



УДК 553.3

Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

DOI: 10.19110/geov.2024.12.2

Типохимизм сульфидов Au-Pd-рудопроявления Озерное (Полярный Урал)

А. П. Кондрикова¹, Е. Э. Тюкова^{1, 2}, И. Д. Соболев¹, И. В. Викентьев¹

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия, *viken@igem.ru*

² Научный геоинформационный центр РАН, Москва, Россия

В работе приведены первые результаты локальных исследований содержаний и распределения микропримесей в минералах малосульфидных руд различных ассоциаций (медно-)золото-палладиевого проявления Озерное, открытого в 2002 г. на Полярном Урале и локализованного в клинопироксенитах и верлитах среднего палеозоя. Методом LA-ICP-MS выявлено, что набор и уровни концентраций элементов-примесей в трех ассоциациях (пирротин-пиритовой, пирротин-халькопирит-кубанитовой и борнит-халькопиритовой) различны. Для пирита первой ассоциации, распространенной на флангах рудной зоны, характерны высокие содержания примесей Со и Se, умеренные Ni и следовые Bi, Sb и Ag. В минералах пирротин-халькопирит-кубанитовой ассоциации, распространенной в пределах рудных зон, отмечается присутствие значимых содержаний Ag, Pb и Se, а также группы элементов (Sb, Bi, Au, Te и Pd), встречающихся в заметном количестве, но спорадически, что может быть обусловлено микровключениями их собственных минералов. В сульфидах меди борнит-халькопиритовой ассоциации, особенно в борните, фиксируются наиболее высокие концентрации Ag, Se, Te, Pd. Состав основных компонентов рудных и нерудных минералов изучен методом электронно-зондового микроанализа; основное внимание уделено изучению сульфидов, Fe-оксидов, оливина и пироксена.

Ключевые слова: клинопироксениты, палладий, золото, микропримеси, метод LA-ICP-MS, электронно-зондовый микроанализ, Полярный Урал

Typochemistry of sulfides of the Ozernoe Au-Pd occurrence (Polar Urals)

A. P. Kondrikova¹, E. E. Tyukova^{1, 2}, I. D. Sobolev¹, I. V. Vikentiev¹

¹ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia ² Scientific Geoinformation Center RAS, Moscow, Russia

The paper presents the first results of local studies of the content and distribution of trace elements in minerals of low-sulfide ores of various associations of the Ozernoe (copper-)gold-palladium occurrence, discovered in 2002 in the Polar Urals and localized in clinopyroxenites and wehrlites of the Middle Paleozoic. According to LA-ICP-MS data, the diversity and concentration levels of trace elements in three associations (pyrrhotite-pyrite, pyrrhotite-chalcopyrite-cubanite and bornite-chalcopyrite) are different. Thus, pyrite of the first association, common on the flanks of the ore zone, is characterized by high concentrations of Co, Se, moderate ones of Ni and traces of Bi, Sb, Ag. The minerals of the pyrrhotite-chalcopyrite-cubanite association, common within the ore zones, commonly contain Ag, Pb and Se, as well as groups of elements (Sb, Bi, Au, Te and Pd), occurring in noticeable amounts, but sporadically, which may be conditioned by microinclusions of their minerals. The highest concentrations of Ag, Se, Te, and Pd are recorded in copper sulfides of the bornite-chalcopyrite association, especially in bornite. The main components of ore and non-metallic minerals (sulfides, Fe-oxides, olivine and pyroxene) has been studied by electron probe microanalysis.

Keywords: clinopyroxenites, palladium, gold, trace impurities, LA-ICP-MS method, electron probe microanalysis, Polar Urals

Введение

Рудопроявление малосульфидных Au-Pd-руд Озерное было открыто в 2002 году в процессе доизучения территории Полярного Урала при проведении геолого-съемочных работ (ГДП-200) на правобережье руч. Дзелятышор — левого притока р. Малая Хараматолоу (Котельников, Романова, 2004). Рудопроявление расположено в самой северо-восточной оконечности Войкаро-Сынинского габбро-гипербазитового массива (рис. 1) и приурочено к оливинит-верлит-клинопироксенитгаббровому кэршорскому плутоническому комплексу (O₃k). Магматические породы комплекса представлены безоливиновыми, оливинсодержащими и оливиновыми клинопироксенитами, габбро, верлитами и оли-

Для цитирования: Кондрикова А. П., Тюкова Е. Э., Соболев И. Д., Викентьев И. В. Типохимизм сульфидов Au-Pd-рудопроявления Озерное (Полярный Урал) // Вестник геонаук. 2024. 12(360). С. 12–25. DOI: 10.19110/geov.2024.12.2

For citation: Kondrikova A. P., Tyukova E. E., Sobolev I. D., Vikentiev I. V. Typochemistry of sulfides of the Ozernoe Au-Pd occurrence (Polar Urals). Vestnik of Geosciences, 2024, 12(360), pp. 12–25, doi: 10.19110/geov.2024.12.2





Рис. 1. Положение Озерного рудопроявления в складчато-надвиговой структуре Полярного Урала

На врезке: а) тектоническая схема северной части Уральского складчатого пояса (по: Кузнецов и др., 2000). 1 — мезозойскокайнозойские комплексы чехла Восточно-Европейской платформы и Западно-Сибирской плиты; 2 — палеозойские комплексы Западного Урала; 3 — докембрийские комплексы Западного Урала; 4 — ранне- и среднепалеозойские комплексы Восточного Урала; 5 — Главная Уральская сутура; 6 — контур Войкарской зоны Полярного Урала; b) схема строения Войкарской зоны (по: Шишкин и др., 2007; Зылева и др., 2014) с упрощениями: 1 — позднедокембрийские и палеозойские образования Западно-Уральской мегазоны; 2 — мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 3—5 — образования Войкарской зоны: преимущественно ордовикские метаморфизованные гипербазиты (3) и габброиды (4), преимущественно ордовикскодевонские магматические и осадочно-вулканогенные образования (5); 6 — благороднометалльные объекты: месторождения золота (а), Pd-Cu- и Pt-Au-Pd-рудопроявления (b); 7 — Главная Уральская сутура; 8 — реки, озера

Fig. 1. Position of the Ozernoye ore occurrence in the fold-and-thrust structure of the Polar Urals. Inset:

a) the tectonic scheme of the northern part of the Ural folded belt, based (according to Kuznetsov et al., 2000): 1 — Mesozoic-Cenozoic complexes of the cover of the East European Platform and the West Siberian Plate; 2 — Paleozoic complexes of the Western Urals; 3 — Precambrian complexes of the Western Urals; 4 — Early-Middle Paleozoic complexes of the Eastern Urals; 5 — the Main Uralian suture; 6 — the contour of the Voykar zone of the Polar Urals; b) scheme of the structure of the Voikar zone (according to Shishkin et al., 2007; Zyleva et al., 2014) with simplifications: 1 — Late Precambrian and Paleozoic formations of the West Ural megazone; 2 — Mesozoic-Cenozoic cover of the West Siberian plate; 3—5 — formations of the Voikar zone: mainly Ordovician metamorphosed hyperbasites (3) and gabbroids (4), mainly Ordovician-Devonian igneous and sedimentary-volcanogenic formations (5); 6 — precious metal objects: gold deposits (a), Pd-Cu and Pt-Au-Pd ore occurrences (b); 7 — the Main Uralian suture; 8 — rivers, lakes

винитами (рис. 2). Породы интенсивно метаморфизованы преимущественно в эпидот-амфиболитовой фации. Ряд исследователей (Кузнецов и др., 2007; Пыстин и др., 2010) отрицают принадлежность пород Озерного проявления к кэршорскому комплексу, в связи с тем что массив рудоносных клинопироксенитов и верлитов демонстрирует частичную дискордантность его структур по отношению к структурам окружающих пород и, вероятно, является тектонической пластиной пород, имеющих более древний возраст. Соответственно, они выделяют клинопироксениты и верлиты в самостоятельный Дзелятышорский массив, названный по одноименному ручью. Вопрос возраста пород массива остается дискуссионным в связи со сложностью датирования гипербазитов; в работах предшественников возраст пород оценивается от среднеордовикского до девонского. Для габброидов трех более южных участков развития кэршорского комплекса U-Pb-методом были получены конкордантные датировки единичных зерен циркона (SHRIMP II, ЦИИ ВСЕГЕИ), составляющие 454 ± 7, 446.8 ± 4.3 и 446 ± 2 млн лет (3 пробы по 10 цирконов), что позволяет говорить о позднеордовикском возрасте пород комплекса (Ремизов и др., 2010).

Проявление довольно хорошо изучено (Пыстин и др., 2006, 2011; Шишкин и др., 2007; Потапов, 2011^{*} и др.).

13

^{*} Потапов И. Л. Структура, вещественный состав и минерагения Дзелятышорского верлит-клинопироксенитового массива (Полярный Урал): Автореф. канд. дис. Сыктывкар: ИГ КомиНЦ УрО РАН, 2011. 26 с.

Potapov I. L. Structure, material composition and minerageny of the Dzelyatishorsky wehrlite-clinopyroxenite massif (Polar Urals). Abstract of Ph.D. diss. Syktyvkar: IG KSC UB RAS, 2011, 26 p. (in Russian)



Рис. 2. Геологическая схема Au-Pd-проявления Озерное, составлена с использованием материалов Ямальской горной компании (Генералов и др., 2008):

1 — дуниты и гарцбургиты нерасчлененные райизско-войкарского комплекса (PZ1?); 2—6 — породы кэршорского «полосчатого» комплекса (O₃?): 2 — верлиты и оливиниты нерасчлененные, 3 — клинопироксениты высокооливиновые (оливина 20—40 об.%), 4 — клинопироксениты оливиновые, 5 — клинопироксениты, 6 — габброиды; 7 — аподолеритовые и апогаббровые бластомилониты с полосчатой текстурой, предположительно относящиеся к лагортаюскому комплексу параллельных даек (O₃); 8 — аллювиальные и флювиогляциальные отложения (Q_{IV}); 9 — канавы; 10—12 — выходы рудных тел: 10 — Au-Pt-Pd, 11 — Cu, 12 — железорудные; 13 — точки наших геологических наблюдений и отбора образцов

Fig. 2. Geological scheme of the Ozernoye Au-Pd occurrence, compiled with materials from the Yamal Mining Company (Generalov et al., 2008):

1 — undifferentiated dunites and harzburgites of the Raiz-Voikar complex (PZ1?); 2—6 — rocks of the Kershor "banded" complex (O₃?): 2 — undifferentiated wehrlites and olivinites, 3 — high-olivine clino-pyroxenites (olivine 20—40 vol.%), 4 — olivine clino-pyroxenites, 5 — clinopyroxenites, 6 — gabbroids; 7 — apodolerite and apogabbro blastomylonites with a banded texture, presumably related to the Lagortayu complex of parallel dikes (O₃); 8 — alluvial and fluvioglacial deposits (Q_{IV}); 9 — ditches; 10—12 — outcrops of ore bodies: 10 — Au-Pt-Pd, 11 — Cu, 12 — iron ore; 13 — points of our geological observations and sampling

Была поведена разведка рудопроявления с проходкой траншей и серии колонковых скважин и их опробованием, и оценены его ресурсы. Минералогическим исследованиям руд проявления посвящен целый ряд работ (Кузнецов и др., 2004, 2007; Пыстин и др., 2006, 2007, 2012; Пыстина и др., 2006; Потапов, 2011*; Murzin et al., 2022). В рудах проявления основной интерес представляют палладий (С_{Pd} = 0.1—1.66 г/т, среднее — 0.28 г/т) и золото (С_{Аи} = 0.1—2.15 г/т, иногда выше; среднее — 0.27 г/т); менее значимы платина (С_{Рt} = 0.04—0.26 г/т, среднее — 0.05 г/т) и медь (Шишкин и др., 2007). Оруденение рассеянно- и редковкрапленное, в основном локализуется в клинопироксенитах, относимых к кэршорскому комплексу. На проявлении Озерное оценены прогнозные ресурсы по категории P₂: палладия — 54.7 т, золота — 52.8 т, платины — 9.8 т.

Целью данной работы было выявление особенностей распределения элементов-примесей в сульфидах и магнетите руд Озерного рудопроявления. Микропримеси в составе рудных минералов ранее здесь практически не изучались.

Методы исследований

В пределах Озерного рудопроявления в 2023— 2024 гг. авторами были проведены полевые работы, выполнено выборочное картирование и опробование, в том числе и сохранившегося на участке керна колонковых скважин. В результате работ собрана представительная коллекция, насчитывающая 120 образцов для петрографических, минералогических, геохимических и изотопных исследований. Микроскопические исследования и последущие анализы выполнены в аншлифах прозрачно-полированных шлифов, в отдельных случаях — в эпоксидных шашках с замонтированными зернами рудных минералов.



Исследование содержаний основных компонентов минералов пород и руд выполнено в ИГЕМ РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе (PCMA) Jeol JXA-8200, оснащенном пятью волновыми и одним энергодисперсионным спектрометрами; элементы определялись при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе на цилиндре Фарадея 20 нА, диаметре пучка 1 мкм (аналитик Е. В. Ковальчук), а также на сканирующем микроскопе JSM-5610, оснащенном системой энергодисперсионного микроанализа INCA-450 и спектрометром AztecOne (аналитик Л. А. Левицкая); изображения получены в режиме обратнорассеянных электронов (BSE). Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток на цилиндре Фарадея 20 нА, диаметр пучка 1 мкм. Время экспозиции на все элементы составляло 10 сек на пике и по 5 сек на фоне с обеих сторон. В качестве эталонов использованы Sb₂S₃, CdSe, ZnS, HgS, CuFeS₂, AgSbS₂, Bi₂Te₃, GaAs, PbS и химически чистые металлы. Аналитические линии: для элементов Zn, S, Cu, Fe, Ni, Co — K α ; для Ag, As, Te, Sb, Se, Pd, Pt — La; для Hg, Bi, Pb — Ма, для Cd — Lβ. При анализе силикатов в качестве стандартов на определяемые элементы использовались соединения, близкие по составу к исследуемым фазам. Расчет поправок осуществлялся по методу ZAF-коррекции с использованием программы фирмы JEOL.

Изучение микропримесей в минералах выполнено с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерным пробоотбором (LA-ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре ThermoXSeries2 с системой лазерного пробоотбора NewWave UP213 (Викентьев и др., 2016)в центре коллективного пользования «ИГЕМ-Аналитика» в ИГЕМ РАН (аналитик В. Д. Абрамова). Для анализа использовались коммерческий сульфидный стандарт USGS mass-1 (Wilson et al., 2002) и сульфидный стандарт в пирротиновой матрице (по 20 ppm ЭПГ, золота и серебра), синтезированный в ИГЕМ РАН по методу (Ballhaus et al., 2006) и аттестованный в нескольких не-

зависимых лабораториях. Вскрытие зерен сульфидов осуществлялось с помощью профильной (бороздовой) абляции; диаметр луча лазера 60 µm, частота 10 Гц, энергия на поверхности образца 7—8 Дж/см². Длина аналитического профиля составляла 200-300 мкм, пройденного лучом лазера за 1.5-2 мин (скорость прожига по линии — 5 мкм/с). Абляция начиналась после 30 с измерения фона. По каждому профилю получается много десятков анализов химического состава минералов — по макрокомпонентам (оценочно) и микропримесям (основная задача данного метода); предел чувствительности для большинства элементов составлял 0.02—0.05 ррт. Помимо таблиц с результатами при анализе получаются графики (зачастую называемые «спектрами распределения»), представляющие собой временные развертки, на которых видно количество импульсов каждого элемента, подсчитанных массспектрометром в поступающей в него из камеры лазерного пробоотбора плазме. Развертки удобны для наглядного представления уровня содержания и равномерности распределения примесных компонентов. Для сопоставлений обычно выбираются участки без включений (без «пиковых» значений), отдельные для каждого минерала, данные по которым усредняются (области усреднения показаны рамками в верхних частях спектров на приводимых в статье рисунках). Расчет данных был проведен в приложении Iolite для программы Igor Pro (Paton et al., 2011).

Краткая геологическая и петрографическая характеристика

В районе рудопроявления Озерное породы кэршорского «полосчатого» комплекса представлены серией тектонических пластин, которые включают в себя амфиболизированные габбро с различными цветовыми индексами (от нормальных до меланократовых, рис. 3, g) и утратившие первично-магматическую структуру амфиболиты, оливиниты, верлиты, а также оли-



Рис. 3. Взаимоотношения магматических образований и их изменения: а — пересечение оливинитов клинопироксенитами; b—d — дайкоподобные образования разного состава в измененных габброидах; е — амфиболизированные габброиды с директивной текстурой; f — аполейкоплагиогранитовые бластомилониты, g — контакт тулитовых габбро с амфиболизированными габброидами

Fig. 3. Relations of igneous formations and their alteration. a – intersection of olivinites with clinopyroxenites; b–d – dykelike formations of different compositions in altered gabbroids; e – amphibolized gabbroids with directive structure; f – apoleicoplagiogranitic blastomylonites, g – contact of thulite gabbroes with amphibolized gabbroids

винсодержащие и оливиновые клинопироксениты. Наблюдаются пересечения оливинитов клинопироксенитами (рис. 3, а). В северной, наиболее разгнейсованной части массива наблюдаются случаи неоднородного осветления за счет эпигенетической (синметаморфической?) дифференциации вещества. В некоторых случаях отмечаются кварц-полевошпатовые линейные зоны по жилам и дайкам, представленные апоплагиоклазитовыми и аполейкоплагиогранитовыми бластомилонитами с неяснополосчатой, линзовидно-полосчатой текстурой и бластопорфировой структурой, с реликтовыми, частично альбитизированными субидиоморфными порфиробластами плагиоклаза (рис. 3, f). Одними из наиболее поздних плутонических образований рудопроявления Озёрное являются гигантозернистые тулитовые габбро (рис. 3, g), в которых отмечается уменьшение зернистости по мере приближения к контакту со средне- и мелкозернистыми габброидами кэршорского комплекса.

Преобладающие в качестве рудовмещающих клинопироксениты с различным содержанием оливина и менее распространенные верлиты рудопроявления Озерное имеют пятнистую, вкрапленную текстуру и средне-, крупнозернистую, гипидиоморфнозернистую до панидиоморфнозернистой с элементами петельчатой и пойкилоофитовой структуру. Оливин в количестве до 20 об. % выполняет интерстиции между кристаллами клинопироксена. Для верлитов с пятнистой, вкрапленной текстурой и равномерно-зернистой, среднезернистой, гипидиоморфнозернистой структурой отмечаются примерно равные соотношения оливина и клинопироксена. Метаморфические преобразования главным образом выражены в амфиболизации: кристаллы роговой обманки ксеноморфной и ромбической морфологии достаточно равномерно замешают крупные зерна клинопироксена. В редких случаях роговая обманка замещает кристаллы клинопироксена по каймам и отмечается в интерстициях между другими породообразующими минералами. В единичных случаях по клинопироксену развивается хлорит. Оливин в породах замещается преимуще-



Рис. 4. Характер изменений минерализованных клинопироксенитов и верлитов Озерного рудопроявления: а хадакристаллы серпентинизированного и замещенного лизардитом оливина (Lz) в клинопироксене (Срх), частично замещенном амфиболом (Amp), шлиф ОЯ-9; b — амфиболизация клинопироксена по массе кристалла, шлиф ОЯ-48-2. Изображения в проходящем свете, николи скрещены

Fig. 4. Character of substitution in mineralized clinopyroxenites and vehrlites of the Ozernoye ore occurrence: a – hadacrysts of lizardite-replaced olivine (Lz) in clinopyroxene (Cpx), partially replaced by amphibole (Amp), thin section OЯ-9; b – amphibolization of clinopyroxene, thin section OЯ-48-2. Images in transmitted light, crossed nicols

Таблица 1. Составы оливина и клинопироксена в клинопироксенитах и верлитах рудопроявления Озерное (РСМА, мас. %)

Table 1. Compositions of olivine and clinopyroxene in clinopyroxenites and wehrlites of the Ozernoye ore occurrence (EPMA, wt.%)

№ обр. Sample No.	Минерал Mineral	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	NiO	TiO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	Сумма Sum
ОЯ-6-1	Ol	38.69			24.88		36.68	0.01	0.05		0.39	0.01	100.70
ОЯ-6-1	Ol	38.15			27.59		34.86	0.02	0.03		0.36		101.01
ОЯ-11	Ol	37.77			23.37		37.59	0.01	0.09		0.41		99.24
ОЯ-11	Ol	37.95			23.41	0.01	37.77	0.01	0.08		0.41		99.64
ОЯ-12-2	Ol	37.74			21.00	0.02	39.33		0.05	0.01	0.48	0.01	98.65
ОЯ-12-2	Ol	37.96			20.28	0.03	39.80	0.01	0.01		0.43	0.02	98.55
ОЯ-6-1	Срх	53.22	0.12		6.12	2.77	14.82	23.46	0.03	0.23	0.15	0.10	101.03
ОЯ-6-2	Cpx	57.37	0.21	0.17	4.57	2.25	21.18	13.02	0.03	0.07	0.11		98.98
ОЯ-11	Срх	52.51	0.11		5.33	2.19	14.79	23.75	0.01	0.16	0.21	0.07	99.12
ОЯ-11	Срх	53.22	0.09		6.07	1.57	14.81	24.16		0.12	0.16	0.08	100.27
ОЯ-12-2	Срх	51.67	0.06		5.74	1.56	14.88	24.34	0.01	0.08	0.19	0.02	98.56
ОЯ-12-2	Срх	53.72	0.05		4.23	0.89	15.13	24.77	0.01	0.06	0.23	0.02	99.10

Примечание: Ol — оливин, Cpx — клинопироксен; пропуск — элемент ниже предела обнаружения. *Note*: Ol — olivine, Cpx — clinopyroxene; if omitted — element below detection limit.

ственно боулингитом (рис. 4, b) и редкими тонкочешуйчатыми выделениями талька по объему, а по трещинам — петельчатым лизардитом, изредка волокнистым антигоритом и магнетитом, что, вероятно, по условиям отвечает метаморфизму фации зелёных сланцев (рис. 4).

Клинопироксен, по составу соответствующий диопсиду, представлен идиоморфными кристаллами размером от 0.3 до 7 мм, а интерстициальный оливин, содержащий в своем составе до 27.6 мас. % оксида железа (табл. 1), — ксеноморфными, реже округлыми идиоморфными трещиноватыми кристаллами размером до 5 мм. Содержание оливина составляет до 5 об. % в оливинсодержащих разностях и до 20 об. % — в оливиновых клинопироксенитах, в верлитах соотношение клинопироксена и оливина примерно равное. В клинопироксенитах отмечается незначительный идио-



морфизм клинопироксена по отношению к оливину, также оливин отмечается в виде хадакристаллов в клинопироксене, что обусловливает пойкилоофитовую структуру пород (рис. 4, а).

Рудные ассоциации

Вкрапленная текстура рудоносных клинопироксенитов и верлитов обусловлена значительным содержанием в них *магнетита*, содержание которого составляет 7—10 об. %. В оливинсодержащих и оливиновых клинопироксенитах и верлитах выделяются четыре морфологические разности магнетита (рис. 5, табл. 2): 1 — мирмекиты магнетита, образующие вростки в первично-магматических силикатах (рис. 5, а); 2 — кристаллический магнетит, имеющий ксеноморфную морфологию и размеры до 7 мм (рис. 5, b); 3 — магнетит, выполняющий отдельность в клинопироксене и представленный либо пластинчатыми кристаллами, либо мелкими ксеноморфными зернами размером до 0.5 мм (рис. 5, с); 4 — магнетит, выполняющий трещины в оливине (рис. 5, с).

В магнетитах различных морфологических разновидностей методом электронно-зондового микроанализа было изучено содержание примесей V, Ti и Cr. Для кристаллического магнетита, который часто образует срастания с сульфидами, а также отмечается в основной массе, характерен достаточно большой разброс химического состава. Содержание оксида титана в магнетитах ксеноморфной морфологии колеблется в пределах 0.02—2.13 мас. %, оксида хрома — 0.01— 2.5 мас. %, оксида ванадия — от 0.01 до 1.1 мас. %. Следует отметить, что в породах отмечаются лишь единичные типичные структуры распада ильменит-магнетитового состава, которые являются продуктами изменения магматического титаномагнетита. Мирмекиты магнетита характеризуются хорошо выдержанным по сравнению с другими разностями содержанием ванадия (0.5—0.98 мас. %). Такие структуры образуются на позднемагматических этапах при повышении давления кислорода в расплаве с участием водяного пара и, как следствие, окислении железа (Юрьев, 1969). В магнетите, выполняющем трещины в оливине, примесь ванадия не зафиксирована, тогда как в отдельности

Рис. 5. Морфологические генерации магнетита: а — мирмекитовые вростки магнетита (Mag) в клинопироксене (Срх), шлиф ОЯ-39-16. Проходящий свет, николи скрещены; b — кристаллы магнетита в в срастании с пиритборнит-халькопиритовым агрегатом (Ру, Вп; Сср), шлиф ОЯ-6-2. Отраженный свет, николи параллельны; с — магнетит, выполняющий трещины в оливине (Ol), и отдельность в клинопироксене (Срх), шлиф ОЯ-12-1. Проходящий свет, николи скрещены

Fig. 5. Morphological generations of magnetite: a — myrmekite intergrowths of magnetite (Mag) in clinopyroxene (Cpx) thin section OЯ-39-1b. Transmitted light, crossed nicols; b crystalline magnetite intergrown with pyrite-chalcopyritebornite aggregate (Py, Ccp, Bn), thin section OЯ-6-2. Reflected light, parallel nicols; c — magnetite filling cracks in olivine (Ol) and joint in clinopyroxene (Cpx), thin section OЯ-12-1. Transmitted light, crossed nicols Таблица 2. Химический состав магнетита (РСМА, мас. %) различных морфологических разновидностей в клинопироксенитах и верлитах рудопроявления Озерное по результатам электронно-зондового микроанализа

Table 2. Chemical composition of magnetite (EPMA, wt.%) of various morphological varieties in clinopyroxenitesand wehrlites of the Ozernoye ore occurrence according to the results of electron probe microanalysis

№ обр.	Тип*	SiO	MaO	EaO	TiO	NiO	A1 O	MnO	CaO	V O	7n0	Nh O	Cr O	Σ
Sample No.	Type	3102	wigo	гео	1102	MO	A_2O_3	MIIO	CaU	v ₂ O ₃	ZIIO	NU ₂ U ₅	$C1_{2}O_{3}$	2
ОЯ-6-3	2	0.02	0.50	86.98	1.86	0.04	1.06	0.21		0.78		0.04	0.74	92.21
ОЯ-12-2	2	0.04	0.33	90.58	0.09	0.02	0.12	0.04	0.02	0.13	0.01		0.05	91.41
ОЯ-12-2	1	0.02	0.22	90.69	0.15	0.02	0.32		0.11	0.50	0.01	0.03	0.35	92.42
ОЯ-13	4		0.60	92.65	0.06	0.08		0.14			0.02		0.09	93.64
ОЯ-6-1	1	0.03	0.09	89.05	0.75	0.07	0.21	0.11	0.18	0.98		0.02	0.34	91.82
ОЯ-11	3	0.03	0.01	87.77	0.06	0.09	0.28	0.04	0.39	0.87		0.02	2.59	92.15

Примечание. *морфологические разновидности: 1 — мирмекиты магнетита — вростки в первично-магматических силикатах; 2 — кристаллический магнетит; 3 — магнетит, выполняющий отдельность в клинопироксене; 4 — магнетит, выполняющий трещины в оливине; пустые ячейки здесь и в табл. 3 — элемент ниже предела обнаружения.



клинопироксена минерал характеризуется повышенным содержанием V_2O_5 , что указывает на разные временные интервалы и источники вещества при образовании этих разностей магнетита. Для выделения генераций магнетита по характеру срастаний и химическому составу проводятся более детальные микрозондовые исследования.

Сульфидная минерализация во вмещающих породах составляет не более 3 об. % и проявлена в рудных зонах и между ними по-разному. Так, по наблюдениям керна скважин, вне главной рудной зоны проявлена пирротин-пиритовая ассоциация в виде моносульфидных (без карбоната, без силикатов) прожилков, а также в виде вкрапленности и гнезд в полевошпат-кварцевых образованиях в амфиболизированных габброидах и пироксенитах. В составе ассоциации также присутствует небольшое количество халькопирита и магнетита. В породах флангов проявления в пирротин-пиритовой ассоциации преобладает пирит, который образует кубические кристаллы и их агрегаты. В этой ассоциации кубический пирит иногда псевдоморфно замещается пирротином (рис. 6, с), или минералы образуют субпараллельные реакционные срастания с зоной халькопирита между ними (рис. 6, a, b), а также пирит непсевдоморфно замещается пирротином.

Пирротин-халькопирит-кубанитовая ассоциация распространена в пределах рудных зон в пироксенитах, иногда мелкокристаллических, а также в тек-

Рис. 6. Взаимоотношения минералов пирротин-пиритовой ассоциации:

а — субпараллельное, вероятно реакционное, срастание «пирротин (Ро) + халькопирит (Сср) + пирит (Ру)» (обр. 529/169); b — то же, фрагмент; с — обрастание пирротином кубического кристалла пирита (обр. 531/121.5). Оптические снимки полированных образцов в отраженном свете, николи параллельны

Fig. 6. Relations between minerals of the pyrrhotite-pyrite association:

a — subparallel, probably wide intergrowth of pyrrhotite (Po) + chalcopyrite (Ccp) + pyrite (Py) (sample 529/169); b — the same, fragment; c — pyrrhotite fouling of cubic pyrite crystal (sample 531/121.5). Optical images of polished sections in reflected light, parallel nicols



тонизированных и измененных габброидах с директивной текстурой. Представлена рассеянной вкрапленностью (1-2 мм) в пироксенитах или линейными скоплениями (2—3 мм) в измененных габброидах. Магнетит в этой ассоциации интенсивно насыщен включениями шпинели и ильменита, образующими структуры распада (рис. 7, d), в продуктах изменения оливина встречаются мирмекиты магнетита (рис. 7, е); местами магнетит содержит редкие мелкие (1-3 мкм) включения теллуридов и других минералов Pd. В некоторых образцах магнетит образует октаэдрические кристаллы с закругленными ребрами и вершинами (растворение?). Кубанит образует рассеянную вкрапленность в пироксенитах, зерна угловатые, с выраженной спайностью (рис. 7, b), иногда встречаются срастания с халькопиритом и пирротином. Пирит ассоциации часто подвергается окислению, которое выявляет его тонкозональное и пятнистое строение (рис. 7, а).

Борнит-халькопиритовая ассоциация — основная ассоциация, продуктивная на элементы платиновой группы (ЭПГ). Представлена также рассеянной вкрапленностью преобладающего халькопирита (до 5 мм) в продуктах изменения крупнокристаллических пироксенитов. *Халькопирит-1* в этой ассоциации образует ксеноморфные зерна в срастании с борнитом, иногда цементирует кристаллы магнетита (рис. 8, а). Ближе к периферии зерен встречаются включения более ярких белых фаз, которые представлены гесситом и петцитом и минералами ЭПГ.

Борнит часто содержит халькопирит-2 в виде ламеллей распада, и наоборот (рис. 8, b). Минералы меди иногда цементируют пирит и идиоморфные кристаллы магнетита (рис. 8, b). По микротрещинам борнита и халькопирита часто развиваются халькозин и ковеллин. Особенно следует отметить каплевидные сульфидные образования этой ассоциации преимущественно халькопирит-борнитового состава, в периферической части которых наблюдается микровкрапленность яркой белой фазы, которая представлена минералами палладия. Такие включения особенно характерны для краевых частей обособлений медных минералов (рис. 8, с; 9).

Рис. 7. Взаимоотношения минералов пирротин-халькопирит-кубанитовой ассоциации:

а — пирит (Ру) зернистого строения (ОЯ-6-1); b — срастание пирротина (Ро) и кубанита (Cbn) (ОЯ-28-2); с — контактное срастание пирротина и пирита (ОЯ-22); d — магнетит (Mag) со структурами распада шпинели и ильменита (ОЯ-6-1); е — мирмекиты магнетита в серпентините вокруг оливина (ОІ) (ОЯ-6-2). Оптические снимки в отраженном свете, николи параллельны. Зерна а—d — из тяжелой фракции после травления в НF

Fig. 7. Relations between minerals of the pyrrhotite-chalcopyrite-cubanite association:

a — pyrite (Py) of granular structure (air etching) (O**Я**-6-1); b — intergrowth of pyrrhotite (Po) and cubanite (Cbn) (O**Я**-28-2); c — contact intergrowth of pyrrhotite and pyrite (O**Я**-22); d — magnetite (**Mag**) with spinel and ilmenite decomposition structures (O**Я**-6-1); e — magnetite myrmekites in serpentinite around olivine (Ol) (O**Я**-6-2). Optical images of polished sections in reflected light, parallel nicols. Grains a—d — enriched from heavy fraction after etching in HF



19



Рис. 8. Взаимоотношения минералов борнит-халькопиритовой ассоциации:

а — кристалл магнетита (Mag) цементируется халькопирит-борнитовым агрегатом (OЯ-6-2); b — ламелли халькопирита (Сср) в борните (Bn) и халькозин (Сс) по микротрещинам (OЯ-6-3); с — «капля» халькопирит-борнитового состава с включением минерала состава Pd-Te (OЯ-13); d — срастание «халькопирит + борнит» с включением пирита (Py) (OЯ-20-1); е, f — кристалл магнетита цементируется халькопиритом (OЯ-20-2). Оптические снимки в отраженном свете, николи параллельны

Fig. 8. Relations between minerals of the bornite-chalcopyrite association:

a — magnetite crystal (Mag) is cemented by chalcopyrite-bornite aggregate (O9-6-2); b — chalcopyrite (Ccp) lamellae in bornite (Bn) and chalcocite (Cc) along microcracks (O9-6-3); c — chalcopyrite-bornite droplet with an inclusion of Pd-Te mineral (O9-13); d — chalcopyrite + bornite intergrowth with pyrite (Py) inclusion (O9-20-1); e, f — magnetite crystal is cemented by chalcopyrite (O9-20-2). Optical images of polished sections in reflected light, parallel nicols



Рис. 9. Включение теллурида палладия (светлое включение состава С_{Pd} ≈ С_{Te}, вероятнее всего котульскит) в халькопирите, слева — увеличенный фрагмент с изображением включения (ОЯ-28-2)

Fig. 9. Inclusion of palladium telluride (light inclusion; composition $C_{Pd} \approx C_{Te}$, most likely kotulskite) in chalcopyrite, on the left is an enlarged fragment with an image of the inclusion (Og-28-2)



Главные элементы-примеси в пирите (зачастую это кубические кристаллы и их агрегаты) **пирротинпиритовой ассоциации**, вскрытой в основном на флангах проявления, — Co, Pb, As, иногда присутствуют незначительные примеси Bi, Sb, Ni. Характер распределения примесей различен. Так, Co обычно распределен зонально в кристаллах пирита, и его содержание колеблется в пределах 0.15—0.38 мас. % до 0.5 мас. %. Изредка встречается пирит с равномерным высоким содержанием Co (>1 мас. %, в среднем $C_{Co} = 1.5$ мас. % при $C_{As} = 22$ ppm). В пирите повсеместно фиксируется примесь Se до 100 ppm, первые ppm Pb; иногда выявляется пириотином.

Здесь же, в породах флангов проявления, вскрытых скважинами, имеется вкрапленность хромшпинелидов и оксидов железа (магнетит-гематит), для которых характерен своеобразный комплекс элементовпримесей. Главными являются **Cr, Mn, Mg, Ti, V, ино**гда Ni и еще реже Au и Ag. Распределение элементов хаотично, некоторые из пиков на графиках (Ni, Au, Ag), вероятно, обусловлены микровключениями, в том числе, возможно, и обогащенного ими пирита. Пирротин в этой ассоциации, часто в виде пятен и каём, замещает пирит. Пики элементов-примесей Со, **As**, **Bi**, **Pb тяготеют к пириту (рис. 10)**, а их провалы — к пирротину. Таким образом, при замещении пирита пирротином происходит высвобождение ряда примесей, которые, вероятно, в дальнейшем участвуют в процессе рудообразования.

В пирротин-халькопирит-кубанитовой ассоциации постоянными примесями в сульфидных минералах являются Ag, Pb и Se, а также примесь Pd, очевидно обусловленная микровключениями, т. к. в этом образце на сканирующем микроскопе установлено микровключение теллурида палладия (рис. 9).

Для сульфидов главной продуктивной на ЭПГ **борнит-халькопиритовой** ассоциации характерны примеси Те и иногда Pd. Наиболее существенная примесь теллура характерна для борнита. В халькопирите содержания примесей на порядок ниже. По данным лазерной абляции приведены средние содержания элементов по профилю, тогда как график распределения примесей демонстрирует наличие выраженных пиков содержаний элементов, которые, очевидно, соответствуют микровключениям разных минералов (рис. 11, 12).



Рис. 10. Распределение элементов-примесей по профилю лазерного микроанализа (линия прожига показана стрелкой, аналогично на рис. 11 и 12) в пирите, «пятнами» замещенном пирротином (скв.529/169). Элементы-примеси содержатся в повышенных количествах главным образом в пирите: Со = 140—200 ppm, Ni = 100—170 ppm, As = 10—25 ppm, Ag — до 5 ppm, иногда появляются пики Bi, обусловленные, вероятно, микровключениями

Fig. 10. Distribution of trace elements according to the profile of laser microanalysis (the firing line is shown by an arrow as well as on Figs. 11 and 12) in pyrite, «spotted» by pyrrhotite (borehole 529/169). Trace elements are contained in increased amounts mainly in pyrite. Co = 140–200 ppm, Ni = 100–170 ppm, As = 10–25 ppm, Ag – up to 5 ppm, sometimes Bi peaks appear, probably due to some microinclusions





Рис. 11. Распределение элементов-примесей по профилю лазерного микроанализа в срастании «халькопирит-борнит» (ОЯ-12). Примеси концентрируются главным образом в борните и составляют: Se = 6630 ppm, Ag = 3660 ppm, Te = 300 ppm; Pb локализуется в контактовой части минералов. В халькопирите примесей на порядок меньше. Коэффициенты корреляции Ag-Te-Se = 0.7–0.8

Fig. 11. Distribution of trace elements according to the profile of laser microanalysis in the chalcopyrite-bornite intergrowth (OЯ-12). The trace elements are concentrated mainly in bornite and are Se = 6630 ppm, Ag = 3660 ppm, Te = 300 ppm, Pb is localized in the contact part of the minerals. Chalcopyrite contains an order of magnitude fewer trace elements. The correlation coefficients are Ag-Te-Se = 0.7–0.8



Рис. 12. Распределение элементов-примесей по профилю лазерного микроанализа в минералах продуктивной борнит-халькопиритовой ассоциации (ОЯ-28-1):

a — Ag = 98.4—131.7 ppm, Se = 74—75 ppm, Te = 165—168 ppm; b — Se = 90—201 ppm, Ag = 127—182 ppm, Te = 91—215 ppm, Pd = 4.4 ppm, Cd = 500 ppm, Au = 0.14 ppm; c — Se = 79.3ppm, Te = 170 ppm, Ag = 105.6 ppm, Pd = 3.3 ppm, Au = 0.54 ppm

Fig. 12. Distribution of trace elements according to the profile of laser microanalysis in minerals of the productive bornitechalcopyrite association (OR-28-1):

a — Ag = 98.4—131.7 ppm, Se = 74—75 ppm, Te = 165—168 ppm; b — Se = 90—201 ppm, Ag = 127—182 ppm, Te = 91—215 ppm, Pd = 4.4 ppm, Cd = 500 ppm, Au = 0.14 ppm; c — Se = 79.3ppm, Te = 170 ppm, Ag = 105.6 ppm, Pd = 3.3 ppm, Au = 0.54 ppm



Обсуждение

Анализ пространственной локализации разнотипного оруденения в ультрабазитах Полярного Урала массивов Рай-Из и Войкаро-Сынинского, а также в габброидах их обрамления обнаруживает некоторую зональность (Волченко, 1990; Аникина, 1995*; Кузнецов и др., 2004, 2007, 2013; Murzin et al., 2022; Викентьев и др., 2024). Латеральная геохимическая зональность в распределении благородных металлов: $Pt \rightarrow Pd \rightarrow$ Au+Ag — описана на примере массива Рай-Из (Волченко, 1990), где платина концентрируется в хромитах от 5-10 мг/т до 200-300 мг/т; далее в приконтактовых частях рудных тел, в дунитах — палладий (1-30 мг/т), а золото (до 11 мг/т) встречается в узких зонах контактовых дунитов, где на границах с телами хромититов часто отмечаются хлорит-карбонатные прожилки, участки осветления пород и повышенная вкрапленность сульфидов. На проявлении Озерное отсутствуют в существенном объеме хромиты, но зато проявлены тектонически деформированные пироксениты и габброиды. Преобразования мантийных/нижнекоровых пород происходили в условиях от зеленосланцевой до амфиболитовой фаций метаморфизма; широко развита серпентинизация и амфиболизация ультрабазитов, обусловленная эксгумацией офиолитовых массивов и выведением их на верхнекоровый уровень; локально проявлена поздняя хлоритизация, отчасти эпидотизация и окварцевание пород. Все эти изменения сопровождаются разной степенью (как правило, невысокой) сульфидизации пород.

Заключение

Электронно-зондовые исследования показали, что клинопироксен — главный породообразующий минерал клинопироксенитов и верлитов, по составу отвечает диопсиду. Менее распространен в породах железистый оливин, достаточно выдержанный по составу. Выделенные при петрографическом изучении прозрачно-полированных шлифов морфологические разновидности магнетита демонстрируют в своем составе заметный разброс содержаний микропримесей титана, хрома и ванадия, за исключением мирмекитов магнетита, состав которых достаточно выдержан по ванадию. Для составления расширенных выводов о стадийности образования разновидностей магнетита и возможной их природе проводятся детальные микрозондовые исследования с использованием минеральной термометрии.

Выполненное нами изучение распределения элементов-примесей методом лазерной абляции в основных минералах руд показало, что комплекс таких примесей в минералах выделенных ассоциаций различен. Так, для пирита пирротин-пиритовой ассоциации, распространенной вне рудных зон, характерны высокие содержания примеси Со (до 1.5 мас. %), Se (до 1500 ppm), умеренные Ni (до 400 ppm) и следы Bi, Sb, Ag. При этом пирротин, замещающий пирит, существенно обедняется примесями. Постоянными примесями минералов пирротин-халькопирит-кубанитовой ассоциации, распространенной в пределах рудных зон, является Ag (до 35 ppm), Pb и Se, иногда наблюдаются всплески содержаний Sb, Bi, Au, Te и Pd, которые обусловлены микровключениями минералов. Наиболее обогащены элементами-примесями Cu-Fe сульфиды борнит-халькопиритовой ассоциации: Ag (200—3600 ppm), Se (200— 6600 ppm), Te (до 300 ppm), Pd (до 5 ppm). Максимальные концентрации примесей (и микровключения содержащих их минералов) приурочены к борниту, т. е. наиболее высокомедистой фазе.

Авторы признательны ЦКП «ИГЕМ-аналитика» (LA-ICP-MS, В. Абрамова; РСМА, Е. Ковальчук; СЭМ с ЭДС, Л. Левицкая) за аналитические исследования, И. Прудникову, М. Гайковичу и Е. Зублюк — за содействие в проведении полевых работ 2023 г. и общую поддержку, рецензентам — за внимательное прочтение рукописи и замечания, которые привели к уточнению ряда положений статьи. Работы выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ 23-17-00266.

Литература / References

- Викентьев И. В., Абрамова В. Д., Иванова Ю. Н., Тюкова Е. Э., Ковальчук Е. В., Бортников Н. С. Микропримеси в пирите золотопорфирового месторождения Петропавловское (Полярный Урал) по данным LA-ICP-MS // Докл. РАН. 2016. Т. 470. № 3. С. 326—330. Vikentiev I. V., Abramova V. D., Ivanova Yu. N., Tyukova E. E., Kovalchuk E. V., Bortnikov N. S. Trace elements in pyrite from the Petropavlovsk gold–porphyry deposit (Polar Urals): results of LA-ICP-MS analysis. Doklady Earth Sciences, 2016, V. 470, Part 1, pp. 977—981. (in Russian)
- Викентьев И. В., Тюкова Е. Э., Мокрий В. Д., Иванова Ю. Н., Шуйский А. С., Соболев И. Д. Платино-палладиевое рудопроявление Василиновское — новый тип минерализации в офиолитах Полярного Урала. Сообщ. 1. Геологическая позиция и минералогия // Геология рудн. месторожд. 2024. Т. 66. № 6. С. 699—729. Vikentyev I. V., Tyukova E. E., Mokry V. D., Ivanova Yu. N., Shuisky A. S., Sobolev I. D. Vasilinovskoe platinumpalladium occurrence as a new type of ophiolite mineralization in the Polar Urals. Report 1. Geological Position and Mineralogy. Geology of Ore Deposits, 2024, V. 66, No. 6, pp. 796—821. (in Russian)
- Волченко Ю. А. Сульфидная и самородная минерализация в гипербазитах и хромитовых рудах // Строение, эволюция и минерагения гипербазитового массива Рай-Из. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1990. С. 207—216. Volchenko Yu. A. Sulfide and native mineralization in hyperbasites and chromite ores. Structure, evolution and minerageny of the hyperbasite massif Rai-Iz. Sverdlovsk: Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, 1990, pp. 207—216. (in Russian)
- Григорьев С. И., Ремизов Д. Н. Кэршорский габброидный комплекс и проблема офиолитов Полярного Урала // Материалы XI Всерос. петрогр. совещ. Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УрО РАН, 2010. С. 191—192. Grigoriev S. I., Remizov D. N. Kershor gabbroic complex and the ophiolites problem of the Polar Urals. Proc. of

23

^{*} Аникина Е. В. Платиноиды в хромитовых рудах Полярного Урала: Автореф. канд. дис. Сыктывкар: ИГ КомиНЦ УрО РАН, 1995. 27 с.

Anikina E. V. Platinum group minerals in chromite ores of the Polar Urals. Author's abstract of Ph. D. dis., Syktyvkar: Institute of Geology Komi SC UB RAS, 1995, 27 p. (in Russian)

the XI All-Russian Petrographic. Conference. Yekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, 2010, pp. 191–192. (in Russian)

Душин В. А. Магматизм и геодинамика палеоконтинентального сектора севера Урала. М.: Недра, 1997. 213 с.

Dushin V. A. Magmatism and geodynamics of the paleocontinental sector of the Northern Urals. Moscow: Nedra, 1997, 213 p. (in Russian)

Зылева Л. И., Коновалов А. Л., Казак А. П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000. Сер. Зап.-Сибирская. Лист Q-42 — Салехард. Об. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.

Zyleva L. I., Konovalov A. L., Kazak A. P., et al. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000. West-Siberian Series. Sheet Q-42 — Salekhard. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI, 2014, 396 p. (in Russian)

Котельников В. Г., Романова Н. В. Новый тип медного золото-палладиевого оруденения на восточном склоне Полярного Урала // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XIV геол. съезда Респ. Коми. Сыктывкар, 2004. С. 40—42.

Kotelnikov V. G., Romanova N. V. The new type of copper gold-palladium mineralization on the eastern slope of the Polar Urals. Geology and mineral resources of the European north-east of Russia. Proc. of the 14th geol. congress of the Komi Republic. Syktyvkar, 2004, pp. 40– 42. (in Russian)

- Кузнецов Н. Б., Удоратина О. В., Андреичев В. Л. Палеозойское изотопное омоложение комплексов доуралид и проблема эволюции восточной окраины Восточно-Европейского континента в палеозое // Вестн. Воронежск. ун-та. Сер. геол. 2000. № 3 (9). С. 15—19. Kuznetsov N. B., Udoratina O. V., Andreichev V. L. Paleozoic isotopic rejuvenation of pre-Uralide complexes and the problem of evolution of the eastern margin of the East European continent in the Paleozoic. Vestn. Voronezh. University. Geol. Series, 2000, No. 3 (9), pp. 15— 19. (in Russian)
- Кузнецов С. К., Котельников В. Г., Онищенко С. А., Филиппов В. Н. Медно-золото-палладиевая минерализация в ультрабазитах Войкаро-Сынинского массива на Полярном Урале // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. № 5. 2004. С. 2—4.

Kuznetsov S. K., Kotelnikov V. G., Onishchenko S. A., Filippov V. N. Copper-gold-palladium mineralization in ultrabasites of the Voykar-Syninsky massif in the Polar Urals // Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS, No. 5, 2004, pp. 2–4. (in Russian)

Кузнецов С. К., Онищенко С. А., Котельников В. Г., Филиппов В. Н. Медно-золото-палладиевая минерализация в ультрабазитах Полярного Урала // Докл. РАН. 2007. Т. 414. № 1. С. 67—70.

Kuznetsov S. K., Onishchenko S. A., Kotelnikov V. G., Filippov V. N. Copper-gold-palladium mineralization in ultrabasites of the Polar Urals, Doklady Earth Sciences, 2007, V. 414, No. 1, pp. 67–70. (in Russian)

Кузнецов С. К., Шевчук С. С., Вокуев М. В., Ковалевич Р. С. Эпигенетическая палладиевая минерализация в гипербазитах Войкаро-Сынинского массива на Полярном Урале // Доклады РАН. 2013. Т. 451. № 5. С. 553—555. Kuznetsov S. K., Shevchuk S. S., Vokuev M. V., Kovalevich R. S. Epigenetic palladium mineralization in hyperbasites of the Voikaro-Syninsky massif in the Polar Urals. Doklady Earth Sciences, 2013, V. 451, No. 5, pp. 553–555. (in Russian)

Пыстин А. М., Пыстина Ю. И., Терешко В. В. и др. Состав и распределение минералов благородных и редких металлов в породах рудопроявления Озерное (Полярный Урал) // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар: Геопринт, 2006. С. 210—211.

Pystin A. M., Pystina Yu. I., Tereshko V. V et al. Composition and distribution of minerals of noble and rare metals in rocks of the Ozernoye ore occurrence (Polar Urals).
Diamonds and noble metals of the Timan-Ural region.
Syktyvkar: Geoprint, 2006, pp. 210–211. (in Russian)

Пыстин А. М., Потапов И. Л., Пыстина Ю. И., Генералов В. И., Онищенко С. А., Филиппов В. Н., Шлома А. А., Терешко В. В. Малосульфидное платинометалльное оруденение на Полярном Урале. Екатеринбург: Издво УрО РАН, 2011. 150 с.

Pystin A. M., Potapov I. L., Pystina Yu. I., Generalov V. I., Onishchenko S. A., Filippov V. N., Shloma A. A., Tereshko V. V. Low-sulfide platinum-metal mineralization in the Polar Urals. Yekaterinburg: UB RAS, 2011, 150 p. (in Russian)

Пыстин А. М., Потапов И. Л., Пыстина Ю. И. Проявление малосульфидных золото-платинометалльных руд на Полярном Урале // Записки РМО. 2012. № 4. С. 60— 73.

Pystin A. M., Potapov I. L., Pystina Yu. I. Occurrence of low-sulfide gold-platinum metal ores in the Polar Urals. Proc. RMS, 2012, No. 4, pp. 60–73. (in Russian)

- Пыстина Ю. И., Онищенко С. А., Терешко В. В. Некоторые особенности минералогии рудных минералов Cu-Pd-Pt-Au проявления Озерное на Полярном Урале // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Сыктывкар: Геопринт, 2006. С. 211—213. Pystina Yu. I., Onishchenko S. A., Tereshko V. V. Some features of the mineralogy of ore minerals of the Cu-Pd-Pt-Au occurrence Ozernoye in the Polar Urals. Diamonds and noble metals of the Timan-Ural region. Syktyvkar: Geoprint, 2006, pp. 211—213. (in Russian)
- Ремизов Д. Н., Григорьев С. И., Петров С. Ю. и др. Новые данные о возрасте габброидов кэршорского комплекса на Полярном Урале // Докл. РАН. 2010. Т. 434. № 2. С. 238—242.

Remizov D. N., Grigoriev S. I., Petrov S. Yu. et al. New data on the age of gabbroids of the Kershor complex in the Polar Urals. Doklady Earth Sciences, 2010, V. 434, No. 2, pp. 238–242. (in Russian)

Шишкин М. А., Астапов А. П., Кабатов Н. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (3-е поколение). Лист Q-41 (Воркута). Объясн. записка / Ред. В. П. Водолазская. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.

Shishkin M. A., Astapov A. P., Kabatov N. V. et al. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (3rd generation). Sheet Q-41 (Vorkuta). General note. Ed. V. P. Vodolazskaya. St. Petersburg: VSEGEI, 2007, 541 p. (in Russian)

Юрьев Л. Д. Мирмекитовые структуры магнетита в монцонитах Приазовья // Новые данные о минералах СССР. 1969. Вып. 19. С. 242—247.



Yuryev L. D. Myrmekite structures of magnetite in monzonites of the Azov region. New data on minerals of the USSR, 1969, 19, pp. 242–247. (in Russian)

- Ballhaus C., Bockrath C., Wohlgemuth-Ueberwasser C., Laurenz V., Berndt J. Fractionation of the noble metals by physical processes // Contrib. Mineral. Petrol. 2006. V. 152. P. 667– 684.
- *Murzin V., Palyanova G., Mayorova T., Beliaeva T.* The gold– palladium Ozernoe occurrence (Polar Urals, Russia): mineralogy, conditions of formation, sources of ore matter and fluid // Minerals. 2022. V. 12. Paper 765.
- Paton C., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J., Hergt J. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data // J. Anal. Atomic Spectrom. 2011. V. 26. P. 2508—2518.
- *Wilson S. A., Ridley I., Koenig A. E.* Development of sulfide calibration standards for the laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry technique // J. Anal. Atom. Spectrom. 2002. V. 17. P. 406–409.

Поступила в редакцию / Received 25.11.2024