



УДК 579.33

DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-1-2

МИНЕРАЛЫ Co и Ni В РУДАХ МИХЕЕВСКОГО Cu-ПОРФИРОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

О.Ю. Плотинская¹, Е.В. Ковальчук^{1, 2}

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, 119017, Москва, Россия, plotin@igem.ru

²Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), ул. Миклухо-Маклая, 23, 117485, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 00.00.2025 г., после доработки 00.00.2025 г., принята к печати 00.00.2025 г.

Аннотация. В рудах медно-порфинового месторождения Михеевское (Южный Урал, Россия) установлены минералы Co и Ni: минералы изоморфного ряда кобальтин-герсдорфит (CoAsS–NiAsS), виоларит (FeNi₂S₄), миллерит (NiS), пентландит (Ni_{5.5}Fe_{3.4})_{8.9}S_{8.0} и мелонит (NiTe₂). Они обрастают пирит, халькопирит, борнит и относятся к поздним, низкотемпературным ассоциациям. Кобальт и Ni также входят в состав пирита, который, за счет своей широкой распространенности в рудах, является основным минералом-носителем этих элементов. Причиной разнообразия минералов Co и Ni в рудах месторождения является наличие среди вмещающих пород тел серпентинитов, заместивших ультрамафиты.

Ключевые слова: Урал, медно-порфировые месторождения, Михеевское, кобальт, никель, минералогия

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГЕМ РАН.

Благодарности. Авторы признательны А.Н. Некрасову и Н.Н. Кошляковой за ЭДС-анализы и Д.А. Чистяковой за помощь в их обработке. Авторы также благодарят рецензента за конструктивные замечания, которые помогли улучшить статью.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с данной рукописью.

Вклад авторов. О.Ю. Плотинская – разработка концепции, исследование, написание рукописи; Е.В. Ковальчук – аналитические исследования. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Плотинская О.Ю., Ковальчук Е.В. Минералы Co и Ni в рудах Михеевского Cu-порфинового месторождения (Южный Урал). Минералогия, 2025, 11(1), 0–00. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-1-2.

Co AND Ni MINERALS IN ORES OF THE MIKHEEVSKOE PORPHYRY Cu DEPOSIT (SOUTH URALS)

O.Yu. Plotinskaya¹, E.V. Kovalchuk^{1, 2}

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Staromonetny per. 35, Moscow, 119017 Russia, plotin@igem.ru

²Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), ul. Miklukho-Maklaya 23, Moscow, 117485 Russia

Received 00.00.2025, revised 00.00.2025, accepted 00.00.2025

Abstract. Co and Ni minerals are described in ores of the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia). Minerals of the cobaltite–gersdorffite series (CoAsS–NiAsS), violarite (FeNi₂S₄), millerite (NiS), pentlandite (Ni_{5.5}Fe_{3.4})_{8.9}S_{8.0} and melonite (NiTe₂) are identified. They overgrow pyrite, chalcopyrite and bornite and belong to late low-temperature assemblages. Cobalt and Ni are also incorporated in pyrite. The

latter, being the most widespread mineral of the deposit, is a major carrier of these metals. The variability of Co and Ni minerals is determined by the presence of serpentinites, which replaced ultramafic rocks.

Keywords: Urals, porphyry copper deposits, Mikheevskoe, cobalt, nickel, mineralogy

Funding. This work is supported by state contract of the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS.

Acknowledgements. The authors thank A.N. Nekrasov and N.N. Koshlyakova for EDS analyses and D.A. Chistyakova for help with data processing. The authors are also thankful to an anonymous reviewer for constructive comments.

Conflict of interest. The authors declare that there are no conflicts of interest related to this manuscript.

Author contribution. O.Yu. Plotinskaya – conceptualization, investigation, writing; E.V. Kovalchuk – analytical work. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Plotinskaya O.Yu., Kovalchuk E.V.. Co and Ti minerals in ores of the Mikheevskoe porphyry Cu deposit (South Urals). Mineralogy, 10(2), 0–00. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-1-2

ВВЕДЕНИЕ

Месторождения медно-(молибден)-порфиروهого семейства являются важнейшими поставщиками таких критических металлов как теллур, селен, рений и золото, которые присутствуют в рудах в качестве попутных компонентов (Sillitoe, 2010). В последнее время в мировой литературе вырос интерес к кобальту (критическому металлу) и предпринимаются попытки изучить закономерности его распределения в рудах порфирировых или скарново-порфирировых месторождений и определить перспективы его извлечения в качестве попутного компонента (Velásquez et al., 2020; Wu et al., 2024). Это определяет важность исследования закономерностей распределения Co, а также Ni на месторождениях порфирирового типа и изучения минеральных форм этих металлов. В данной работе впервые охарактеризованы минералы Co и Ni в рудах крупного Михеевского медно-порфирирового месторождения на Южном Урале.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ МИХЕЕВСКОЕ

Михеевское Cu-порфирировое месторождение расположено в Варненском районе Челябинской области. В геотектоническом отношении оно приурочено к восточной окраине Зауральской мегазоны Южного Урала и находится в пределах Тарутинско-Новониколаевской минерагенической подзоны (Тевелев и др., 2018). В геологическом строении территории месторождения (рис. 1а) принимают участие вулканогенно-осадочные породы позднедевонского возраста, которые подразделены на две пачки. Ниж-

няя пачка представлена переслаивающимися песчаниками, туфопесчаниками, андезибазальтами и их туфами и туфобрекчиями при подчиненной роли алевролитов, углисто-кремнистых пород, базальтов и др. Верхняя пачка сложена лавами и лавокластитами афировых базальтов с прослоями песчаников, силицитов и углисто-кремнистых пород с телами серпентинитов (Шаргородский и др., 2005).

Интрузивные породы подразделены на два комплекса (Грабежев, Белгородский, 1992): ульяновский и михеевский. Интрузии ульяновского комплекса представлены, главным образом, штоками и дайками диоритовых порфиритов и андезитов, реже дацитами, риодацитами. Молибден-медно-порфирировое оруденение связывают с интрузиями михеевского комплекса (Грабежев, Белгородский, 1992). Они представлены несколькими равномернотермическими и порфирировыми разностями, среди которых наиболее широко развиты диориты и диоритовые порфириты. Также присутствуют пострудные дайки гранитов и гранит-порфиритов. Кроме того, встречаются крупные протрузии серпентинитов, которые, предположительно, относятся к Дружининскому габбро-гарцбургитовому офиолитовому комплексу ордовикского возраста (Тевелев и др., 2018).

Оруденение приурочено к поясу даек кварцевых диоритов и их порфирировых разностей общей площадью примерно 0.5×3 км, который протягивается в ССВ направлении между двумя крупными (порядка 1 км в диаметре) штоками диоритов. Предполагается, что на глубине дайки и штоки соединяются в единый материнский плутон (Грабежев, Белгородский, 1992). Основные гипогенные рудные минералы – пирит и халькопирит, менее распространены борнит, молибденит, магнетит, ру-

Рис. 1. Тектоническая схема Южного Урала и положение наиболее крупных порфировых месторождений (а), по (Puchkov, 2017) с изменениями и схематическая геологическая карта месторождения Михеевское (б), по (Шаргородский и др., 2005).

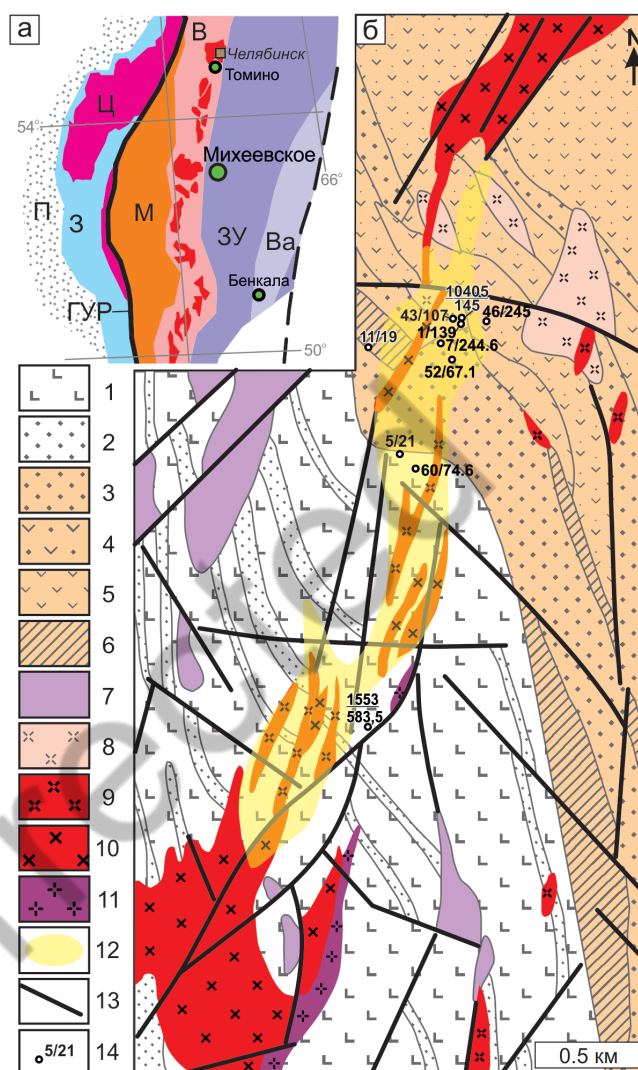
Мегазоны Урала на рис. а: П – Предуральский краевой прогиб; 3 – Западно-Уральская; Ц – Центрально-Уральская; ГУР – Главный Уральский разлом; М – Магнитогорская; В – Восточно-Уральская (с гранитными массивами); 3 – Зауральская; Ва – Валерьяновская.

Рис. б: 1–6 – вулканогенно-осадочные породы: 1, 2 – верхняя пачка: 1 – афировые базальты; 2 – кремнистые и углисто-кремнистые породы, песчаники; 3–6 – нижняя пачка: 3 – песчаники, туфопесчаники; 4 – андезибазальты и их туфы, туффиты; 5 – порфировые андезибазальты; 6 – силициты; 7 – серпентиниты; 8 – ульяновский комплекс, дациты и диоритовые порфиры; 9, 10 – михеевский комплекс: 9 – диоритовые порфиры, 10 – кварцевые диориты; 11 – пострудные гранит- и гранодиорит-порфиры; 12 – контур $\text{Cu} > 0.3\%$; 13 – разломы; 14 – положение изученных образцов и их номера.

Fig. 1. Tectonic scheme of South Urals and location of major porphyry deposits (a), modified after (Puchkov et al., 2017) and schematic geological map of the Mikheevskoe deposit (b), after (Shargorodskii et al., 2005).

Major terranes of the Urals (megazones) in Fig. a: П – Pre-Uralian foredeep; 3 – West-Uralian; Ц – Central-Uralian; ГУР – Main Uralian Fault; М – Magnitogorsk; В – East-Uralian (with granite plutons); 3 – Trans-Uralian; Ва – Valerianovka.

Fig. б: 1–6 – volcanosedimentary rocks: 1, 2 – upper member: 1 – aphyric basalt; 2 – sandstone, chert; 3–6 – lower member: 3 – sandstone, tuff sandstone; 4 – basaltic andesite, tuff, tuffite; 5 – porphyric basaltic andesite; 6 – chert; 7 – serpentinite; 8 – Ulyanovsk complex, dacite, diorite porphyry; 9, 10 – Mikheevsky complex: 9 – diorite porphyry; 10 – quartz diorite; 11 – post-ore granite and granodiorite porphyry; 12 – $\text{Cu} > 0.3\%$ halo; 13 – normal faults; 14 – position of the studied samples and their numbers.



тил, арсенопирит, сфалерит, галенит, блеклые руды, самородное золото и др.

В центральных зонах месторождения встречаются Na-Ca метасоматиты (альбит+актинолит±эпидот), которые сопровождают магнетитовую минерализацию, и K-метасоматиты (биотит+мусковит±КПШ), сопряженные с борнит-халькопиритовой минерализацией. Филлизиты (кварц-серицитовые метасоматиты) встречаются повсеместно и сопровождают молибденит-халькопиритовую минерализацию. Пропилиты (хлорит+эпидот+серицит) широко развиты на периферии месторождения и сопровождают пири-

товую и пирит-халькопиритовую минерализацию. Хлорит-серицитовые метасоматиты распространены наиболее широко и представляют собой переходные зоны между филлизитами и пропилитами. По телам серпентинитов и в непосредственной близости от них развиваются тальк-карбонатные и кварц-серицит-доломитовые метасоматиты с хром-содержащим мусковитом (фукситом) (Чистякова, Плотинская, 2022; Азовскова и др., 2022).

Месторождение разрабатывается открытым способом с 2013 г. Запасы месторождения на 2017 г. составили 629 млн. т руды при среднем содержании меди 0.41% (Вестник..., 2017).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы для исследования были отобраны из керна скважин, пробуренных на Михеевском месторождении и из бортов карьера (рис. 1б). Химический состав минералов Ni и Co, а также ассоциирующих с ними минералов изучен на сканирующих электронных микроскопах Tescan Vega TS 5130 MM (CamScan) с энергодисперсионной (ЭД) приставкой INCA Energy 350 и детектором INCA Penta FETx3, Tescan Vega II XMU с ЭД приставкой INCA Energy 450 и детектором INCA xSight (Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черноголовка, Россия, аналитик А.Н. Некрасов) и JEOL JSM-IT500 с ЭД спектрометром INCA X-Maxn (Геологический факультет Московского государственного университета, г. Москва, Россия, аналитик Н.Н. Кошлякова) по стандартным методикам.

Химический состав пирита изучен на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8200 фирмы JEOL (Япония) в ЦКП «ИГЕМ-аналитика» (г. Москва, Россия, аналитик Е.В. Ковальчук). Параметры анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток на цилиндре Фарадея 20 нА, диаметр пучка 1 мкм, время экспозиции для Fe, S, Cu, Ni и Sb составляло 10 с на пике и по 5 с на фоне с обеих сторон, для As и Co – 30 и 15 с, соответственно. В качестве стандартов для Fe ($K\alpha$, LIF) и S ($K\alpha$, PETH) использовался пирит, для As ($L\alpha$, TAP) – GaAs, для Ni ($K\alpha$, LIF) и Co ($K\alpha$, LIF) использовались соответствующие чистые металлы, для Cu ($K\alpha$, LIF) – халькопирит, для Sb ($L\alpha$, PETH) – NiSbS. Предел обнаружения для 3 σ интервала составляет (мас. %): Fe – 0.05, S – 0.02, As – 0.05, Ni – 0.05, Cu – 0.07, Sb – 0.03, Co – 0.06. Карты распределения в характеристическом излучении $SK\alpha$, $CoK\alpha$, $NiK\alpha$ и $AsL\alpha$ сняты при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе на цилиндре Фарадея 20 нА и времени экспозиции в одной точке 100 мс.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Минералы Co и Ni встречаются в измененных (филлитизированных или пропилитизированных) диоритовых или гранодиоритовых порфиритах (обр. 46/245 и 52/67.1), измененных андезибазальтах (обр. 43/107 и 10405/145) или туфопесчаниках (обр. 1/139). Несколько шире они распространены в слабо измененных серпентинитах (обр. 1553/583.5 и 5/21) и апосерпентитовых тальк-карбонат-фукситовых метасоматитах (обр. 11/19 и 60/74.6). Минералы Co и Ni ассоциируют с эпидотом, хлори-

том, альбитом, мусковитом, кальцитом и кварцем. Они образуют самостоятельные выделения или сростания с пиритом, халькопиритом или каймы вокруг этих минералов. Размер выделений обычно не превышает первые десятки микрометров, что часто затрудняет диагностику минералов. Морфология выделений обычно ксеноморфная, но встречаются и субидиоморфные кристаллы (рис. 2).

Из минералов Co и Ni наиболее часто встречаются минералы ряда кобальтин-герсдорфит ($CoAsS-NiAsS$). Как правило, по составу они относятся к крайним членам ряда с небольшими примесями Ni в кобальтине и Co в герсдорфите, и только в обр. 52/67.1 установлен промежуточный член ряда (табл. 1, рис. 3а). Кобальтин встречается чаще, чем герсдорфит. В отдельных случаях (обр. 46/245) кобальтин образует сростания с минералами системы Cu-S (рис. 2а), которые по составу близки к анилиту (Cu_7S_4), джириту (Cu_8S_5) и дигениту/роксбииту (Cu_9S_5). Часто кобальтин встречается в виде самостоятельных выделений среди жильных минералов, например, хлорита или эпидота (рис. 2б) или образует каймы вокруг борнита или халькопирита (рис. 2в).

Герсдорфит иногда совместно с блеклой рудой выполняет прожилки в халькопирите (рис. 2г). В ассоциации с кобальтином отмечаются микронные выделения теллуридов Pb, Ni, Bi, Ag и самородного золота (рис. 2а, в). И в кобальтине, и в герсдорфите присутствуют заметные примеси Fe (от 0.4 до 4.2 мас. %), содержание которого не зависит от содержаний Co и Ni (рис. 3а). Кобальтин характеризуется заметными вариациями отношения As/S, в том числе в пределах отдельных зерен. В некоторых зернах (рис. 2б) наблюдается зональное строение: субидиоморфные выделения кобальтина с отношением As/S, близким к стехиометрическому, замещаются микрозернистым агрегатом с As/S около 0.8, т. е. с повышенным содержанием серы (рис. 3б). Между величиной As/S и концентрацией Fe имеется значимая отрицательная корреляция ($r = -0.56$), а между As/S и содержанием Ni положительная корреляция, близкая к пределу значимости ($r = 0.37$) (рис. 3б, в). Минимальный значимый коэффициент корреляции для $n = 32$ составляет 0.35, здесь и далее принята доверительная вероятность 0.95.

Минералы Ni встречаются существенно реже. Они установлены в образцах, отобранных из тел серпентинитов (обр. 5/21) или апосерпентинитовых метасоматитов (обр. 11/19) (Азовскова и др.,

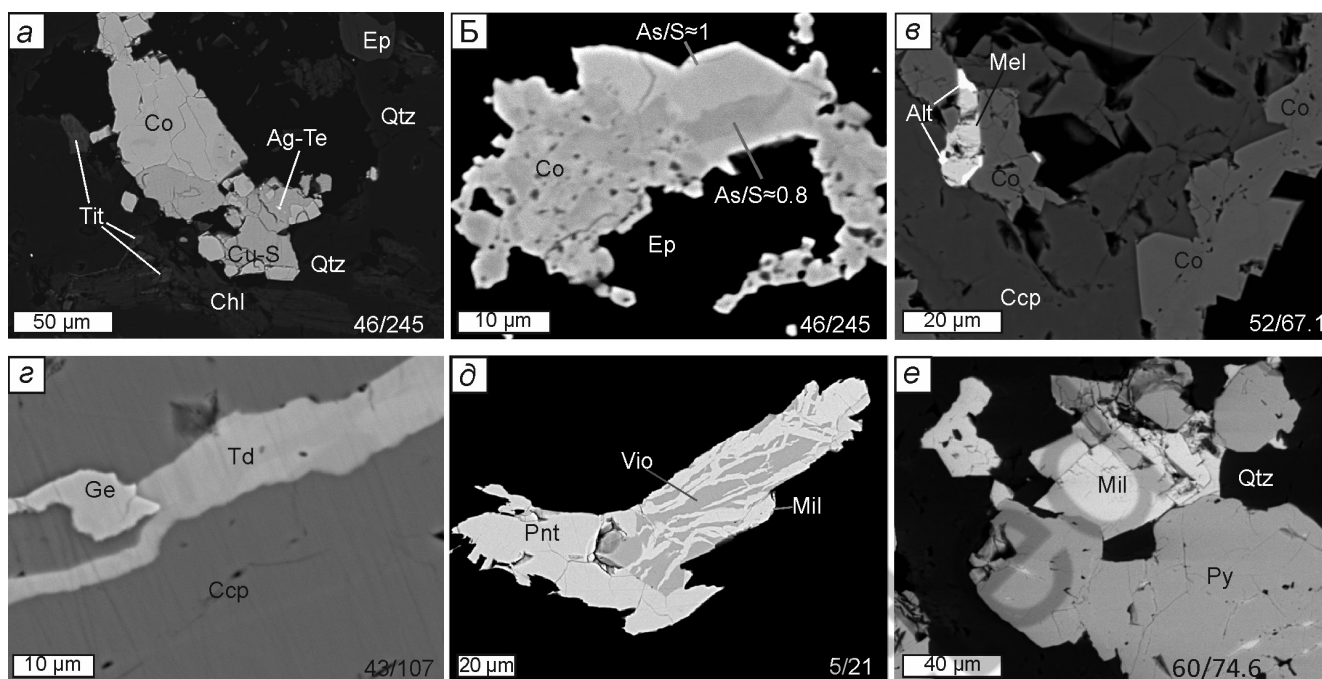


Рис. 2. Минералы Co и Ni в рудах Михеевского месторождения: а – кобальтин (Co) в сростании с минералом системы Cu-S среди кварца (Qtz), хлорита (Chl), эпидота (Ep) и титанита (Tit), обр. 46/245; б – зональный кобальтин с варьирующим отношением As/S в эпидоте, обр. 46/245; в – кайма кобальтина вокруг халькопирита (Ccp), в кайме – включение мелонита (Mel) с каймой алтаита (Alt), обр. 52/67.1; г – жилочек герсдорфита (Ge) и тетраэдрита (Td) в халькопирите, обр. 43/107; д – сростание пентландита (Pnt), виоларита (Vio) и миллерита (Mil), обр. 5/21-1; е – сростание миллерита и пирита (Py) в кварце, обр. 60/74.6. Изображения в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 2. Co and Ni minerals in ores of the Mikheevskoe deposit: а – cobaltite (Co) intergrown with minerals of the Cu-S series within quartz (Qtz), chlorite (Chl), epidote (Ep), and titanite (Tit), sample 46/245; б – zoned cobaltite with varying As/S ratio in epidote, sample 46/245; в – cobaltite rim around chalcopyrite (Ccp), melonite (Mel) inclusion with altaite (Alt) rim in cobaltite, sample 52/67.1; г – gersdorfite (Ge) and tetrahedrite (Td) veinlet in chalcopyrite, sample 43/107; д – pentlandite (Pnt), violarite (Vio), and millerite (Mil), sample 5/21-1; е – millerite and pyrite (Py) within quartz, sample 60/74.6. Back-scattered electron images.

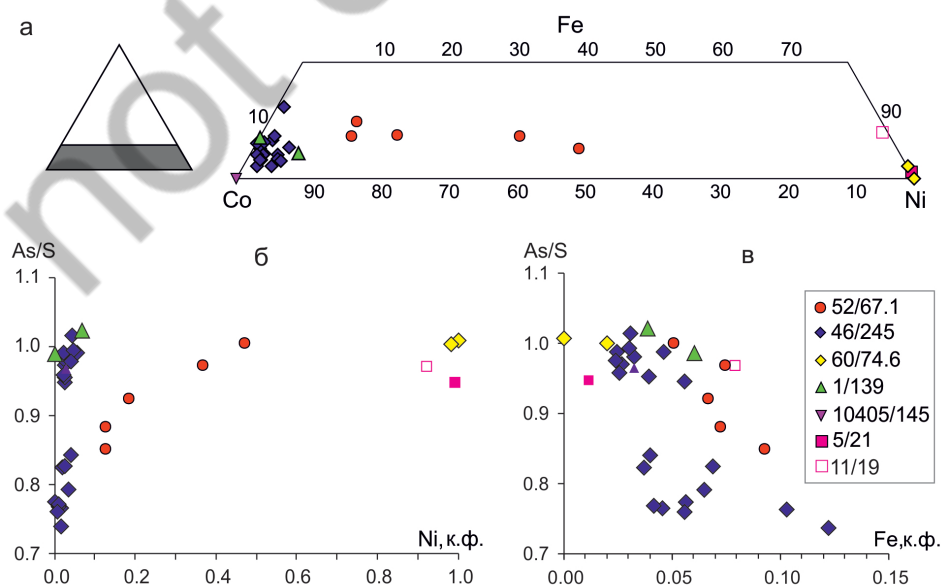


Рис. 3. Диаграммы составов минералов ряда кобальтин-герсдорфит.

Fig. 3. Plots showing composition of minerals of the cobaltite-gersdorfite series.

Представительные анализы кобальтина (1–19), герсдорфита (20–21), виоларита (22–24), миллерита (25–27) и пентландита (28) Михеевского месторождения (мас. %)

Representative analyses of cobaltite (1–19), gersdorfite (20–21), violarite (22–24), millerite (25–27), and pentlandite (28) of the Mikheevskoe deposit (wt.%)

№ п/п	Обр.	Co	Ni	Fe	Cu	As	Sb	S	Сумма	Формула	As/S
1		18.84	13.05	2.50	0.29	45.35		19.96	99.99	(Co _{0.53} Ni _{0.37} Fe _{0.07} Cu _{0.01}) _{0.98} As _{1.00} S _{1.03}	0.97
2		26.34	4.51	3.20	1.38	42.94		21.61	99.99	(Co _{0.72} Ni _{0.12} Fe _{0.09} Cu _{0.04}) _{0.98} As _{0.93} S _{1.09}	0.85
3	52/67.1	24.92	6.66	2.26	1.04	44.51		20.62	100.00	(Co _{0.69} Ni _{0.19} Fe _{0.07} Cu _{0.03}) _{0.97} As _{0.97} S _{1.05}	0.92
4		16.27	16.67	1.70	0.00	45.81		19.54	100.00	(Co _{0.46} Ni _{0.47} Fe _{0.05}) _{0.98} As _{1.01} S _{1.01}	1.00
5		27.92	4.54	2.47	0.77	43.33		20.97	100.00	(Co _{0.77} Ni _{0.13} Fe _{0.07} Cu _{0.02}) _{0.99} As _{0.94} S _{1.07}	0.88
6		31.16	1.95	1.57		45.73		19.79	100.19	(Co _{0.87} Ni _{0.05} Fe _{0.05} Cu) _{0.97} As _{1.01} S _{1.02}	0.99
7		35.31	0.36	1.61		41.11		22.94	101.33	(Co _{0.95} Ni _{0.01} Fe _{0.05}) _{1.00} As _{0.87} S _{1.13}	0.77
8		32.95	0.88	2.38		42.50		22.02	100.73	(Co _{0.90} Ni _{0.02} Fe _{0.07}) _{0.99} As _{0.91} S _{1.10}	0.83
9		33.28	0.83	0.90		45.38		19.99	100.36	(Co _{0.93} Ni _{0.02} Fe _{0.03}) _{0.98} As _{1.00} S _{1.03}	0.97
10		33.86	0.81	1.10		45.92		20.02	101.72	(Co _{0.93} Ni _{0.02} Fe _{0.03}) _{0.99} As _{1.00} S _{1.01}	0.98
11		34.71		1.95		40.73		22.48	99.87	(Co _{0.95} Fe _{0.06}) _{1.00} As _{0.87} S _{1.13}	0.78
12	46/245	35.49	0.37	1.48		41.33		22.95	101.62	(Co _{0.95} Ni _{0.01} Fe _{0.04}) _{1.00} As _{0.87} S _{1.13}	0.77
13		34.53	0.27	1.98		41.44		23.31	101.53	(Co _{0.92} Ni _{0.01} Fe _{0.06}) _{0.99} As _{0.87} S _{1.14}	0.76
14		33.44	1.40	1.39		42.82		21.75	100.80	(Co _{0.91} Ni _{0.04} Fe _{0.04}) _{0.99} As _{0.92} S _{1.09}	0.84
15		34.10	0.76	0.89		45.49		20.31	101.55	(Co _{0.94} Ni _{0.02} Fe _{0.03}) _{0.99} As _{0.99} S _{1.03}	0.96
16		32.84	1.63	1.02		45.23		19.47	100.19	(Co _{0.92} Ni _{0.05} Fe _{0.03}) _{1.00} As _{1.00} S _{1.00}	0.99
17		32.19	0.54	4.26		39.65		22.98	99.61	(Co _{0.87} Ni _{0.01} Fe _{0.12}) _{1.01} As _{0.85} S _{1.15}	0.74
18		33.25	1.46	0.82		46.09		20.19	101.81	(Co _{0.92} Ni _{0.04} Fe _{0.02}) _{0.98} As _{1.00} S _{1.02}	0.98
19	1/139	29.61		2.05	1.87	46.93		20.34	100.80	(Co _{0.82} Fe _{0.06} Cu _{0.05}) _{0.93} As _{1.03} S _{1.04}	0.99
20	5/21		34.88	0.37		43.48	0.55	19.59	98.87	(Ni _{0.99} Fe _{0.01}) _{1.00} (As _{0.97} Sb _{0.01}) _{0.98} S _{1.02}	0.95
21	11/19	0.31	32.78	2.67		44.41	0.63	19.56	100.36	(Ni _{0.92} Co _{0.01} Fe _{0.08}) _{1.01} (As _{0.98} Sb _{0.01}) _{0.99} S _{1.01}	0.97
22	7/244.6		41.12	14.89	1.32			41.14	98.48	(Ni _{2.16} Fe _{0.82} Cu _{0.06}) _{3.05} S _{3.96}	
23			41.43	14.76	1.04			41.43	98.66	(Ni _{2.17} Fe _{0.81} Cu _{0.05}) _{3.03} S _{3.97}	
24	5/21	4.98	33.16	18.49				41.95	98.58	(Ni _{1.73} Fe _{1.01} Co _{0.26}) _{3.00} S _{4.00}	
25	60/74.6		64.35	0.83				36.65	101.84	(Ni _{0.97} Fe _{0.01}) _{0.99} S _{1.01}	
26	5/21	0.25	61.01	2.03				34.95	98.24	(Ni _{0.96} Fe _{0.03}) _{0.99} S _{1.01}	
27		0.38	64.71	0.31				35.89	101.29	(Ni _{0.99} Co _{0.01}) _{1.00} S _{1.00}	
28			41.39	24.20				32.81	98.40	(Ni _{5.54} Fe _{3.41}) _{8.95} S _{8.05}	

Примечание. Анализы 1–5 нормированы к 100 мас. %. Пустая клетка – содержание элемента ниже предела обнаружения. Формулы минералов рассчитаны на соответствующее количество коэффициентов в формуле.

Note. Analyses 1–5 are normalized to 100 wt. %. Empty cell – the content of element is below detection limit. The formulas of minerals are recalculated for corresponding amount of formula units.

2022; Чистякова, Плотинская, 2022). Минералы Ni ассоциируют с пиритом и халькопиритом, магнетитом и иногда – хромитом. Виоларит (FeNi₂S₄) образует включения в халькопирите или сростания с пентландитом и по трещинам замещается миллеритом (рис. 2д). Виоларит содержит примеси Cu (до 1.3 мас. %) и иногда – Co (до 5 мас. %). Миллерит (NiS), помимо виоларита, ассоциирует также с пиритом (рис. 2е) и содержит до 2 мас. % Fe и до 0.4 мас. % Co (табл. 1). Единственное установленное зерно пентландита отвечает формуле (Ni_{5.5}Fe_{3.4})_{8.95}S_{8.0}. Кроме того, ранее нами в рудах Михеевского месторождения был установлен мелонит (NiTe₂) в ассоциации с кобальтином и алтаитом (Plotinskaya et al., 2018).

Помимо собственных минералов, в рудах Михеевского месторождения Co и Ni входят в состав пирита (рис. 4, табл. 2). Широкое распространение последнего позволяет говорить о том, что именно он играет ведущую роль в балансе этих элементов. Кобальтом и Ni обогащены центральные и периферические зоны кристаллов пирита (рис. 4б, в, д, е). Распределение Ni демонстрирует сложную осцилляторную зональность, затухающую к краям кристаллов (рис. 4б, д). В целом, содержания Ni постепенно снижаются к периферии от более 0.6 мас. % до ниже предела обнаружения (0.05 мас. %), но и в краевых частях наблюдаются зоны микронной ширины с повышенными концентрациями Ni. Поведение Co, в целом, аналогично Ni (рис. 4в, е), но

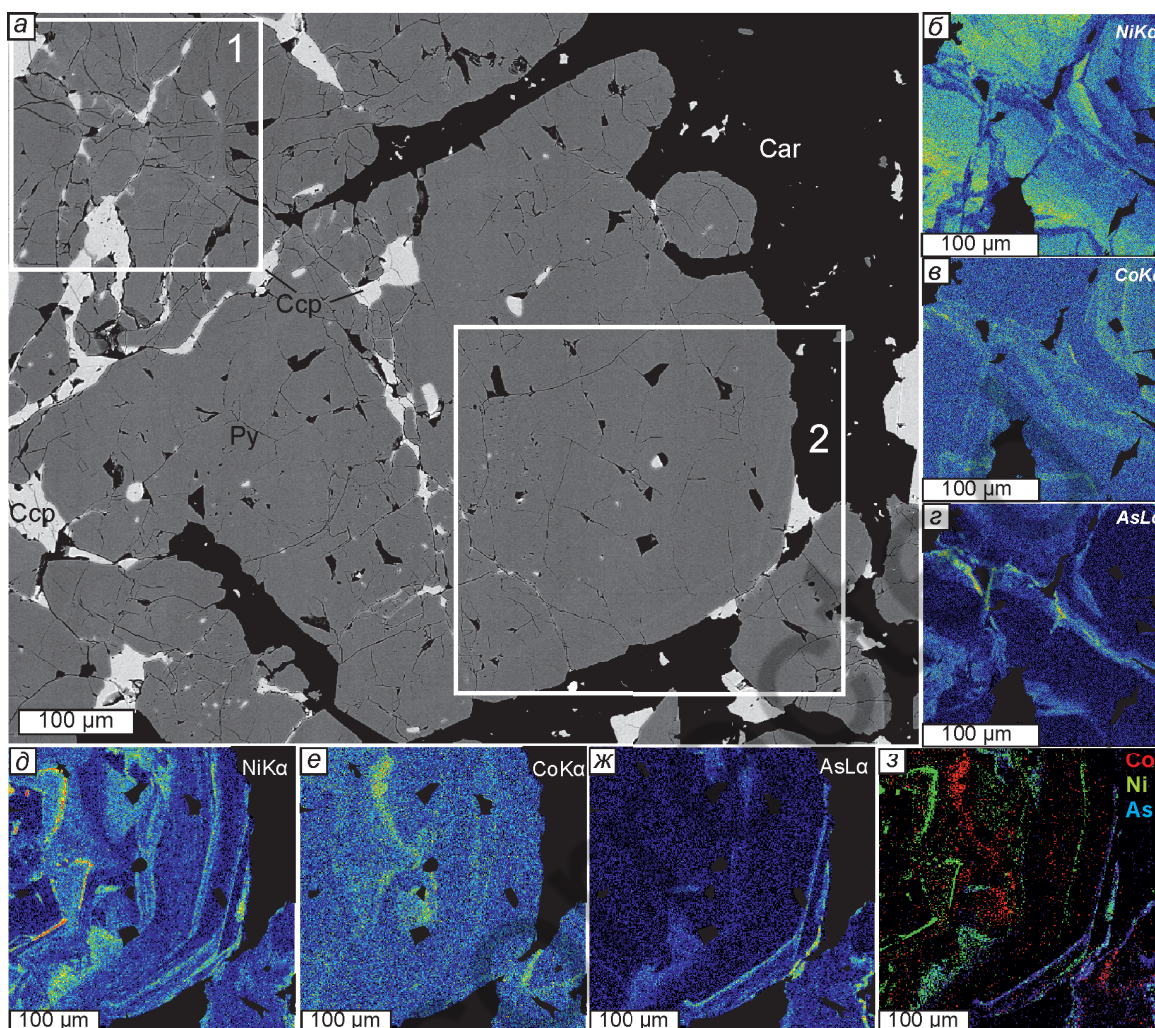


Рис. 4. Пирит из серпентинитов Михеевского месторождения, обр. 1553/583.5: а – изображение в обратно-рассеянных электронах; б-ж – карты распределения в характеристическом излучении AsL α , CoK α и NiK α (б-г – участок 1, д-ж – участок 2); з – комбинированная карта распределения интенсивностей для участка 2 (Co – красный, Ni – зелёный, As – синий).

Fig. 4. Pyrite from serpentinite of the Mikheevskoe deposit, sample 1553/583.5: а – back-scattered electron image; б-ж – AsL α , CoK α and NiK α maps (б-г – site 1, д-ж – site 2); з – phase map of site 2 (Co – red, Ni – green, As – blue).

из-за более низких его содержаний (не более 0.16 мас. %) закономерность его распределения не столь очевидна. Тем не менее, участки с максимальными содержаниями Co и Ni обычно не совпадают. Как видно на рис. 5, содержания Ni менее 0.6 мас. % обнаруживают с содержаниями Co слабую, но значимую положительную корреляцию ($r = 0.66$ при пороге значимости 0.63 при $n = 10$), а два анализа с наиболее высокими концентрациями Ni этой закономерности не подчиняются. Краевые зоны кристаллов обогащены As (до 0.25 мас. %), распределение которого также демонстрирует осцилляторную зональность (рис. 4г, ж). При этом иногда наблюдается совпадение зон, обогащенных As и Ni, но обычно они разобщены в пространстве (рис. 4з).

ОБСУЖДЕНИЕ

Собственные минералы Co и Ni на месторождениях порфирового семейства встречаются редко. Так, в базе данных Геологической службы США (Singer et al., 2008), они отмечены на чуть более десяти месторождениях из 690, причем обычно это кобальтин и, реже, герсдорфит. Как следствие, промышленного значения ни Co, ни Ni в порфириновых рудах не имеют и, возможно из-за этого в геологической литературе им уделяют мало внимания.

Относительно разнообразная Co-Ni минерализация описана на месторождении Бошекуль (Казахстан): здесь установлены пентландит, линнеит Co₃S₄, карролит Cu(Co,Ni)₂S₄ и пирит с содержа-

Химический состав пирита из серпентинитов Михеевского месторождения (мас.%)

Table 2

Chemical composition of pyrite from serpentinite of the Mikheevskoe deposit (wt. %)

№ п/п	Fe	S	Ni	Co	As	Cu	Сумма
1	46.55	53.10	<0.05	<0.06	<0.05	<0.07	99.75
2	46.39	53.14	0.05	<0.06	<0.05	<0.07	99.63
3	46.39	53.36	0.43	0.13	<0.05	<0.07	100.33
4	46.09	53.36	0.25	0.16	<0.05	0.08	99.95
5	46.13	53.34	0.73	0.11	<0.05	<0.07	100.38
6	46.08	53.27	0.05	0.07	<0.05	0.16	99.64
7	46.23	53.45	0.13	0.13	<0.05	<0.07	100.02
8	46.78	53.18	<0.05	<0.06	<0.05	0.13	100.15
9	46.22	53.25	0.41	0.11	<0.05	<0.07	100.03
10	46.06	53.22	0.64	<0.06	0.25	<0.07	100.27
11	46.36	53.29	0.36	0.10	<0.05	<0.07	100.19
12	46.45	53.51	0.19	0.06	<0.05	0.07	100.29

Примечание. Содержания Sb ниже предела обнаружения (0.05 мас. %) во всех анализах.

Note. The Sb content is below detection limit (0.05 wt. %) in all analyses.

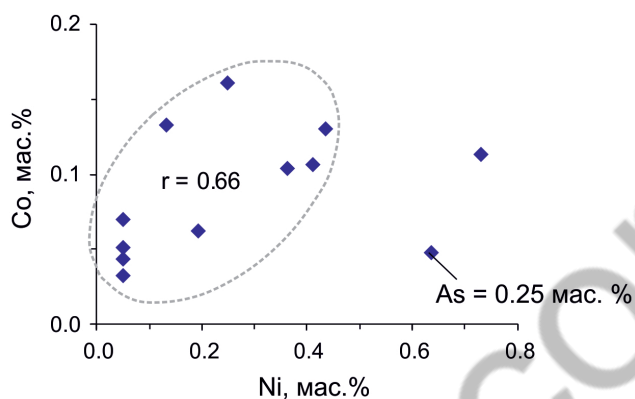


Рис. 5. Диаграмма Co–Ni (мас. %) для пирита (данные из табл. 2).

Fig. 5. Co–Ni plot (wt. %) for pyrite (data from Table 2).

ями Co до 6.4 мас. % и Ni до 1.8 мас. % (Филимонова, Слюсарев, 1974). Кобальтин, карролит и пирит, содержащий до 1.7 мас. % Co, описаны на месторождении Аксуг, Тыва (Шадчин и др., 2024 и цитируемая литература). Сходный набор минералов выявлен на медно-порфировых месторождениях зоны Средногогорье в Болгарии: кобальтин, герсдорфит, линнеит/карролит, Pd-раммельсбергит (Pd,Ni)₂As на Елаците и карролит, ваэсит NiS₂ и пирит, содержащий до 6.7 мас. % Ni и до 14.9 мас. % Co на месторождении Медет (Strashimirov et al., 2002).

Важно отметить, что минералы Co встречаются на порфировых объектах чаще, чем минералы Ni – кобальтин отмечается чаще герсдорфита, а из группы тиошпинелей чаще описывают карролит и линнеит, а не виоларит или полидимит. Интерес-

но, что в строении всех перечисленных месторождений принимают участие основные породы. Так, крупные интрузии габброидов известны на территориях месторождений Медет (Strashimirov et al., 2002 и цитируемая литература), Аксуг (Кужугет и др., 2023 и цитируемая литература) и Бошекуль (Seltmann, Porter, 2005 и цитируемая литература). На Михеевском месторождении широко развиты базальты, а также встречаются протрузии серпентинитов, образовавшихся, предположительно, по породам ультраосновного состава. Кларки концентраций Co в ультраосновных породах в несколько раз выше, чем в средних или кислых (соответственно 80 и 20 г/т), а кларк Ni выше примерно в 20 раз (соответственно, 1230 и 61 г/т) (Иванов, 1995). Это позволяет предполагать, что основным источником Co и, прежде всего, Ni в рудах Михеевского месторождения являлись именно серпентинизированные ультрамафиты. Это объясняет частую приуроченность минералов Ni к телам серпентинитов.

Замещение петнландита виоларитом или ассоциацией виоларит+миллерит нередко сопровождается процессами серпентинизации ультрамафитов (Groves et al., 1974; Grguric, 2002; González-Jiménez et al., 2021). Поэтому нельзя исключать, что некоторые минералы Ni (виоларит и, возможно, миллерит) образовались при серпентинизации ультрамафитов еще до становления порфировой системы Михеевского месторождения. Пентландит из тел серпентинитов, в свою очередь, может иметь и магматическое происхождение, как и более распространенные там хромшпинелиды (Чистякова, Плотинская, 2022). Остальные минералы Co и Ni

на Михеевском месторождении обрастают пирит, халькопирит (рис. 2б), борнит или выполняют прожилки в них (рис. 2г), т. е. по времени образования относятся к более поздним ассоциациям.

Температура гомогенизации флюидных включений из кварцевых прожилков в измененных серпентинитах составила 235–240 °С (Чистякова и др., 2022). Температуры образования хлорита из образцов, содержащих Со-Ni и золото-теллуридную минерализацию, близки и составляют 177–260 °С (Plotinskaya et al., 2018). Кроме того, кобальтингерсдорфит был установлен в аргиллизитах Михеевского месторождения, секущих все более ранние минеральные ассоциации (Азовскова и др., 2015). Появление минералов Со и Ni в поздних, относительно низкотемпературных минеральных ассоциациях характерно и для руд других порфириновых месторождений, например, Аксуг (Кужугет и др., 2023; Шадчин и др., 2024 и цитируемая литература) и Елаците (Strashimirov et al., 2002 и цитируемая литература). Это говорит о том, что минералы Со и Ni образовались на поздних стадиях формирования месторождения, когда в порфириновой системе циркулировали метеорные воды (Sillitoe, 2010), что способствовало выносу элементов из вмещающих пород и увеличивало минеральное разнообразие отлагавшихся руд. На более ранних стадиях рудообразования Со и Ni, по-видимому, концентрировались в пирите. Широкая распространенность этого минерала на фоне редких находок собственных минералов Со и Ni позволяет утверждать, что именно пирит является ведущей формой нахождения Со и Ni в рудах Михеевского месторождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рудах медно-порфирикового месторождения Михеевское на Южном Урале установлены минералы Со и Ni: кобальтин, герсдорфит, мелонит, виоларит, миллерит и пентландит. На ранних стадиях рудообразования Со и Ni входили в состав пирита, а на поздней низкотемпературной стадии они отлагались в виде собственных минералов, чаще всего, кобальтина и герсдорфита. Собственные минералы Со и Ni на Михеевском медно-порфириковом месторождении распространены незначительно и не имеют промышленного значения. Их наличие и разнообразие предположительно обусловлено присутствием тел серпентинитов среди вмещающих пород месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Главатских С.П. (2015) Особенности минералогии аргиллизитов Михеевского медно-порфирикового месторождения, Южный Урал. *Металлогения древних и современных океанов-2015. Месторождения океанических структур: геология, минералогия, геохимия и условия образования*. Миасс, ИМин УрО РАН, 116–120.

Азовскова О.Б., Колосова А.С., Сорока Е.И., Ровнушкин М.Ю. (2022) Листвениновые метасоматиты Михеевского (Au,Mo)Cu-порфирикового месторождения, Южный Урал. *XXVIII Всероссийская научная конференция «Уральская минералогическая школа-2022»*. Екатеринбург, ООО Универсальная Типография «Альфа Принт», 7–9.

Вестник золотопромышленника (2017) <https://gold.1prime.ru/news/20170920/226023.html> (последнее обращение 08/11/2027)

Грабежев А.И., Белгородский Е.А. (1992) Продуктивные гранитоиды и метасоматиты медно-порфириковых месторождений (на примере Урала). Екатеринбург, УрО РАН, 199 с.

Иванов В.В. (1995) Экологическая геохимия элементов. Справочник в 6 томах. Том 4. Главные d-элементы. М., Экология, 416 с.

Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Хертек А.К., Монгуш А.О., Бутанаев Ю.В. (2023) Золото-молибден-медно-порфириковое месторождение Ак-Суг (Восточный Саян): благороднометалльная минерализация, РТ-параметры и состав рудоносного флюида. *Геология рудных месторождений*, 65(7S), 634–661. <https://doi.org/10.31857/S0016777023070031>

Тевелев Ал.В., Кошелева И.А., Бурштейн Е.Ф. и др. (2018) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-41- XXV (Карталы). Объяснительная записка. М., Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 175 с.

Филимонова Л.Е., Слюсарев А.Н. (1974) Минералы никеля и кобальта и некоторые вопросы геохимии этих элементов на молибденово-медном месторождении Бошекуль / Минералы и парагенезисы минералов гидротермальных месторождений. Ленинград, Наука, 38–46.

Чистякова Д.А., Плотинская О.Ю. (2022) Процессы преобразования серпентинитов на Михеевском медно-порфириковом месторождении (Южный Урал). *XXVIII Всероссийская научная конференция «Уральская минералогическая школа-2022»*. Екатеринбург, ООО Универсальная Типография «Альфа Принт», 166–168.

Чистякова Д.А., Плотинская О.Ю., Грознова Е.О. (2022) Условия образования хромсодержащих кварцсерицитовых метасоматитов Михеевского медно-порфирикового месторождения, Южный Урал. *Металлогения древних и современных океанов-2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений*. Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 70–72.

Шадчин М.В., Шведов Г.И., Макаров В.А., Лобастов Б.М., Сильянов С.А., Сердюк С.С. (2024) Новые данные по минералогии руд Au-Mo-Cu-порфирирового месторождения Ак-Суг (Северо-Восточная Тува). *Минералогия*, 10(3), 32–51. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2024-10-3-3>.

Шаргородский Б.М., Новиков И.М., Аксенов С.А. (2005) Михеевское месторождение меднопорфировых руд на Южном Урале. *Отечественная геология*, (2), 57–61.

González-Jiménez J.M., Piña R., Saunders J.E., Plissart G., Marchesi C., Padrón-Navarta J. A., Ram'ón-Fernandez M., Garrido L.N.F., Gervilla F. (2021) Trace element fingerprints of Ni–Fe–S–As minerals in subduction channel serpentinites. *Lithos*, 400, 106432. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106432>

Grguric B.A. (2002) Hypogene violarite of exsolution origin from Mount Keith, Western Australia: field evidence for a stable pentlandite–violetite tie line. *Mineralogical Magazine*, 66(2), 313–326. <https://doi.org/10.1180/0026461026620032>

Groves D.I., Hudson D.R., Hack T.B. (1974) Modification of iron-nickel sulfides during serpentization and talc-carbonate alteration at Black Swan, Western Australia. *Economic Geology*, 69(8), 1265–1281. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.69.8.1265>

Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltmann R., Spratt J. (2018) Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting. *Ore Geology Reviews*, 94, 239–260. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.025>

Puchkov V.N. (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: What, where, when and why. *Ore Geology Reviews*, 85, 4–29. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.01.005>

Seltmann R., Porter T.M. (2005) The porphyry Cu-Au-Mo deposits of Central Eurasia: 1. Tectonic, geologic & metallogenic setting and significant deposits / Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective, vol. 2. Adelaide, PGC Publishing, 467–512.

Sillitoe R.H. (2010) Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105, 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>

Singer D.A., Berger V.I., Moring B.C. (2008) Porphyry copper deposits of the world: database and grade and tonnage models. Open-File Report 2008-1155.

Strashimirov S., Petrunov R., Kanazirski M. (2002) Porphyry-copper mineralization in the central Srednegorie zone, Bulgaria. *Mineralium Deposita*, 37, 587–598. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0275-6>

Velásquez G., Carrizo D., Salvi S., Vela I., Pablo M., Pérez A. (2020) Tracking cobalt, REE and gold from a porphyry-type deposit by LA-ICP-MS: A geological approach towards metal-selective mining in tailings. *Minerals*, 10(2), 109. <https://doi.org/10.3390/min10020109>

Wu X., Xie G., Xu J., Voudouris P., Liu W. (2024) Distribution of Co, Te, Se in the porphyry copper systems: A case study of the Tonglvshan deposit, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 106304. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106304>

REFERENCES

Azovskova O.B., Kolosova A.S., Soroka E.I., Rovnushkin M.Yu. (2022) Listvenite metasomatites of the Mikheevskoe porphyry (Au,Mo)Cu deposit, South Urals. *All-Russian Scientific Conference “Uralian Mineralogical School-2022”*. Yekaterinburg, OOO Universal'naya Tipografiya Alfa Print, 7–9. (in Russian)

Azovskova O.B., Rovnushkin M.Yu., Glavatskikh S.P. (2015) Mineralogy of argillic alteration of the Mikheevskoe porphyry copper deposit, South Urals. *Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2015. Mineral Deposits of Oceanic Structures: Geology, Mineralogy, Geochemistry, and Formation Conditions*. Miass, IMin UrO RAN, 116–120. (in Russian)

Chistyakova D.A., Plotinskaya O.Yu. (2022) Alteration of serpentinites at the Mikheevskoe porphyry copper deposit, South Urals. *All-Russian Scientific Conference “Uralian Mineralogical School-2022”*. Yekaterinburg, OOO Universal'naya Tipografiya Alfa Print, 166–168. (in Russian)

Chistyakova D.A., Plotinskaya O.Yu., Groznova E.O. (2022) Formation conditions of Cr-bearing quartz-sericite metasomatites of the Mikheevskoe porphyry copper deposit, South Urals. *Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2022. Mineral Deposits of Oceanic Structures: Geology, Mineralogy, Geochemistry, and Formation Conditions*. Miass, YuU FntS MiG UrO RAN, 70–72. (in Russian)

Filimonova L.E., Slusarev A.N. (1974) Ni and Co minerals and some problems of their geochemistry at the Boshchekul copper-molybdenum deposit. In: *Minerals and Mineral Parageneses of Hydrothermal Deposits*. Leningrad, Nauka, 38–46. (in Russian)

González-Jiménez J.M., Piña R., Saunders J.E., Plissart G., Marchesi C., Padrón-Navarta J. A., Ram'ón-Fernandez M., Garrido L.N.F., Gervilla F. (2021) Trace element fingerprints of Ni–Fe–S–As minerals in subduction channel serpentinites. *Lithos*, 400, 106432. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106432>

Grabezhev A.I., Belgorodskii E.A. (1992). Ore-bearing granitoids and metasomatites of copper porphyry deposits (Urals as example). Yekaterinburg, Nauka, 199 p. (in Russian)

Grguric B.A. (2002) Hypogene violarite of exsolution origin from Mount Keith, Western Australia: field evidence for a stable pentlandite–violetite tie line. *Mineralogical Magazine*, 66(2), 313–326. <https://doi.org/10.1180/0026461026620032>

- Groves D.I., Hudson D.R., Hack T.B. (1974) Modification of iron-nickel sulfides during serpentinization and talc-carbonate alteration at Black Swan, Western Australia. *Economic Geology*, 69(8), 1265–1281. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.69.8.1265>
- Ivanov V.V. (1995) Ecological geochemistry of elements: handbook. V. 4. Major d-elements. Moscow, Ekologiya, 416 p. (in Russian)
- Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N., Khertek A.K., Mongush A.O., Butanaeva Y.V. (2023) The Ak-Sug porphyry copper–gold–molybdenum deposit, East Sayan: noble metal mineralization, PT-parameters, and composition of ore-bearing fluid. *Geology of Ore Deposits*, 65(Suppl. 1), S58–S84. <https://doi.org/10.1134/S1075701523070188>
- Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltmann R., Spratt J. (2018) Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting. *Ore Geology Reviews*, 94, 239–260. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.025>
- Puchkov V.N. (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: What, where, when and why. *Ore Geology Reviews*, 85, 4–29. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.01.005>
- Seltmann R., Porter T.M. (2005) The Porphyry Cu-Au-Mo deposits of Central Eurasia: 1. Tectonic, geologic & metallogenic setting and significant deposits. In: *Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective*, vol. 2. Adelaide, PGC Publishing, 467–512.
- Shadchin M.V., Shvedov G.I., Makarov V.A., Lobastov B.M., Silyanov S.A., Serdyuk S.S. (2024) New data on ore mineralogy of the Ak-Sug porphyry Au-Mo-Co deposit (Northeastern Tuva). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 10(3), 32–51. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2024-10-3-3>. (in Russian with English abstract)
- Shargorodskii B.M., Novikov I.M., Aksenov S.A. (2005) The Mikheevskoe copper porphyry deposit in the South Urals. *Otechestvennaya geologia (Native Geology)*, (2), 57–61 (in Russian).
- Sillitoe R.H. (2010) Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105, 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Singer D.A., Berger V.I., Moring B.C. (2008) Porphyry copper deposits of the world: database and grade and tonnage models. Open-File Report 2008-1155.
- Strashimirov S., Petrunov R., Kanazirski M. (2002) Porphyry-copper mineralization in the central Srednegorie zone, Bulgaria. *Mineralium Deposita*, 37, 587–598. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0275-6>
- Tevelev A.I.V., Kosheleva I.F., Burshtein E.F. et al. (2018) State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200000. 2nd edition. South Urals series. Sheet N-41-XXV (Kartaly). Explanatory note. M., Moscow Branch of VSEGEI, 175 p. (in Russian)
- Velásquez G., Carrizo D., Salvi S., Vela I., Pablo M., Pérez A. (2020) Tracking cobalt, REE and gold from a porphyry-type deposit by LA-ICP-MS: A geological approach towards metal-selective mining in tailings. *Minerals*, 10(2), 109. <https://doi.org/10.3390/min10020109>
- Gold miner's bulletin (2017) <https://gold.lprime.ru/news/20170920/226023.html> (last addressed 30/11/2027) (in Russian)
- Wu X., Xie G., Xu J., Voudouris P., Liu W. (2024) Distribution of Co, Te, Se in the porphyry copper systems: A case study of the Tonglvshan deposit, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 106304. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106304>

Информация об авторах

Плотинская Ольга Юрьевна – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, Россия; plotin@igem.ru
Ковальчук Елена Владимировна – научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, Россия; elena7kovalchuk@gmail.com

Information about the authors

Olga Yu. Plotinskaya – Doctor of Geological–Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia; plotin@igem.ru
Elena V. Kovalchuk – Scientific Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia; elena7kovalchuk@gmail.com