цинк лидирует среди остальных элементов, средние содержания его достигают промышленных значений – 1,5 кг/т при максимальном значении 28,5 кг/т. Такой пирит развит на месторождении Верхнеияюское-2. В корреляционном ряду Zn занимает одно из первых мест и коррелирует со Pb ( $r = +0,9$ ), Ag ( $r = +0,7$ ), Au ( $r = +0,68$ ), а также с Cd ( $r = +0,66$ ), типичной изоморфной примесью в сфалерите. Это же подтверждается минералогическими

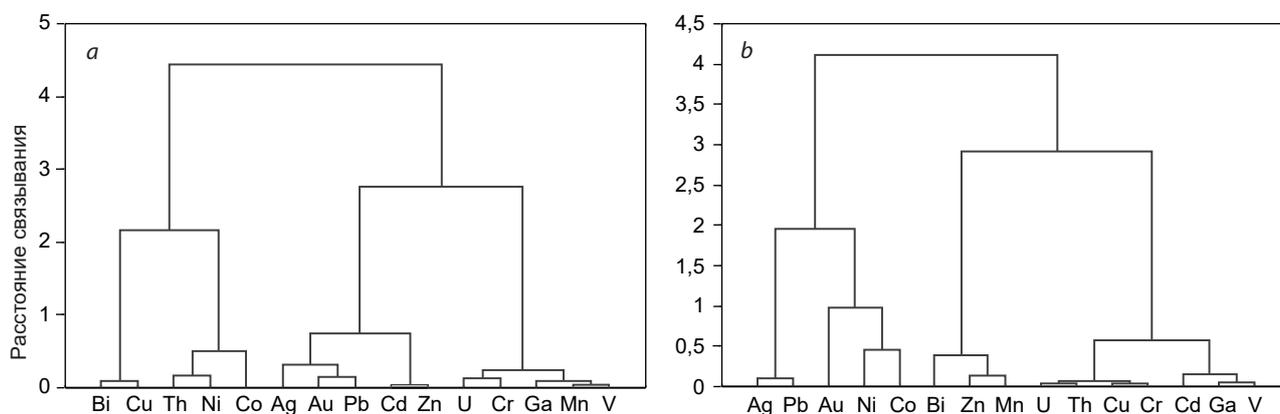


Рис. 3. Дендрограммы элементов-примесей в пирите:

*a* – в жилах (рудопрооявления Верхненияюское-1, Верхненияюское-2); *b* – в минерализованных зонах (рудопрооявления Ягодное, Нияхойское-2)

Fig. 3. Dendrograms of trace elements in pyrite:

*a* – in veins (ore occurrences: Verkhneniyayuskoye-1, Verkhneniyayuskoye-2); *b* – in mineralized zones (ore occurrences: Yagodnoye, Niyakhoyskoye-2)

данными – сфалерит часто встречается в виде микровключений в пирите размером от 1 до 50 мкм [9]. Что же касается пирита минерализованных зон, он характеризуется меньшими содержаниями Zn (см. табл.), составляющими десятки г/т, но сильными положительными связями с Bi ( $r = +0,72$ ) и Mn ( $r = +0,86$ ) на фоне отрицательной корреляции с Au ( $r = -0,72$ ).

**Кадмий.** В разновидностях пирита жильных и минерализованных зон средние значения Cd низкие, однако на месторождении Верхненияюское-2 в пробах, обогащённых Zn, достигают 236 г/т (см. табл.). Корреляционный анализ показал значимую положительную связь Cd с элементами, характерными для состава сфалерита (Zn, Ga), а также с Mn, Cr, V – типичными элементами вмещающих вулканогенных пород основного состава.

**Свинец.** Пирит жильных зон концентрирует на 1–2 порядка больше Pb, достигая значений 7,5 кг/т по сравнению с пиритом минерализованных зон – 800 г/т. Корреляционный анализ пирита жильных зон показал тесную связь Pb с Au ( $r = +0,86$ ), Ag ( $r = +0,72$ ), Zn ( $r = +0,84$ ) и Cd ( $r = +0,81$ ). В пирите из минерализованных зон зафиксированы сильные положительные связи между Pb и Ag. Примесь свинца обусловлена присутствием в пирите микровключений галенита.

**Медь.** Наряду с Zn и Pb пирит характеризуется сравнительно невысоким содержанием Cu (194–345 г/т), и только на рудопрооявлении Верхненияюское-1 отмечается его резкое повышение на 1–2 порядка и сильная положительная связь меди с висмутом ( $r = +0,92$ ). Примесь меди в пирите, как правило, обусловлена присутствием микровключений халькопирита, реже тетраэдрита и сульфосолей Pb, Cu и Bi. Коэффициенты корреляции, рассчитанные для пирита из минерализованных зон, несколько иные, появляются положительные связи Cu с Cr ( $r = +0,99$ ), Cd ( $r = +0,84$ ), Ga ( $r = +0,86$ ), Th ( $r = +0,94$ ), U ( $r = +0,95$ ).

**Висмут.** Содержание Bi в пирите довольно стабильно и варьирует в пределах 12–29 г/т, и только в жильных зонах рудопрооявления Верхненияюское-1 оно возрастает на порядок (см. табл.). Здесь же между Bi и Cu прослеживаются сильные связи ( $r = +0,92$ ), о чём сказано выше, а в пирите из минерализованных зон установлена положительная связь с Zn ( $r = +0,72$ ) и отрицательная с Ni ( $r = -0,95$ ).

**Никель, кобальт.** Оба элемента, являясь, как правило, структурными примесями в пирите, имеют пониженные значения в жильных зонах (Co – 67–138, Ni – 167–168 г/т) и немного повышенные в минерализованных зонах (Co – 51–526, Ni – 329–456 г/т). Следует отметить,

что содержание Ni и Co на порядок возрастает в минерализованной зоне рудопоявления Ягодное (см. табл.). При этом Ni в большинстве случаев доминирует над Co. Связь между элементами незначительная ( $r = +0,46$ ).

*Ванадий.* Ванадий в пирите содержится в незначительных количествах, составляя 2,13–18 г/т при кларке для вмещающих основных вулканитов 220 г/т [6]. В корреляционном ряду для пирита жильных и минерализованных зон выделяется связь V с Cr ( $r = +0,88$ ), Mn ( $r = +0,99$ ), а также с элементами, входящими в состав сфалерита: Zn ( $r = +0,77$ ), Cd ( $r = +0,83$ ), Ga ( $r = +0,95$ ). Значимой является обратная связь V с Au ( $r = -0,91$ ).

*Марганец.* Содержание Mn в пирите из жильных и минерализованных зон низкое (см. табл.), колеблется в интервале 14–195 г/т и лишь на Нияхойском-2 возрастает в два-три раза (при кларке для вулканитов основного состава 1400 г/т). В пирите жильных и минерализованных зон Mn коррелирует с V ( $r = +0,99$ ) и Cr ( $r = +0,88$ ), а также с элементами, входящими в состав сфалерита: Zn ( $r = +0,86$ ), Cd ( $r = +0,79$ ), Ga ( $r = +0,91$ ). Значимой является обратная связь Mn с Au ( $r = -0,85$ ).

*Хром.* Содержания Cr низкие, достигают максимальных значений 171 г/т, что соответствует кларковому содержанию в вулканитах основного состава [6]. Cr в пирите из жильных зон образует положительную связь с V ( $r = +0,88$ ), Mn ( $r = +0,88$ ), Ga ( $r = +0,82$ ), U ( $r = +0,87$ ). В пирите минерализованных зон отмечаются прямо пропорциональные зависимости содержаний Cr с Cu ( $r = +0,99$ ), Cd ( $r = +0,82$ ) (см. рис. 3). Выше уже сказано, что наличие хрома указывает на примесь основной и ультраосновной пирокластике во вмещающих пирит туфопесчаниках.

*Теллур, селен.* Данные элементы не участвуют в выборке для кластерного анализа, так как проанализировано недостаточное для статистики количество проб. Тем не менее мы приводим их единичные содержания (см. табл.), поскольку как в пирите, так и в золото-сульфидных рудах Манитаньрдского района присутствие Te и Se установлено впервые. Содержание Te чуть выше в минерализованных зо-

нах (до 3,41 г/т) по сравнению с золото-сульфидно-кварцевыми жилами (2,31 г/т), Se – 14,9 и 0,42 г/т соответственно (см. табл.). Содержание этих элементов относительно низкие по сравнению с другими месторождениями, в которых концентрации Te и Se в пирите варьируют от 0,02 г/т до 20 800 г/т и 4250 г/т соответственно, при этом Te и Se в пирите могут быть либо структурно связаны в решётке в результате замещения S, либо размещены в виде включений собственных минеральных фаз субмикронного размера [23]. Повышенное содержание Te в пирите минерализованных зон (Ягодное) связано с присутствием субмикронных включений теллуридов Bi, Pb, Hg, Au. Собственных минеральных фаз Se не обнаружено.

*Мышьяк.* По данным ICP-MS анализа единичных проб пирита (см. табл.), содержание As в пирите из рудных жил месторождения Верхнеияжское-2 достигает высоких значений (41 500 г/т), значительно превышая таковое в минерализованной зоне проявления Ягодное (348 г/т). Высокие концентрации As обусловлены как присутствием микровключений арсенопирита, так и его изоморфной примесью в структуре пирита, о чём будет сказано ниже.

*Уран, торий.* Концентрация U и Th в пирите жильных зон весьма низкая, в среднем составляет для U 0,8–0,82 г/т, для Th колеблется от 0,06 до 0,58 г/т, возрастая на порядок в пирите минерализованных зон – до 1,49–3,67 и 2–3,83 г/т соответственно (см. табл.). U и Th в пирите могут находиться как в сорбированной форме, так и в виде минеральных микровключений [12, 20]. В пирите минерализованных зон по данным микронзондового анализа установлены микровключения ряда минералов, которые потенциально могут содержать примеси урана и тория (см. ниже). Для U установлены положительные корреляционные связи с Cu ( $r = +0,95$ ), Cr ( $r = +0,87$ ), для Th с Cu ( $r = +0,94$ ) и отрицательные для Th с Ag ( $r = -0,72$ ).

В результате в пирите из жильных зон установлена высокая положительная связь между следующими элементами-примесями: Au–Ag, Au–Pb, Au–Zn, Zn–Pb, Ag–Pb, Cu–Bi. На



дендрограмме (см. рис. 3, а) указанные элементы на основе присущих им корреляционных связей формируют группы (кластеры): (1) Ag-Au-Pb-Zn-Cd, (2) Bi-Cu-Ni-Co-Th и (3) U-Cr-Ga-Mn-V.

В первую группу кластеров входят основные рудогенные элементы, соответствующие геохимическим особенностям поздней галенит-халькопирит-сфалеритовой ассоциации с золотом и серебром.

Вторая группа кластеров объединяет элементы, которые отражают минеральный состав заключительной стадии рудного процесса: блёклые руды, самородный висмут, сульфосоли висмута.

Третья группа кластеров включает петрогенные элементы, которые не участвуют в рудообразовании, а отражают влияние состава вмещающих пород (вулканитов основного состава).

На дендрограмме (см. рис. 3, б) ассоциации элементов минерализованных зон объединяются в кластеры: Ni-Co-Au-Ag-Pb, Zn-Mn-Bi и V-Ga-Cd-Cr-Cu-Th-U. Первые две группы кластеров также включают рудогенные элементы поздней ассоциации: халькопирит, сфалерит, галенит. При этом сильные положительные связи установлены для пар элементов: Ag-Pb и Zn-Bi, тогда как у Au наблюдается лишь одна отрицательная связь с Zn и отсутствует корреляция с остальными элементами. Третья группа кластеров включает петрогенные элементы.

Таким образом, в пирите минерализованных зон нарушаются все корреляционные связи Au с рудогенными элементами, даже с серебром, что позволяет допустить его независимое поведение в рудообразующем процессе. Исследования показали присутствие в пирите редких субмикроскопических выделений золота. Однако на вопрос, входит ли Au в решётку пирита или находится в нём только в виде микровключений, в будущем ещё предстоит ответить.

*Редкоземельные элементы.* Как известно, редкоземельные элементы встречаются в сульфиде в различных формах, включая твёрдые растворы, субмикроскопические минеральные

включения, или сорбируются на их поверхности [22]. Кроме того, по данным М. Н. Римской-Корсаковой и А. В. Дубинина [14], тяжёлые REE могут входить в кристаллическую решётку сульфидов, так как имеют небольшой ионный радиус, близкий по размерам основным ионам кристаллической решётки сульфида (Fe, Zn). Лёгкие лантаноиды имеют большой ионный радиус, что не позволяет реализоваться замещению в кристаллической решётке, поэтому данные элементы сорбируются на поверхности сульфидов в виде свободных ионов. При этом спектры распределения REE в пирите напрямую характеризуют состав лантаноидов во флюиде, что позволяет судить о его источниках [8].

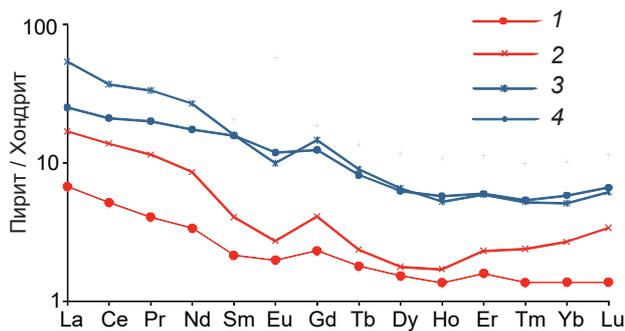
Суммарное содержание REE в пирите варьирует в широких пределах от 22 до 125 г/т (см. табл.). Их максимальные количества устанавливаются в пирите из минерализованных зон ( $\Sigma\text{REE} = 42\text{--}125$  г/т). Общей чертой составов REE в пирите во всех проявлениях является обогащение лёгкими элементами относительно тяжёлых (рис. 4). Спектры распределения REE пирита из всех проявлений имеют чётко выраженный Eu-минимум и характеризуются нормальным распределением REE с высокой степенью фракционирования, что подтверждается повышенными величинами  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE} = 9\text{--}21$ . В целом вариации отношений La/Yb колеблются от 1 до 18, указывая на различную степень дифференцированности лёгких редкоземельных элементов относительно тяжёлых.

Значения Eu/Eu\* в пирите из жил и минерализованных зон приближены к 1 (хондриту), что свидетельствует о существенном влиянии глубинного вещества (флюидов) на формирование рудных минералов [1].

*Минералогия пирита. Химический состав.* Высокие содержания элементов-примесей в пирите по результатам ICP-MS, приведённые в таблице, частично обусловлены изоморфной примесью некоторых из них (Ni, Co, As). Содержание железа и серы в изученных образцах изменяется в пределах (мас. %): Fe – 44,49–46,41, S – 49,26–52,81. Дефицит в анионной и катионной частях в отдельных случаях ком-

пенсруется присутствием примесей As (0,22–5,29 мас. %), Ni (0,09–0,82 мас. %) и Co (0,25–1,97 мас. %). При этом наибольший диапазон содержаний As характерен для пирита из жильных зон, где отмечаются участки освет-

ления с характерной ростовой зональностью (рис. 5). С учётом изоморфизма ( $Fe \leftrightarrow Co$ ;  $S \leftrightarrow As$ ), отношение S/Fe в среднем составляет 1,15, что указывает на высокую стехиометрию минерала [16].

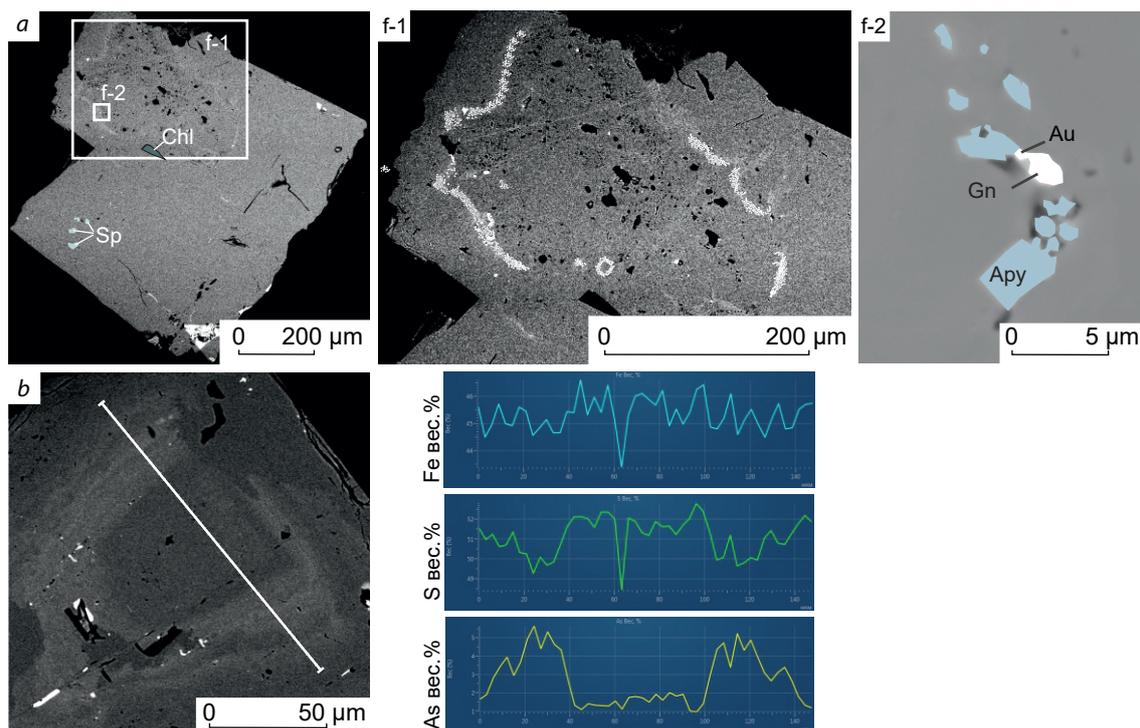


**Рис. 4. Распределение редкоземельных элементов в пирите (средние значения в таблице), нормированных на хондрит [24]:**

жилы: 1 – Верхненаяуское-2, 2 – Верхненаяуское-1; минерализованные зоны: 3 – Ягодное, 4 – Нияхойское-2

**Fig. 4. Distribution of rare earth elements in pyrite (average values in Table), normalized to chondrite [24]:**

veins: 1 – Verkhneniyayuskoye-2, 2 – Verkhneniyayuskoye-1; mineralized zones: 3 – Yagodnoye, 4 – Niyakhoykoye-2

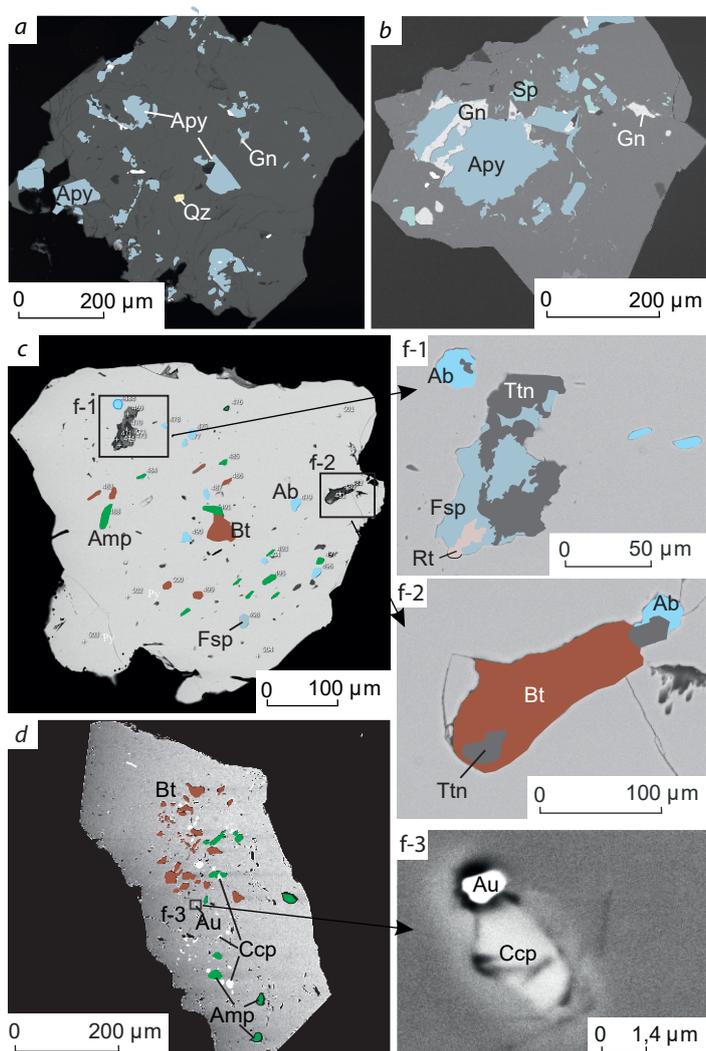


**Рис. 5. Неоднородное распределение примеси мышьяка (светлое) в пирите:**

*a* – зерно пирита с включениями сфалерита (Sp) и хлорита (Chl); *f-1* – распределение As в пирите; *f-2* – сростки галенита (Gn), арсенопирита (Apy) и золота (Au) в пирите (проба 1472-2); *b* – распределение As, S и Fe в зерне пирита (проба 1472-3)

**Fig. 5. Heterogeneous distribution of arsenic impurity (light) in pyrite:**

*a* – pyrite grain with inclusions of sphalerite (Sp) and chlorite (Chl); *f-1* – As distribution in pyrite; *f-2* – intergrowths of galena (Gn), arsenopyrite (Apy), and gold (Au) in pyrite (Sample 1472-2); *b* – As, S, and Fe distribution in a pyrite grain (Sample 1472-3)



**Рис. 6. Микроминеральные включения в пирите:**

*a, b* – арсенопирит, галенит, сфалерит и кварц (месторождение Верхнеияуское-2, рудные жилы); *c, d* – сростки титанита с рутилом и калиевым полевым шпатом (f-1), сростки титанита с биотитом и альбитом (f-2), золото с халькопиритом (f-3) (минерализованные зоны рудопоявления Ягодное); Apy – арсенопирит, Gn – галенит, Sp – сфалерит, Ccp – халькопирит, Ab – альбит, Fsp – калиевый полевой шпат, Amp – амфибол, Qz – кварц, Bt – биотит, Ttn – титанит, Rt – рутил, Au – золото

**Fig. 6. Micromineral inclusions in pyrite:**

*a, b* – arsenopyrite, galena, sphalerite, and quartz (Verkhneiyayuskoye-2 deposit, ore veins); *c, d* – intergrowths of titanite with rutile and potassium feldspar (f-1), intergrowths of titanite with biotite and albite (f-2), gold with chalcopyrite (f-3) (mineralized zones of the Yagodnoye ore occurrence). Mineral abbreviations: Py – pyrite, Apy – arsenopyrite, Gn – galena, Sp – sphalerite, Ccp – chalcopyrite, Ab – albite, Fsp – potassium feldspar, Amp – amphibole, Qz – quartz, Bt – biotite, Ttn – titanite, Rt – rutile

Состав элементов-примесей в пирите из жил и рудовмещающих пород, установленных методом ICP-MS, достаточно хорошо увязывается с наличием микровключений сульфидов, что подтверждается микроскопическими наблюдениями. В большей части зёрен пирита, отобранных из сульфидно-кварцевых жил, выявлены галенит, сфалерит, халькопирит, арсенопирит, самородное золото (рис. 6, *a, b*).

В зёрнах пирита из минерализованных зон отмечено большое количество включений породообразующих минералов, захваченных при его росте (см. рис. 6, *c, d*): амфибол, биотит, альбит, титанит с рутилом и калиевым полевым шпатом. В меньшей степени присут-

ствуют микровключения рудных минералов – халькопирита, галенита, сфалерита.

Детальное исследование руд и рудовмещающих пород выявило в них редкоземельную минерализацию. Она представлена монацитом, ксенотимом, алланитом, образующими крайне редкую рассеянную дисперсную вкрапленность в пирите.

#### **Обсуждение результатов и заключение.**

Пирит – главный или доминирующий минерал как в золото-сульфидно-кварцевых жилах, так и в минерализованных зонах. Кроме него в рудах присутствуют арсенопирит, сфалерит, халькопирит, галенит, самородное золото и др. Почти все перечисленные минералы нередко

фиксируются в виде микровключений в пирите, обуславливая изменчивость его примесного состава.

Результаты ICP-MS позволили обнаружить в пирите наличие рудогенных, петрогенных, редких и рассеянных, а также весь ряд редкоземельных элементов. Между элементами-примесями Cu, Zn, Pb, Au, Ag, Bi в пирите из жильных зон выявлена высокая положительная связь, обусловленная стадийностью формирования руд и, вероятно, отражающая состав рудного флюида. Группы выделенных элементов соответствуют основным минералогическим особенностям руд поздней и заключительной ассоциаций, куда входят халькопирит, сфалерит, галенит, золото, серебро, завершающейся выделением блёклых руд, самородного висмута и его сульфосоединений.

На всех рудопроявлениях установлено присутствие в пирите микровключений самородного золота с промышленными содержаниями. При этом в пирите из золото-сульфидно-кварцевых жил наблюдается устойчивая положительная корреляция Au с Ag, Zn, Cd и Pb. Что же касается минерализованных зон, то положительной связи с рудогенными элементами у золота нет, а независимое поведение в рудообразующем процессе позволяет допустить присутствие металла не только в виде микровключений, но и в виде «невидимого» золота, входящего в решётку пирита.

Установленный набор рудогенных элементов-примесей и золота в пирите соответствует комплексу элементов в литогеохимических аномалиях во вторичных ореолах рассеяния (Au, Ag, Zn, Pb, Cu, As). В них раскрываются связи между Au и сопутствующими элементами, проявленными в пирите, что отражается

на картах визуализации аномалий. Метод экспертных оценок позволяет по характеру распределения элементов в аномалиях приблизиться к пониманию их природы и прогнозу типа скрытого оруденения. Проявления жильного типа сопровождаются сильными комплексными аномалиями, что обусловлено общим составом руд, но находит отражение в наборе микропримесей и их корреляционных связей в пирите. Разрозненные аномалии Au и других рудных элементов развиты над минерализованными зонами с пиритовой минерализацией, в которой пирит отличается отсутствием корреляции золота с рудогенными элементами. Выявленные критерии различия пирита жильных и минерализованных зон позволяют наметить стратегию поисков новых рудных объектов в Манитаньрдском районе.

*Авторы выражают благодарность геологам производственных организаций, трудами которых разведывались и изучались золото-рудные проявления Манитаньрдского района, их фондовые отчёты 50-летней давности до сих пор востребованы, по ним изучается геологическое строение района уже не одним поколением геологов. Мы благодарны сотрудникам Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН – операторам Е. М. Тропникову, А. С. Шуйскому, В. А. Радаеву за проведение микроразового анализа, Н. Х. Хачатурян, проводившей минералогический анализ тяжёлой фракции руд, а также С. А. Онищенко, Т. Б. Жарковой, Ю. В. Глухову, М. Ю. Сокерину, Т. В. Антоновской за консультации в период написания статьи. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600009-2.*

## Список литературы

1. Балашов Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1976. – 267 с.
2. Вахрушев С. Н., Макаров А. Б. Минералогические особенности руд и метасоматитов золотомышьяковых проявлений одного из районов. Геохимия и минералогия первичных и вторичных ореолов. – Свердловск [Екатеринбург]: УНЦ АН СССР, 1986. – С. 84–93.
3. Викентьев И. В. Невидимое и микроскопическое золото в пирите: методы исследования и новые данные для колчеданных руд Урала // Геология рудных месторождений. – 2015а. – Вып. 57, № 4. – С. 267–298.
4. Викентьев И. В. Исследование форм нахождения золота в сульфидах. Технологическая минералогия природных и техногенных место-



- рождений // Сборник статей IX семинара по технологической минералогии. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2015б. – С. 71–76.
5. Викентьев И. В., Абрамова В. Д., Иванова Ю. Н., Тюкова Е. Э., Ковальчук Е. В., Бортников Н. С. Микропримеси в пирите золото-порфирирового месторождения Петропавловское (Полярный Урал) по данным LA-ICP-MS // Доклады академии наук. – 2016. – Вып. 470, № 3. – С. 326–330.
  6. Григорьев Н. А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. – 2003. – № 7. – С. 785–792.
  7. Ефанова Л. И., Кузнецов С. К., Тарбаев М. Б., Майорова Т. П. Золотоносность Манитанырдского района и перспективы наращивания ресурсного потенциала (Полярный Урал) // Руды и металлы. – 2020. – № 3. – С. 39–51.
  8. Знаменский С. Е., Знаменская Н. М., Тимофеев С. П. Источники минералообразующих флюидов золоторудного месторождения Муртыкты (Южный Урал) // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2018. – Вып. 27, № 2. – С. 52–60.
  9. Кузнецов С. К., Майорова Т. П., Сокерина Н. В., Филиппов В. Н. Золоторудная минерализация Верхнеиякутского месторождения на Полярном Урале // Записки Российского минералогического общества. – 2011. – Т. 140, № 4. – С. 58–71.
  10. Коробейников А. Ф., Нарсеев В. А., Пшеничкин А. Я., Ревякин П. С., Арифюлов Ч. Х. Пириты золоторудных месторождений (свойства, зональность, практическое применение). – М. : ЦНИГРИ, 1993. – 213 с.
  11. Майорова Т. П., Ефанова Л. И. Проявление золото-мышьяковистого типа Нияхойское-2 на Полярном Урале (кряж Манитанырд) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2019. – № 8. – С. 33–41.
  12. Подольская М. М., Якубович О. В. Особенности определения содержания урана и тория в пирите // Материалы XII Международной школы по наукам о Земле им. профессора Л. Л. Перчука. – Петропавловск-Камчатский : Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2020. – С. 43.
  13. Прохоров В. Г. Пирит (к геохимии, минералогии, экономике и промышленному использованию). – Новосибирск : Наука, 1970. – 188 с.
  14. Римская-Корсакова М. Н., Дубинин А. В. Редкоземельные элементы в сульфидах подводных гидротермальных источников Атлантического океана // Доклады академии наук. – 2003. – Вып. 389, № 5. – С. 672–676.
  15. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала. – Екатеринбург : УГГГА, 2001. – 622 с.
  16. Сахарова М. С. Типоморфные особенности состава пирита золото-сульфидных месторождений // Труды минералогического музея им. А. Е. Ферсмана. – 1968. – Вып. 18. – С. 228–234.
  17. Таусон В. Л., Пастушкова Т. М., Бессарабова О. И. О пределе и форме вхождения золота в гидротермальный пирит // Геология и геофизика. – 1998. – Вып. 39, № 7. – С. 924–933.
  18. Шишкин М. А., Астапов А. П., Кабатов Н. В. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Q-41 – Воркута. Объяснительная записка. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2007. – 541 с.
  19. Шишкин М. А., Малых О. Н., Попов П. Е., Колесник Л. С. Государственная геологическая карта РФ м-ба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-V, VI (Воркута). Объяснительная записка. – М. : МФ ВСЕГЕИ, 2013. – 262 с.
  20. Якубович О. В., Гедз А. М., Викентьев И. В., Котов А. Б., Гороховский Б. М. Миграция радиогенного гелия в кристаллической структуре сульфидов и возможности их изотопного датирования // Петрология. – 2019. – Вып. 27, № 1. – С. 65–86.
  21. Boyle R. W. The geochemistry of gold and its deposits // Bulletin Geological Survey of Canada. – 1979. – V. 280. – P. 584.
  22. Guangzhou M., Renmin H., Jianfeng G., Weiqiang L., Kuidong Z., Guangming L., Huijuan L. Existing forms of REE in gold-bearing pyrite of the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province, China // Journal of Rare Earths. – 2009. – V. 27, № 6. – P. 1079–1087.
  23. Keith M., Smith D. J., Jenkin G. R. T., Holwell D. A., Dye M. D. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes // Ore Geology Reviews. – 2018. – V. 96. – P. 269–282.
  24. Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance: 1. Method and results // Journal of geophysical research. – 2007. – V. 112. – B03211.
  25. Mayorova T. P., Kuznetsov S. K., Efanova L. I., Sokerina N. V. Gold-Sulfide Mineralization in the Manitanyrd Region, Polar Urals, Russia // Minerals. – 2023. – V. 13, № 6. – P. 747.
  26. Springer J. Invisible gold. The Geology of Gold in Ontario. Miscell. Pap. 110 // Ontario Geological Survey. – 1983. – P. 240–249.

27. Tardani D., Reich M., Deditius A. P., Chryssoulis S., Sanchez-Alfaro P., Wragge J., Roberts M. P. Copper-arsenic decoupling in an active geothermal system: A link between pyrite and fluid composition // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2017. – V. 204. – P. 179–204.

28. Thomas H. V., Large R. R., Bull S.W., Maslennikov V., Berry R. F., Fraser R., Froud S., Moye R. Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo gold mine, Australia: insights for ore genesis // *Economic Geology* – 2011. – V. 106. – P. 1–31.

## References

1. Balashov Yu. A. *Geokhimiya redkozemel'nykh elementov* [Geochemistry of rare earth elements], Moscow, Nauka Publ., 1976, 267 p.
2. Vakhrushev S. N., Makarov A. B. Mineralogiko-geokhimicheskiye osobennosti rud i metasomatitov zolotomys'h'yakovykh proyavleniy odnogo iz rayonov. *Geokhimiya i mineralogiya pervichnykh i vtorichnykh oreolov* [Mineralogical and geochemical features of ores and metasomatites of gold-arsenic occurrences in one of the regions. Geochemistry and mineralogy of primary and secondary halos], Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 1986, pp. 84–93.
3. Vikentyev I. V. Nevidimoye i mikroskopicheskoye zoloto v pirite: metody issledovaniya i novyye dannyye dlya kolchedannykh rud Urala [Invisible and microscopic gold in pyrite: research methods and new data for pyrite ores of the Urals], *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of ore deposits], 2015a, V. 57, No 4, pp. 267–298. (In Russ.).
4. Vikentyev I. V. Issledovaniye form nakhozhdeniya zolota v sul'fidakh. *Tekhnologicheskaya mineralogiya prirodnykh i tekhnogenykh mestorozhdeniy* [Study of the forms of gold occurrence in sulfides. Technological mineralogy of natural and technogenic deposits], *Sbornik statey IX seminara po tekhnologicheskoy mineralogii* [Collection of articles of the IX seminar on technological mineralogy], Petrozavodsk, KarRC RAS, 2015b, pp. 71–76. (In Russ.).
5. Vikentyev I. V., Abramova V. D., Ivanova Yu. N., Tyukova E. E., Kovalchuk E. V., Bortnikov N. S. Mikroprimesi v pirite zoloto-porfirovogo mestorozhdeniya Petropavlovskoye (Polyarnyy Ural) po dannym LA-ICP-MS [Microimpurities in pyrite of the Petropavlovskoye porphyry gold deposit (Polar Urals) according to LA-ICP-MS data], *Doklady akademii nauk* [Reports of the Russian Academy of Sciences], 2016, V. 470, No 3, pp. 326–330. (In Russ.).
6. Grigoriev N. A. Sredneye sodержaniye khimicheskikh elementov v gornyykh porodakh, slagayushchikh verkhnyuyu chast' kontinental'noy kory [Average content of chemical elements in rocks composing the upper part of the continental crust], *Geochemiya* [Geochemistry], 2003, No 7, pp. 785–792. (In Russ.).
7. Efanova L. I., Kuznetsov S. K., Tarbaev M. B., Mayorova T. P. Zolotonosnost' Manitanyrdskego rayona i perspektivy narashchivaniya resursnogo potentsiala (Polyarnyy Ural) [Gold content of the Manitanyrd region and prospects for increasing resource potential (Polar Urals)], *Rudy i metally* [Ores and metals], 2020, No 3, pp. 39–51. (In Russ.).
8. Znamensky S. E., Znamenskaya N. M., Timofeev S. P. Istochniki mineraloobrazuyushchikh flyuidov zolotorudnogo mestorozhdeniya Murtytky (Yuzhnyy Ural) [Sources of mineral-forming fluids of the Murtytky gold deposit (Southern Urals)], *Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan], 2018, V. 27, No 2, pp. 52–60. (In Russ.).
9. Kuznetsov S. K., Mayorova T. P., Sokerina N. V., Filippov V. N. Zolotorudnaya mineralizatsiya Verkhneniyayuskogo mestorozhdeniya na Polyarnom Urale [Gold mineralization of the Verkhneniyaus deposit in the Polar Urals], *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Proceedings of the Russian Mineralogical Society], 2011, V. 140, No 4, pp. 58–71. (In Russ.).
10. Korobeinikov A. F., Narseev V. A., Pshenichkin A. Ya., Revyakin P. S., Arifulov Ch. Kh. Purity zolotorudnykh mestorozhdeniy (svoystva, zonal'nost', prakticheskoye primeneniye) [Pyrites of gold deposits (properties, zoning, practical application)], Moscow, TSNIIGRI Publ., 1993, 213 p.
11. Mayorova T. P., Efanova L. I. Proyavleniye zolotomys'h'yakovistogo tipa Niyakhoyskoye-2 na Polyarnom Urale (kryazh Manitanyrd) [Niyakhoi-2 gold-arsenic type occurrence in the Polar Urals (Manitanyrd ridge)], *Vestnik IG Komi NTS UrO RAN* [Bulletin of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2019, V. 8, pp. 33–41. (In Russ.).
12. Podolskaya M. M., Yakubovich O. V. Osobennosti opredeleniya sodержaniya urana i toriya v pirite [Features of determining the content of uranium and thorium in pyrite], *Materialy XII Mezhdunarodnoy shkoly po naukam o Zemle im. professora L. L. Perchuka. Institut vulkanologii i seysmologii DVO RAN* [Materials of the XII International School of Earth Sciences named after Professor L. L. Perchuk. Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences], Petropavlovsk-Kamchatsky, 2020, p. 43. (In Russ.).



13. Prokhorov V. G. Pirit (k geokhimii, mineralogii, ekonomike i promyshlennomu ispol'zovaniyu) [Pyrite (to geochemistry, mineralogy, economics and industrial uses)], Novosibirsk, Nauka Publ., 1970, 188 p.
14. Rimskaya-Korsakova M. N., Dubinin A. V. Redkozemel'nyye elementy v sul'fidakh podvodnykh gidrotermal'nykh istochnikov Atlanticheskogo okeana [Rare earth elements in sulfides from Atlantic submarine hydrothermal vents], *Doklady akademii nauk* [Reports of the Russian Academy of Sciences], 2003, V. 389, No 5, pp. 672–676. (In Russ.).
15. Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Polenov Yu. A. Mestorozhdeniya zolota Urala [Gold deposits of the Urals], Ekaterinburg, UGGGA Publ., 2001, V. 6, 22 p.
16. Sakharova M. S. Tipomorfnyye osobennosti sostava pirita zoloto-sul'fidnykh mestorozhdeniy [Typomorphic features of the composition of pyrite from gold-sulfide deposits], *Trudy mineralogicheskogo muzeya im. A. Ye. Fersmana* [Proceedings of the A. E. Fersman Mineralogical Museum], 1968, V. 18, pp. 228–234. (In Russ.).
17. Tauson V. L., Pastushkova T. M., Bessarabova O. I. O predele i forme vkhozhdeniya zolota v gidrotermal'nyy pirit [On the limit and form of gold incorporation into hydrothermal pyrite], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1998, V. 39, No 7, pp. 924–933. (In Russ.).
18. Shishkin M. A., Astapov A. P., Kabatov N. V. [et al.] Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1000000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Ural'skaya. List Q-41 – Vorkuta. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Ural series. Sheet Q-41 – Vorkuta. Explanatory letter], Sankt-Peterburg, VSEGEI, 2007, 541 p.
19. Shishkin M. A., Malykh O. N., Popov P. E., Kolesnik L. S. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF masshtaba 1 : 200000. Izdaniye vtoroye. Seriya Polyarno-Ural'skaya. List Q-41-V, VI (Vorkuta). Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation, scale 1 : 200,000. Second edition. Polar-Ural series. Sheet Q-41-V, VI (Vorkuta). Explanatory letter], Moscow, MF VSEGEI Publ., 2013, 262 p.
20. Yakubovich O. V., Gedz A. M., Vikentyev I. V., Kotov A. B., Gorokhovskiy B. M. Migratsiya radiogenogo geliya v kristallicheskoj strukture sul'fidov i vozmozhnosti ikh izotopnogo datirovaniya [Migration of radiogenic helium in the crystal structure of sulfides and the possibilities of their isotope dating], *Petrologiya* [Petrology], 2019, V. 27, No 1, pp. 65–86. (In Russ.).
21. Boyle R. W. The geochemistry of gold and its deposits, *Bulletin Geological Survey of Canada*, 1979, V. 280, p. 584.
22. Guangzhou M., Renmin H., Jianfeng G., Weiqiang L., Kuidong Z., Guangming L., Huijuan L. Existing forms of REE in gold-bearing pyrite of the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province, China, *Journal of Rare Earths*, 2009, V. 27, No 6, pp. 1079–1087.
23. Keith M., Smith D. J., Jenkin G. R. T., Holwell D. A., Dye M. D. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes, *Ore Geology Reviews*, 2018, V. 96, pp. 269–282.
24. Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance: 1. Method and results, *Journal of geophysical research*, 2007, V. 112., B03211.
25. Mayorova T. P., Kuznetsov S. K., Efanova L. I., Sokerina N. V. Gold-Sulfide Mineralization in the Manitynyrd Region, Polar Urals, Russia, *Minerals*, 2023, V. 13, No 6, p. 747.
26. Springer J. Invisible gold. The Geology of Gold in Ontario. Miscell. Pap. 110, *Ontario Geological Survey*, 1983, pp. 240–249.
27. Tardani D., Reich M., Deditius A. P., Chryssoulis S., Sanchez-Alfaro P., Wrage J., Roberts M. P. Copper-arsenic decoupling in an active geothermal system: A link between pyrite and fluid composition, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, V. 204, pp. 179–204.
28. Thomas H. V., Large R. R., Bull S.W., Maslennikov V., Berry R. F., Fraser R., Froud S., Moye R. Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo gold mine, Australia: insights for ore genesis, *Economic Geology*, 2011, V. 106, pp. 1–31.

**Ефанова Людмила Ивановна** (gmin2004@mail.ru)

кандидат геолого-минералогических наук, старший геолог <sup>1</sup>

**Ковальчук Наталья Сергеевна**

кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник <sup>1</sup>

**Майорова Татьяна Петровна**

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии Коми научного центра УРО РАН, г. Сыктывкар, Россия

<sup>2</sup> Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, г. Сыктывкар, Россия