



<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-3-4>
УДК 553.08

Золото-полиметаллическая минерализация Михеевского (Новониколаевского) Си-порфирового рудного узла, Южный Урал

О.Ю. Плотинская¹, В.В. Хребтневский², Е.В. Ковальчук^{1,3}, М.М. Савостьянова^{1,4}

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

² Московский государственный университет, Ленинские горы 1, г. Москва, 119991 Россия

³ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, ул. Миклухо-Маклая 23, г. Москва, 117485 Россия

⁴ Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, Старомонетный пер., д. 31, г. Москва, 119017 Россия

Статья поступила в редакцию 29.05.2026 г., после доработки 30.07.2026 г., принята к печати 06.08.2026 г

Аннотация. В статье охарактеризованы разные типы полиметаллической минерализации Михеевского (Новониколаевского) рудного узла (Южный Урал, Россия). На Михеевском Си-порфировом месторождении золото-полиметаллическая минерализация присутствует в виде субэпитермальных жил мощностью до 30 см с пиритом, арсенопиритом, блёклой рудой (теннантит-тетраэдрит-(Fe) и аргентотетраэдрит-(Fe)), сфалеритом и галенитом. Из редких минералов присутствуют самородное золото с широкими вариациями состава и полибазит. На Новониколаевском Си-скарново-порфировом месторождении ранние галенит и сфалерит установлены в массивных сульфидных рудах апоскарновой стадии, а в пропилитовых метасоматитах развиты поздние галенит и сфалерит, а также блёклые руды (теннантит-(Fe,Zn) – тетраэдрит-(Zn)). В ассоциации с минералами полиметаллов присутствуют самородное золото и редкие минералы Te, Hg, Bi, Ni, W, In, Sn. На Западном Си-порфировом рудопроявлении полиметаллическая ассоциация представлена пиритом, блёклой рудой (теннантит-тетраэдрит-(Zn)), галенитом и сфалеритом и ассоциирует с кварц-серицит-карбонатными метасоматитами. Изученные типы полиметаллической минерализации образовались при близких температурах (от 290–320 до 280–220 °C), но отличаются по типохимизму основных рудных минералов и набору редких минералов руд. Отличия обусловлены приуроченностью описанных типов минерализации к разным стадиям развития и к различным зонам порфирово-эпитермальной системы.

Ключевые слова: Южный Урал, Михеевское Си-порфировое месторождение, Западное Си-порфировое рудопроявление, Новониколаевское скарново-порфировое месторождение, медь, блёклые руды, сфалерит, галенит, самородное золото.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва, Россия).

Благодарности. Авторы выражают признательность руководству ОАО «Михеевский ГОК» (Челябинская обл., Россия) за содействие при полевых работах, сотрудникам лаборатории локальных методов исследования вещества Московского государственного университета (г. Москва, Россия) и лаборатории кристаллохимии минералов Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва, Россия) за выполненные анализы, а также Я.Е. Солдатовой за помощь в обработке данных.

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

Вклад авторов. Плотинская О.Ю. – разработка концепции, исследование, написание, редактирование финального варианта рукописи; Хребтиевский В.В. – разработка концепции, исследование, визуализация, написание рукописи; Ковальчук Е.В. – исследование; Савостьянова М.М. – исследование.

Для цитирования. Плотинская О.Ю., Хребтиевский В.В., Ковальчук Е.В., Савостьянова М.М. Золото-полиметаллическая минерализация Михеевского (Новониколаевского) Cu-порфинового рудного узла, Южный Урал. *Минералогия*, 2026, 12(3), 66–92. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-3-4>

Gold-base metal mineralization of the Mikheevsky (Novonikolaevsky) porphyry copper ore cluster, South Urals

O.Yu. Plotinskaya¹, V.V. Khrebtievsky², E.V. Kovalchuk^{1,3}, M.M. Savostyanova^{1,4}

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

² Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia

³ Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, ul. Miklukho-Maklaya 23, Moscow, 117485 Russia

⁴ Fedorovsky All-Russian Scientific Research Institute of Mineral Resources, Staromonetny per. 31, Moscow, 119017 Russia

Received 29.05.2026, revised 30.76.2026, accepted 06.08.2026

Abstract. The paper describes different types of base metal mineralization of the Mikheevsky (Novonikolaevsky) ore cluster (South Urals, Russia). At the Mikheevskoe porphyry copper deposit, gold-base metal mineralization occurs as subepithermal veins up to 30 cm thick with pyrite, arsenopyrite, fahlore (tennantite-tetrahedrite-(Fe) and argentotetrahedrite-(Fe)), sphalerite and galena. Minor minerals include native gold of varying composition and polybasite. At the Novonikolaevskoe skarn porphyry Cu deposit, early galena and sphalerite occur in massive sulfide ores of the post-skarn stage, while propylites hosts late galena and sphalerite, as well as fahlores (tennantite-(Fe, Zn)–tetrahedrite-(Zn)). Minor native gold and rare Te, Hg, Bi, Ni, W, In, and Sn minerals belong to the same assemblage. At the Zapadnoe porphyry Cu deposit, the base metal assemblage includes pyrite, fahlore (tennantite-tetrahedrite-(Zn)), galena, and sphalerite and is accompanied by quartz-sericite-carbonate alteration. These types of base metal mineralization formed at a similar temperature range (from 290–320 to 280–220 °C), but differ in chemical composition of major ore minerals and a set of rare ore minerals. This diversity is caused by zoning and different evolution stages of a telescoped porphyry system.

Keywords: South Urals, Mikheevskoe porphyry deposit, Zapadnoe porphyry deposit, Novonikolaevskoe skarn porphyry deposit, copper, fahlore, sphalerite, galena, native gold.

Funding. This work was supported by state contract of the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (Moscow, Russia).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the management of the Mikheevsky GOK (Chelyabinsk region, Russia) for support during fieldwork, staff of the Laboratory of Local Analytical Methods of the Moscow State University (Moscow, Russia) and Laboratory of Crystal Mineral Chemistry of the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry RAS (Moscow, Russia) for electron microprobe analysis, and Ya.E. Soldatova for assistance with data processing.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. Plotinskaya O.Yu. – concept development, research, visualization, writing, editing the final version of the manuscript; Khrebtievsky V.V. – concept development, research, visualization, writing; Kovalchuk E.V. – research, Savostyanova M.M. – research.

For citation: Plotinskaya O.Yu., Khrebtievsky V.V., Kovalchuk E.V., Savostyanova M.M. Gold-base metal mineralization of the Mikheevsky (Novonikolaevsky) porphyry copper ore cluster, South Urals. *Mineralogy*, 2026, 12(3), 66–92. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-3-4>

ВВЕДЕНИЕ

В мировом балансе Cu, Mo, Au, Re (и, в меньшей степени, Ag, Te, Se, Bi, Zn, Pb) одна из ведущих ролей принадлежит комплексным рудообразующим системам, которые включают медно-порфировые, скарновые и эпитермальные месторождения (Sillitoe, 2010; Lipson, 2014). В зарубежной литературе такие системы получили название телескопированные порфировые системы (telescoped porphyry system) (Sillitoe, 2010), а в отечественной – порфирово-эпитермальные рудообразующие системы или ПЭРС (Коваленкер, 2006). Интересной и не всегда однозначной является проблема распределения полезных компонентов в пределах таких систем. Так, чаще всего, Au, Ag, а также Bi, Te и Se сконцентрированы не в рудах порфирового типа, а в эпитермальных жилах, приуроченных к верхним горизонтам порфирово-эпитермальных систем (Hedenquist et al., 2000; Kesler et al., 2002; Sillitoe, 2010). В эпитермальных месторождениях высокосульфидизированного типа, помимо золота, содержатся промышленные концентрации Cu, которая присутствует в виде энаргита, люционита, фаматинита и ковеллина, а объекты промежуточносульфидизированного типа являются наиболее продуктивными на Cu-Pb-Zn и содержат сфалерит, галенит, халькопирит, теннантит-тетраэдрит (Hedenquist et al., 2000; Sillitoe, 2010; Catchpole et al., 2012). Однако в тех случаях, когда ПЭРС сильно эродированы и их «эпитермальная» часть утрачена, существенное значение в балансе благородных металлов и полиметаллов приобретают другие типы минерализации. Периферия глубокоэродированных ПЭРС (также, как и слабоэродированных) характеризуется геохимическими ореолами Zn, Pb, Ag и Mn, которые пространственно совпадают с ореолами пропилитизации. Нередко причиной повышенных содержаний этих элементов являются субэпитермальные жилы с высокими концентрациями полиметаллов (Sillitoe, 2010). Обычно такие жилы секут пропилитизированные зоны, сопровождаясь околожильными гидротермальными изменениями типа серицитизации или аргиллизации (Метасоматизм..., 1998). При наличии карбонатных пород на глубоких уровнях порфировых систем полиметаллическая минерализация может быть развита в дистальных скарнах и метасоматических месторождениях в карбонатных толщах (Meinert, 1992; Meinert et al., 2005; Donahue, 2002; Sillitoe, 2010).

Таким образом, участки с повышенными концентрациями Au и полиметаллов (прежде всего, Pb и Zn) могут быть приурочены к разным стадиям развития и различным зонам ПЭРС. Изучение разных типов Au-Ag, Au-Cu, Au-Pb-Zn и Pb-Zn минерализации и выявление их типоморфных признаков имеет важное прикладное и теоретическое значение. Настоящее исследование посвящено изучению полиметаллической минерализации месторождений Михеевского рудного узла (МРУ), который ранее называли Новониколаевским (Белгородский и др., 1991). Территория глубоко эродирована, поэтому эпитермальные Au-Ag месторождения или рудопроявления здесь отсутствуют. МРУ включает Михеевское медно-порфировое месторождение, которое является одним из самых крупных объектов порфирового типа на Урале, и ряд более мелких месторождений и рудопроявлений. Это делает территорию МРУ хорошим полигоном для изучения полиметаллической минерализации глубинного «порфирового» уровня ПЭРС. Основная цель данной работы – охарактеризовать различные типы полиметаллической минерализации Михеевского рудного узла и выявить типоморфные особенности основных рудных минералов на них.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИХЕЕВСКОГО РУДНОГО УЗЛА И ИЗУЧЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Михеевский рудный узел расположен на Южном Урале на территории Челябинской области. В геотектоническом отношении он находится на восточной окраине Зауральской мегазоны Южного Урала (рис. 1, врезка), а в металлогеническом – в пределах Иргизской минерагенической зоны, Тарутинско-Новониколаевской Cu-Mo-Fe-Au-Zn подзоны (Тевелев и др., 2018ф). Последняя включает также Тарутинский медно-рудный узел, расположенный примерно на 50 км севернее МРУ с Тарутинским медно-скарновым месторождением.

Геологическое строение территории МРУ (рис. 1) определяет система субмеридиональных глубинных разломов, разделяющих Восточно-Уральскую и Зауральскую мегазоны. Наиболее древние породы развиты в восточной части территории. Раннепалеозойская сланцево-карбонатная толща (увельская свита $O_{2-3}uv$) представлена основными вулканитами, чередующимися с более кислыми разностями и редкими пластами кремнистых алевролитов, туффицитов и яшмоидов (Те-

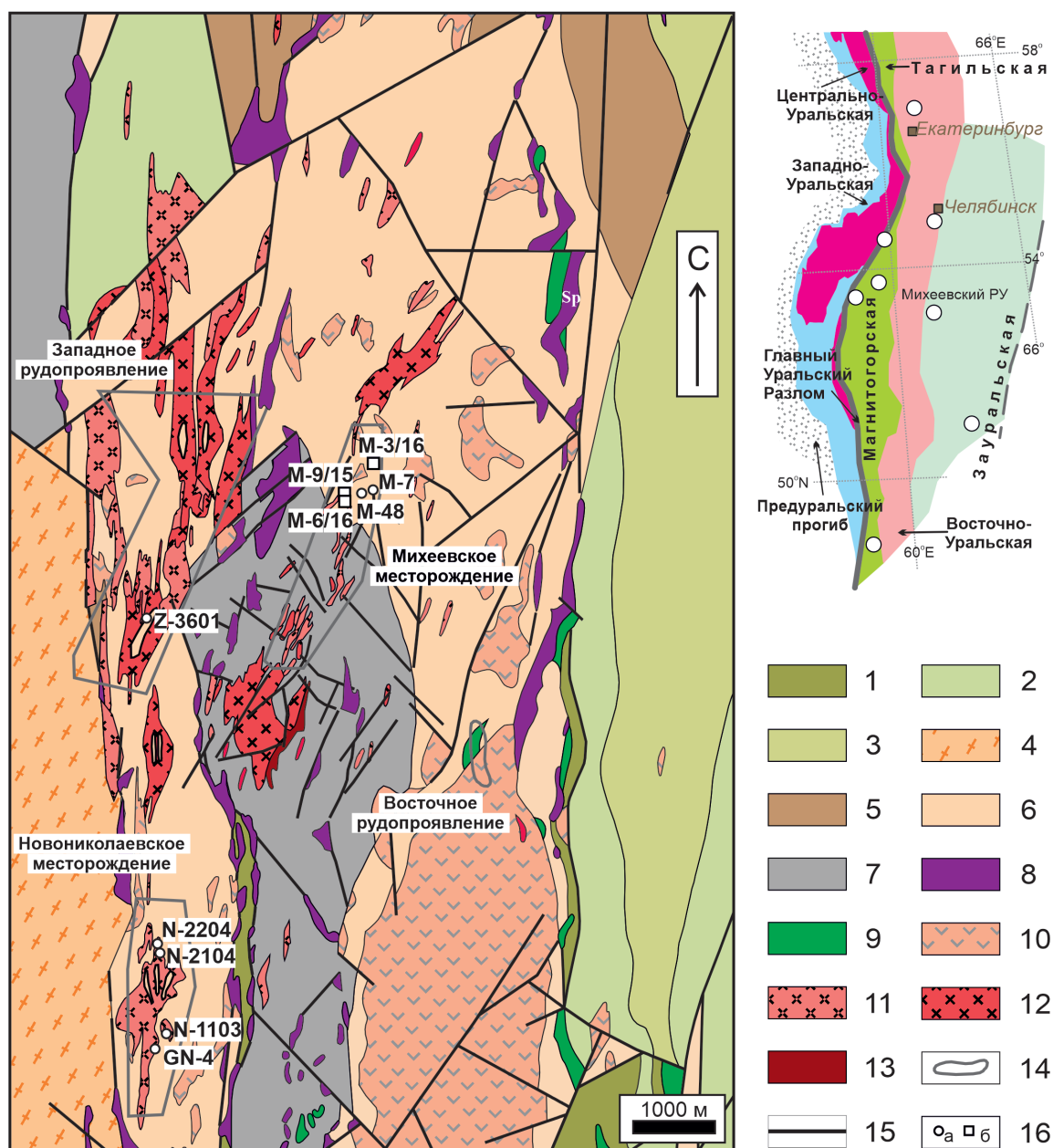


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Михеевского рудного узла по данным ООО «Геосинтез» (Кузнецов и др., 2020ф) с упрощениями. На врезке показано положение Михеевского рудного узла на тектонической схеме Южного Урала по (Puchkov, 2017; Plotinskaya et al., 2017).

1 – базальты, долериты, туфы основного состава, амфиболовые, эпидот-амфиболовые сланцы (Pz₁?); 2 – углисто-глинистые, кремнисто-углистые сланцы (S₁); 3 – туфы основного, смешанного составов, алевролиты, туфопесчаники, кремнисто-углистые сланцы (S₁₋₂); 4 – плагииграниты (C₁); 5 – тогузакская толща (D₁): базальты; 6 – вулканогенно-осадочная толща (D₃): известняки, алевропесчаники, туфопесчаники, туфоконгломераты, песчаники аркозовые, алевролиты, грубо- и разнообломочные породы преимущественно основного состава, андезибазальты и их туфы, базальты; 7 – афировые базальты и их лавокластиты и туфы, песчаники, углисто-кремнистые породы (D₃); 8 – серпентиниты и хлорит-карбонатные породы по серпентинитам (D₃); 9, 10 – ульяновский субвулканический комплекс (D₃–C₁): 9 – дайки и дайкообразные тела диабазов и габбродиабазов; 10 – штоки и дайки андезитовых порфириров, их брекчий, плагиигранодиоритов, малые тела дацитов, риодацитов; 11–13 – михеевский интрузивный комплекс (D₃–C₁): 11 – дайки диоритовых порфириров; 12 – штоки и дайки кварцевых диоритов и плагиигранитов; 13 – дайки плагиигранит-порфириров, плагиигранодиорит-порфириров; 14 – месторождения и рудопоявления медно-порфирировых руд, 15 – разрывные нарушения, 16 – положение изученных образцов, отобранных из карьера (а) и скважин (б).

Fig. 1. Schematic geological map of the Mikheevsky ore cluster, simplified after Geosintez Ltd. (Kuznetsov et al., 2020). The inset shows the position of the Mikheevsky ore cluster on tectonic scheme of the South Urals after (Puchkov, 2017; Plotinskaya et al., 2017).

1 – Early Paleozoic (?) basalt, dolerite, mafic tuff, amphibole and epidote-amphibole schist; 2 – Lower Silurian carbonaceous-clayey and siliceous-carbonaceous shale; 3 – Lower-Middle Silurian mafic and mixed tuff, siltstone, tuffaceous sandstone, siliceous-carbonaceous shale; 4 – Early Carboniferous plagiogranite; 5 – Early Devonian Toguzak Sequence, basalt; 6 – Upper Devonian volcanosedimentary sequence: limestone, silty sandstone, tuffaceous sandstone, tuffaceous conglomerate, arkose sandstone, siltstone, mostly mafic coarse- and mixed-clastic rock, basaltic andesite and tuff, basalt; 7 – Late Devonian aphyric basalt and clastic lava and tuff, sandstone, carbonaceous-siliceous rock; 8 – Late Devonian serpentinite and chlorite-carbonate rock after serpentinites; 9, 10 – Late Devonian-Early Carboniferous Ul'yanovsk subvolcanic complex: 9 – dikes and dike-shaped bodies of diabase and gabbrodiabase; 10 – stocks and dikes of andesite porphyry, breccia, plagiogranodiorite, small intrusions of dacite, rhyodacite; 11–13 – Late Devonian-Early Carboniferous Mikheevsky intrusive complex: 11 – dikes of diorite porphyry; 12 – stocks and dikes of quartz diorite and plagiogranite; 13 – plagiogranite-porphyry dike, plagiogranodiorite-porphyry; 14 – porphyry copper deposits and occurrences, 15 – faults, 16 – sampling points: a – sampled from the open pit; б – sampled from drill core.

велев и др., 2018ф). Черносланцевая варненская толща (S_{1vr}) (Тевелев и др., 2018ф) сложена углисто-кремнистым и кремнисто-углистыми сланцами с прослоями углеродистых известняков, а также гравелитов, песчаников и алевролитов. Вулканогенно-осадочная катенинская толща (S_{1-2kt}) (Тевелев и др., 2018ф) представлена туфами основного и смешанного составов, вулканическими песчаниками, туфопесчаниками, песчаниками, алевролитами, кремнисто-углистыми сланцами, реже базальтоидами и прослоями известняков. Большую часть территории МРУ составляют раннедевонские вулканогенно-осадочные породы, которые вмещают месторождения и рудопроявления меди (Белгородский и др., 1991). Они образуют субмеридиональную грабен-синклиналь (Рис. 1), крылья которой сложены вулканогенно-осадочными породами (алевропесчаники, туфопесчаники, алевролиты, туфоконгломераты, андезибазальты и их туфы, базальты, известняки) ацисуйской толщи, а осевая часть – вулканогенной аккаргинской толщей (афировые базальты, углисто-кремнистые породы и др.).

Интрузивные породы на территории МРУ представлены ульяновским, михеевским и новониколаевским комплексами. Широко развиты серпентиниты, образовавшиеся по ультрабазитам, предположительно, ордовикского дружининского комплекса (Тевелев и др., 2018ф), «холодное внедрение» которых, предположительно, произошло в раннем карбоне. Субвулканический ульяновский комплекс включает в себя дайки и дайкообразные тела диабазов и габбродиабазов, а также штоки и дайки андезитовых порфиритов, их брекчий, малые тела дацитов и риодацитов (Шаргородский и др., 2005). Породы михеевского комплекса представлены дайками диоритовых порфиритов, штоками и дайками кварцевых диоритов и плагиигранитов, дайками плагии-

огранит-порфиров и плагиигранодиорит-порфиров. U-Pb возраст циркона (SHRIMP-II) из порфировидного кварцевого диорита михеевского комплекса составил 356 ± 6 млн лет (Грабежев, Ронкин, 2011), что позволяет отнести эти комплексы к позднему девону-раннему карбону. В пределах ошибки этот возраст совпадает с Re-Os возрастом молибденита Михеевского месторождения 357.8 ± 1.8 и 356.1 ± 1.4 млн лет (Tessalina, Plotinskaya, 2017). На западе рудного узла расположен Новониколаевский плагииогранитный массив предположительно позднекаменноугольного возраста (Тевелев и др., 2018ф).

Все известные рудные объекты пространственно и генетически связаны с интрузиями михеевского комплекса (Грабежев, Белгородский, 1992; Гирфанов и др., 1991). Помимо Михеевского месторождения, на территории МРУ известны Западное, Новониколаевское, Ульяновское и ряд неназванных рудопроявлений (Белгородский и др., 1991).

Михеевское медно-порфировое месторождение является наиболее изученным объектом на данной территории. В многочисленных публикациях охарактеризованы возраст и состав интрузивных пород (Грабежев, Белгородский, 1992; Грабежев, Ронкин, 2011) и метасоматитов (Грабежев, 2014), типохимизм основных рудных и жильных минералов (Плотинская и др., 2015; Plotinskaya et al., 2018; Азовская и др., 2018; Плотинская, Ковальчук, 2022, 2025; Rovnushkin, Azovskova, 2022; Прибавкин и др., 2023).

В геологическом строении территории месторождения (рис. 1) принимают участие вулканогенно-осадочные породы позднедевонского возраста, которые подразделены на две пачки. Нижняя пачка представлена переслаивающимися песчаниками, туфопесчаниками, андезибазальтами и их туфами и туфобрекчиями при подчиненной роли алевроли-

тов, углисто-кремнистых пород, базальтов и других пород. Верхняя пачка сложена лавами и лавокластитами афировых базальтов с прослоями песчаников, силицитов и углисто-кремнистых пород с телами серпентинитов (Шаргородский и др., 2005). Интрузии ульяновского комплекса представлены, главным образом, штоками и дайками диоритовых порфиритов и андезитов, реже дацитами, риодацитами, плагиогранодиоритами и диабазами. Михеевский комплекс представлен несколькими равномернозернистыми и порфировыми разностями, среди которых наиболее широко развиты диориты, диоритовые порфириты, а также пострудные плагиогранит-порфиры (Грабежев, Белгородский, 1992).

Рудная минерализация, преимущественно, прожилково-вкрапленная, приурочена к кварц-серицитовым (филлизитовым), хлорит-серицитовым и пропиловым метасоматитам. Основные минералы – пирит, халькопирит и молибденит, реже магнетит. Также встречаются золото-полиметаллические жилы, которые сопровождаются кварц-карбонат-серицитовыми метасоматитами, где серицит представлен слюдой ряда мусковит-парагонит (Plotinskaya et al., 2018). Месторождение разрабатывается открытым способом с 2013 г., запасы месторождения на 2022 г. составляли около 2 млн т Cu и 50 т Au (<https://nedradv.ru/>).

Новониколаевское месторождение расположено на юго-западе территории МРУ (рис. 1) и является первым рудным объектом, открытым на описываемой территории в 1952 г. (Тевелев и др., 2018ф и цитируемая литература). Несмотря на это, оно изучено значительно слабее, чем Михеевское месторождение (Горбунов и др., 2019; Бурмистров и др., 2023; Хребтиевский, 2024, 2025, 2026; Хребтиевский, Плотинская, 2026).

Вмещающие вулканогенно-осадочные породы представлены песчаниками, известняками, алевролитами, аргиллитами, туфами и эффузивами среднего состава, которые моноклинально падают на восток под углом 45–50° (Белгородский и др., 1991). Их прорывают многочисленные дайки диоритовых порфиритов, реже плагиогранодиоритов и риодацитов михеевского и ульяновского комплексов. Рудная минерализация на месторождении представлена магнетитовыми скарнами, массивными и густовкрапленными пиритовыми зонами и прожилково-вкрапленными пирит-халькопиритовыми рудами. В настоящее время месторождение отнесено к скарново-медно-порфировому типу (Хребтиевский, 2026).

Западное рудопоявление расположено примерно в 2 км к западу от Михеевского месторождения и локализовано в вулканогенно-осадочных породах, среди которых преобладают базальты, грубообломочные породы основного состава, а также туфо- и алевропесчаники. Породы прорваны дайками кварцевых диоритов и диоритовых порфиритов михеевского комплекса и дацитами и риодацитами ульяновского комплекса. Рудопоявление отнесено к медно-порфировому типу (Белгородский и др., 1991), но почти не изучалось. Рудная минерализация прожилково-вкрапленная, преобладают пирит и халькопирит, также встречается молибденит.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Химический состав минералов изучен на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-IT500 с ЭДС-спектрометром INCA X-Maxn (геологический факультет Московского государственного университета (г. Москва, Россия; аналитики Н.Н. Коротаева и В.О. Япаскурт) по стандартным методикам и на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8200 фирмы JEOL (Япония) в ЦКП «ИГЕМ-аналитика» (Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, Россия, аналитик Е.В. Ковальчук). Условия анализа на микроанализаторе JXA-8200: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток на цилиндре Фарадея 20 нА, диаметр пучка 1 мкм.

Блёклые руды. Время экспозиции на все элементы составляло 10 сек. на пике и по 5 сек. на фоне с обеих сторон. Стандарты: для Sb (L α) – Sb₂S₃, Se (L α) – CdSe, Zn (K α) – ZnS, S (K α) – CuFeS₂, Ag (L α) – AgSbS₂, As (L α) – GaAs, Cu (K α) – Cu, Hg (M α) – HgS, Te (L α) – Te, Fe (K α) – CuFeS₂, Bi (M α) – Bi₂Te₃, Cd (L β) – CdSe, Pb (M α) – PbS. Пределы обнаружения для 3 σ интервала (мас. %) для S – 0.02, Fe, Se – 0.06, Ag – 0.07, As, Cu, Te и Pb – 0.08, Hg и Bi – 0.09, Sb и Zn – 0.10, Cd – 0.15.

Сфалерит. Время экспозиции для Zn и Hg – 10 сек. на пике и по 5 сек. на фоне с обеих сторон, для S, In, Ag, Fe и Mn – 20/10 сек., Sn, Cu и Cd – 30/15 сек. Стандарты: Sn (L α) – Sn, Zn (K α) и S (K α) – ZnS, In (L α) – InSb, Cu (K α) и Fe (K α) – CuFeS₂, Ag (L α) – Ag, Cd (L α) – CdS, Hg (M α) – HgS, Mn (K α) – Mn. Пределы обнаружения для 3 σ интервала (мас. %): Sn – 0.05, In – 0.06, Cu – 0.06, Ag – 0.04, Cd – 0.09, Fe – 0.05, Hg – 0.10, Mn – 0.05.

Арсенопирит. Время экспозиции для всех элементов – 10 сек. на пике и по 5 сек. на фоне с

обеих сторон. Стандарты: As (L α) – GaAs, Fe (K α), S (K α) и Cu (K α) – CuFeS₂, Ni (K α) – Ni, Zn (K α) – ZnS, Sb (L α) – NiSbS, Co (K α) – Co, Ag (L α) – Ag. Пределы обнаружения для 3 σ интервала (мас. %): As – 0.11, Fe – 0.06, S – 0.02, Ni – 0.06, Zn – 0.10, Sb – 0.06, Co – 0.06, Cu – 0.09, Ag – 0.05.

Пирит. Время экспозиции для Fe, S, Cu, Ni и Sb – 10 сек. на пике и по 5 сек. на фоне с обеих сторон, для As и Co – 30/15 сек. Стандарты: Sb (L α) – NiSbS, Ni (K α) – Ni, As (L α) – GaAs, S (K α) и Fe (K α) – FeS₂, Cu (K α) – CuFeS₂, Co (K α) – Co. Пределы обнаружения для 3 σ интервала (мас. %): As – 0.05, Ni – 0.06, Cu – 0.09, Sb – 0.05, Co – 0.06.

Самородное золото. Время экспозиции для всех элементов 20 сек. на пике и по 10 сек. на фоне с обеих сторон. Стандарты: Au (L α) – Au, Ag (L α) – Ag, Cu (K α) – Cu, Fe (K α) – CuFeS₂, Hg (M β) – HgTe. Пределы обнаружения для 3 σ интервала (мас. %): Au – 0.33, Ag – 0.04, Cu – 0.09, Fe – 0.06, Hg – 0.14.

Вольфрамит. Время экспозиции для W, Ca и Fe составляло 10 сек. на пике и по 5 сек. на фоне с обеих сторон, для Sr – 20/10 сек., для Mn и Nb – 30/15 сек. Стандарты: W (L α) и Ca (K α) – шеелит, Fe (K α) – магнетит, Mn (K α) – манганит, Nb (L α) – Cs₂Nb₄O₁₁, Sr (L α) – SrSO₄. Пределы обнаружения для 3 σ интервала (мас. %): WO₃ – 0.34, CaO – 0.04, FeO – 0.10, MnO – 0.06, Nb₂O₅ – 0.06, SrO – 0.12.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Типы полиметаллической минерализации Михеевского рудного узла

На Михеевском месторождении минералы полиметаллической стадии на верхних горизонтах месторождения образуют жилы мощностью до 20–30 см, выполненные белым кварцем, пиритом, арсенопиритом, сфалеритом, блёклой рудой и галенитом (рис. 2А–В). Встречаются как жилы, в которых из рудных минералов преобладают сфалерит (рис. 2Б) или блёклая руда (рис. 2В), так и жилы, где доминируют арсенопирит и пирит. На более глубоких горизонтах полиметаллическая минерализация встречается в виде прожилков мощностью не более 5 см (рис. 2Г) с тем же набором рудных минералов (табл. 1).

На Новониколаевском месторождении встречается полиметаллическая минерализация двух типов (стадий) – апоскарновой и пропилитовой, которые часто накладываются одна на другую (рис. 2Д–К).

Минерализация апоскарновой стадии (рис. 2Д, Е) встречается редко, в виде интервалов густо-крапленных сульфидов по вмещающим известнякам (рис. 2Д) и, в меньшей степени, по диоритовым порфирирам (рис. 2Е). Минералы полиметаллов (обр. Н-2204/117.5) представлены крупными зернами сфалерита-1 (до 3 мм) и галенита-1 (до 1 мм), которые цементируют ранний пирит (рис. 2З, 3В).

Минерализация пропилитовой стадии пространственно сопряжена с зонами пропилитизации, которая развивается, преимущественно, по диоритовым порфирирам, а также по алевролитам и песчаникам. Полиметаллическая минерализация (обр. N-2204/124.8, 2204/126, GN-4/119.9, GN-4/128.4, N-1103/57.6 и N-2204/117.5) в таких интервалах представлена, в основном, мелкими (100–200 мкм) вкраплениями сфалерита-2 с халькопиритовой эмульсионной вкрапленностью, галенита (до 100 мкм), пирита (до 100 мкм) и реже блёклой руды (до 100 мкм), которые ассоциируют с хлоритом и кальцитом. Минерализация пропилитовой стадии нередко наложена на апоскарновую в виде гнезд, прожилков или прожилковидных образований, например, в обр. N-2204/117.5 (рис. 2Е, 3). Мощность интервалов пропилитизации достигает десятков, а иногда и сотен метров, при этом их строение нередко осложнено наложением более поздних кварц-карбонат-серицитовых изменений без рудной нагрузки (рис. 2Ж).

На Западном рудопроявлении минералы полиметаллической стадии образуют густую и мелкую вкрапленность, а также маломощные прожилки, гнезда и вкрапленность в породах вулканогенно-осадочной толщи и диоритоидах. Они пространственно сопряжены с кварц-карбонат-серицитовыми изменениями, которые развиваются, преимущественно, по диоритовым порфирирам (рис. 2Л–О).

Типоморфные особенности основных минералов

Наиболее ранними минералами полиметаллической минерализации являются пирит и арсенопирит. Арсенопирит распространен в жилах Михеевского месторождения, существенно реже встречается на Новониколаевском месторождении и не установлен на Западном рудопроявлении. Его соотношения с пиритом не всегда однозначны: наблюдалось как обрастание пирита арсенопиритом, так и обратные взаимоотношения, что позволяет

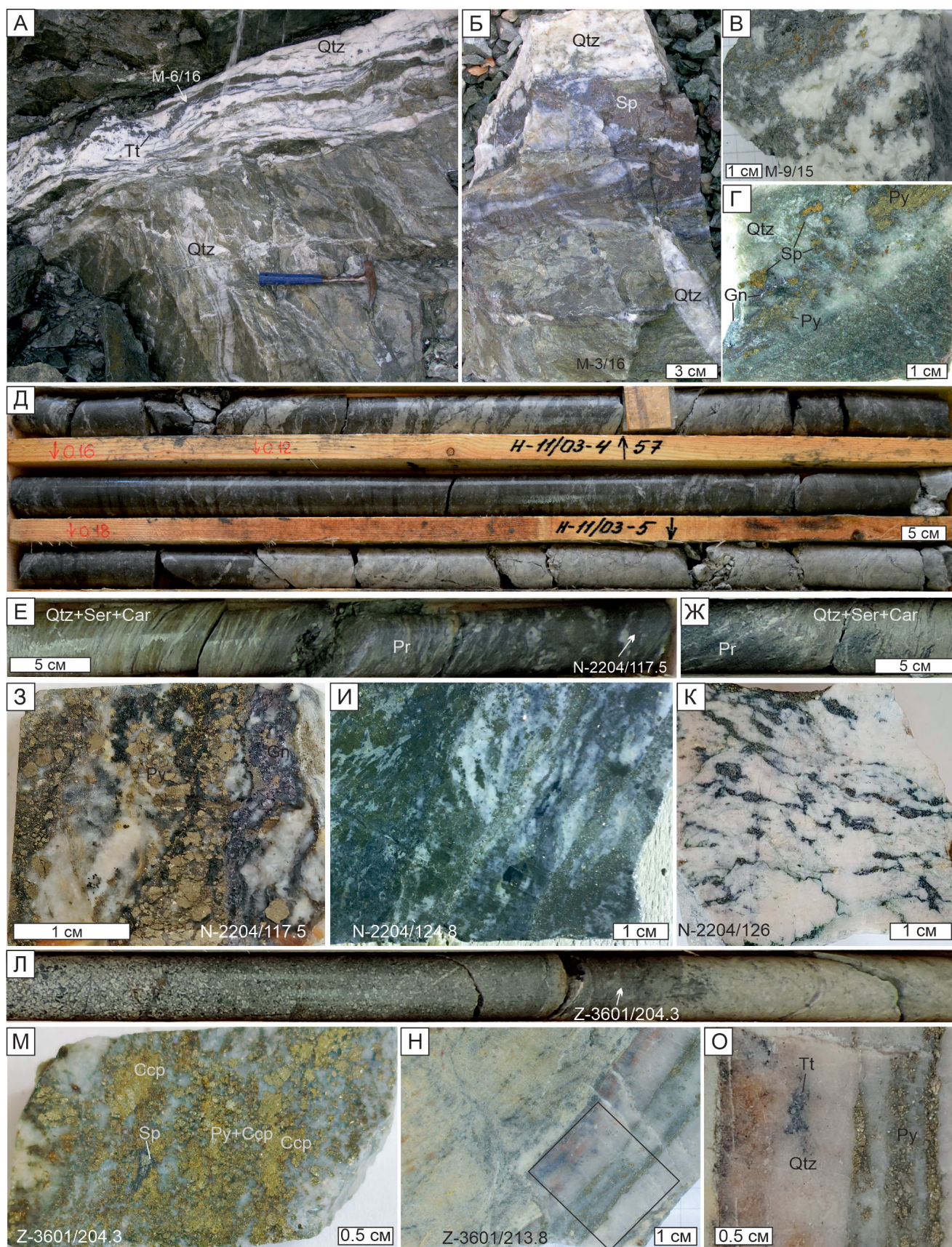


Рис. 2. Представительные образцы с полиметаллической минерализацией Михеевского рудного узла: А – кварцевая жила (Qtz) с гнездами блёклой руды (Tt) в борту карьера (обр. М-6/16), пересекающая более ранние кварцевые прожилки; Б – кварцевая жила с крупнозернистым сфалеритом (Sp) (обр. М-3/16); В – фрагмент кварцевой жилы с крупными гнездами блёклой руды (обр. М-1-9/15); Г – кварцевый прожилок с гнездами пирита (Py), сфалерита и галенита (Gn) (обр. М1554/729.8); Д – апоскарновая минерализация: густовкрапленные и массивные сульфиды (темное), развитые по известняку (светлое) (скв. N-1103, 56.7–59.4 м); Е – густовкрапленные сульфиды в пропилите на границе с кварц-карбонат-серицитовым метасоматитом по диоритовому порфиру (скв. N-2204, 117.0–117.5 м); Ж – кварц-карбонат-серицитовых метасоматиты, наложенные на пропилиты (скв. N-2204, 128.0–128.2 м); З – кварц-пиритовая жила с галенитом (обр. N-2204/117.5); И – кварц-пиритовая жила с просечками и гнездами блёклой руды (обр. N-2204/124.8); К – кварцевая жила с многочисленными просечками и гнездами пирита, блёклой руды и других сульфидов (обр. N-2204/126); Л – зона кварц-серицит-карбонатных метасоматитов с участком сульфидизации (скв. Z-3601/203.7-204.7) по диоритовому порфиру; М – кварц-пирит-халькопиритовый прожилок с редкими гнездами сфалерита (обр. Z-3601/204.3); Н – кварц-серицитовый метасоматит с прожилком кварца (обр. Z-3601/213.8); О – увеличенный фрагмент фото 2М: цепочки пирита, гнездовидная вкрапленность блёклой руды.

Рис. А–Г – Михеевское месторождение; Д–К – Новониколаевское месторождение; Л–О – Западное рудопроявление.

Fig. 2. Representative samples with base metal mineralization of the Mikheevsky ore cluster: А – quartz vein (Qtz) with fahlore pockets (Tt) in the open pit (sample M-6/16), which intersects earlier quartz veinlets; Б – quartz vein with coarse-grained sphalerite (Sp) (sample M-3/16); В – fragment of quartz vein with large fahlore pockets (sample M-9/15); Г – quartz veinlet with pyrite pockets (Py), sphalerite and galena (Gn) (sample M-1554/729.8); Д – post-skarn mineralization: replacement of limestone (light) by disseminated to massive sulfides (dark) (borehole N-1103, 56.7–59.4 m); Е – densely disseminated sulfides in propylite at the contact with quartz-carbonate-sericite metasomatite after diorite porphyry (borehole N-2204, 117.0–117.5 m); Ж – quartz-carbonate-sericite metasomatite after propylite (borehole N-2204, 128.0–128.2 m); З – quartz-pyrite vein with galena (sample N-2204/117.5); И – quartz-pyrite vein with stringers and pockets of fahlore (sample N-2204/124.8); К – quartz vein with numerous stringers and pockets of pyrite, fahlore and other sulfides (sample H-2204/126); Л – quartz-sericite-carbonate alteration zone with a sulfide-rich area (borehole Z-3601/203.7-204.7) after diorite porphyry; М – quartz-pyrite-chalcopyrite veinlet with rare sphalerite pockets (sample Z-3601/204.3); Н – quartz-sericite metasomatite with quartz veinlet (sample Z-3601/213.8); О – enlarged fragment of Fig. 2M: chains of pyrite aggregates and pocket dissemination of fahlore.

Figs. А–Г – Mikheevskoe deposit; Д–К – Novonikolaevskoe deposit; Л–О – Zapadnoe occurrence.

говорить об их близ-одновременном образовании. Блёклые руды, халькопирит, сфалерит и галенит обрастают пирит и арсенопирит, корродируют их и выполняют в них трещины (рис. 3). В этой же ассоциации иногда присутствуют самородное золото и другие редкие минералы, охарактеризованные ниже.

Пирит одинаково широко распространен на всех трех изученных месторождениях. Пирит из полиметаллических ассоциаций образует кристаллы кубического габитуса, реже ксеноморфные зерна размером первые сотни микрометров и их агрегаты (рис. 3А–В). Нередки корродированные кристаллы, которые по трещинам замещаются более поздним халькопиритом и другими минералами (рис. 3Д). Пирит в большинстве случаев пористый, с многочисленными включениями халькопирита и блёклой руды (рис. 3Б, В, Е). Основной примесью в пирите из полиметаллической минерализации является As: его содержания достигают 2 мас. % на Новониколаевском месторождении и 5 мас. % – на Михеевском (электронное приложение (ЭП), табл. 1), хотя в последнем случае наиболее вероятен захват включения теннантита. В единичных анализах установ-

лены Co, Ni или Cu (до первых десятых массовых процентов), но в большинстве случаев содержания этих элементов, а также Sb ниже предела обнаружения.

Арсенопирит. На Михеевском месторождении в большинстве образцов (М-1-9/15, М-11-2-16, М-11-227,4 и М-1-9/15) для арсенопирита характерен длиннопризматический и псевдоромбический габитус (рис. 3А, 4А), а в тех образцах, где широко развиты галенит и сфалерит (М-1554/729,8, М-3-1/16), арсенопирит обычно ксеноморфный и корродирован более поздними минералами (рис. 3Б). Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) (ЭП, табл. 2) выявил незначительные примеси Ni (до 0.15 мас. %), Co (до 0.15 мас. %) и Cu (до 0.64 мас. %). Содержания Sb и Ag обычно ниже предела обнаружения (0.06 и 0.05 мас. %, соответственно). Отношение As/S варьирует в узком диапазоне от 0.74 до 0.90. В идиоморфных кристаллах иногда присутствуют каймы шириной в первые десятки микрометров, в которых содержания Sb достигают 1.7 мас. %, а отношение (As + Sb)/S увеличивается до 1.24 (рис. 4А).

Таблица 1. Образцы с полиметаллической минерализацией Михеевского рудного узла
 Table 1. Samples with base metal mineralization from the Mikheevskoe ore cluster

№ п/п	№ образца	Краткое описание
Михеевское месторождение		
Карьер		
1	M9/15	Массивный белый кварц с крупными (до 2–3 см) гнездами блеклой руды и халькопирита (рис. 2В)
2	M3/16	Жила белого кварца с галенитом и сфалеритом в интенсивно серицитизированном и окварцованном андезите (рис. 2Б)
3	M6/16	Густая вкрапленность тонкоигольчатого арсенопирита (до миллиметра) в кварц-серицитовом метасоматите
4	M7/16	Кварц-сульфидный прожилок мощностью 2 см в пиритизированном хлоритовом сланце по метабазиту. В приальбадных зонах прожилка наблюдается вкрапленность и гнезда галенита (до 2 мм), в осевой зоне – гнезда пирита неправильной формы (до 1 см)
Скважины		
5	M7/224.6	Кварцевый прожилок с халькопирит-пиритовым гнездом (1 см) с редким сфалеритом
6	M1554/729.8	Прожилки белого кварца с карбонатом мощностью 5 см в кварц-серицит-пиритовом метасоматите. В прожилке гнезда пирита до 1–2 см и просечки галенита до 1–3 мм (рис. 2 Г)
Новониколаевское месторождение		
7	H-2204/101.0	Тонкозернистый, полосчатый кварц-карбонат-серицитовый метасоматит по алевролиту, серия кварц-карбонатных прожилков с пиритом
8	N-2204/117.5	Интенсивно измененный диоритовый порфирит с хлоритовыми и кварц-карбонат-серицитовыми изменениями. Отмечается кварц-пиритовая жила видимой мощностью 7 см, по альбанду в жилу вложен кварц-галенитовый прожилок (рис. 23)
9	N-2204/124.8	Кварц-пиритовая зона. Пирит образует массивные гнезда размером до первых сантиметров. Редкие просечки и гнезда черного цвета, скорее всего, блеклой руды (рис. 2И)
10	N-2204/126.0	Фрагмент белой кварцевой жилы видимой мощностью 5 см с многочисленными просечками и гнездами пирита, блеклой руды и других сульфидов (рис. 2К)
11	N-1103/57.6	Интенсивно сульфидизированная порода по известняку с густовкрапленным пиритом, а также мелкой вкрапленностью халькопирита, блеклой руды и сфалерита
12	GN-4/119.9	Интенсивно сульфидизированная порода по известняку с густовкрапленным пиритом и гнездами халькопирита до 1 мм, а также мелкой вкрапленностью сфалерита и халькопирита
13	GN-4/128.4	Кварц-хлорит-карбонатный метасоматит, предположительно, по вулканогенно-осадочной породе с мелкими (менее 1 мм) кварцевыми прожилками и вкрапленностью пирита и халькопирита
Западное рудопроявление		
14	Z-3601/204.3	Кварц-серицитовый метасоматит с кварц-пирит-халькопиритовым прожилком мощностью 4 см; в прожилке – редкие гнезда сфалерита (рис. 2М)
15	Z-3601/213.8	Кварц-серицитовый метасоматит с прожилком серовато-розоватого кварца мощностью 3 см, в осевой части прожилка цепочки пирита и в приальбадной части – гнездовая вкрапленность блеклой руды (рис. 2Н, О)

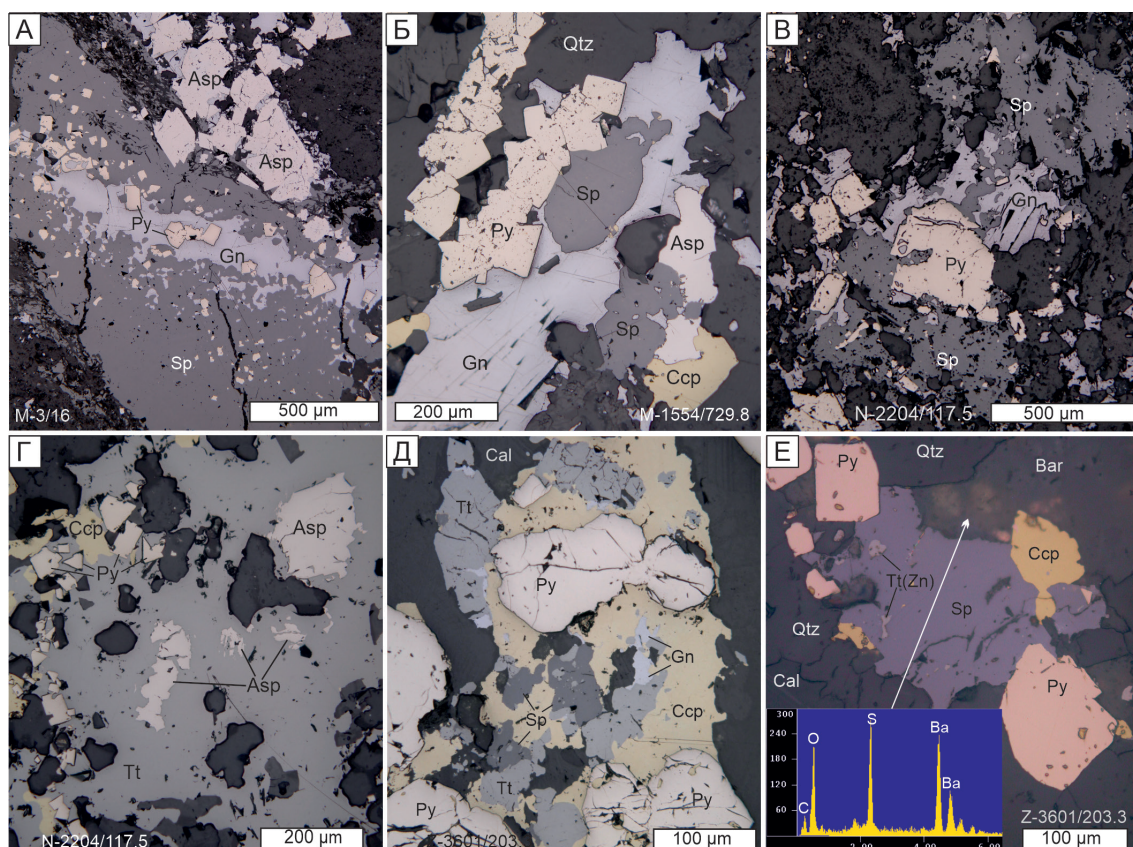


Рис. 3. Основные рудные минералы из образцов с полиметаллической минерализацией Михеевского рудного узла: А – сфалерит нарастает на псевдоромбический арсенопирит (Asp), галенит рассекает сфалерит и обрастает арсенопирит (обр. М3/16); Б – галенит цементирует пирит и сфалерит, сфалерит и халькопирит (Ccp) обрастают и корродируют арсенопирит (обр. М1554/729.8); В – апоскарновая минерализация, сфалерит цементирует пирит и обрастает галенитом (обр. N-2204/117.5); Г – пропилитовая минерализация: блёклая руда корродирует арсенопирит и обрастает халькопиритом (обр. N-2204/117.5); Д – сфалерит и блёклая руда замещают халькопирит, который цементирует пирит (обр. Z-3601/204.3); Е – сфалерит в сростании с баритом (Bar) (на врезке показан его ЭД спектр), пиритом и халькопиритом и мелкими включениями блёклой руды (обр. Z-3601/204.3).

Рис. А, Б – Михеевское месторождение; В, Г – Новониколаевское месторождение; Д, Е – Западное рудопроявление. Отраженный свет.

Fig. 3. Major ore minerals from samples with base metal mineralization of the Mikheevsky ore cluster: А – sphalerite overgrows pseudorhombic arsenopyrite (Asp), galena intersects sphalerite and overgrows arsenopyrite (sample M3/16); Б – galena encloses pyrite and sphalerite, sphalerite and chalcopyrite (Ccp) overgrow and replace arsenopyrite (sample M1554/729.8); В – post-skarn mineralization: sphalerite enclose pyrite and overgrows galena (sample H-2204/117.5); Г – propylitic mineralization: fahlore replaces arsenopyrite and is overgrown by chalcopyrite (sample H-2204/117.5); Д – sphalerite and fahlore replace chalcopyrite between pyrite (sample Z-3601/204.3); Е – sphalerite intergrown with barite (Bar) (the inset shows its ED spectrum), pyrite and chalcopyrite and small inclusions of fahlore (sample Z-3601/204.3).

Figs. А, Б – Mikheevskoe deposit; В, Г – Novonikolaevskoe deposit; Д, Е – Zapadnoe occurrence. Reflected light.

На Новониколаевском месторождении арсенопирит установлен исключительно в виде ксеноморфных корродированных выделений (рис. 3Г). Он повсеместно замещается блёклой рудой и халькопиритом по трещинам и порам и, как следствие, насыщен включениями этих и других минералов. Содержания примесей обычно не превышают пределы обнаружения, но в отдельных анализах от-

мечается до 0.2 мас. % Sb, до 0.13 мас. % Co и до 0.72 мас. % Cu. Отношение As/S почти не меняется и составляет от 0.80 до 0.89 (ЭП, табл. 2).

Сфалерит встречается в объектах МРУ неравномерно: он широко распространен в полиметаллических жилах Михеевского месторождения и образует гнездовидную вкрапленность в рудах Новониколаевского месторождения и Западного

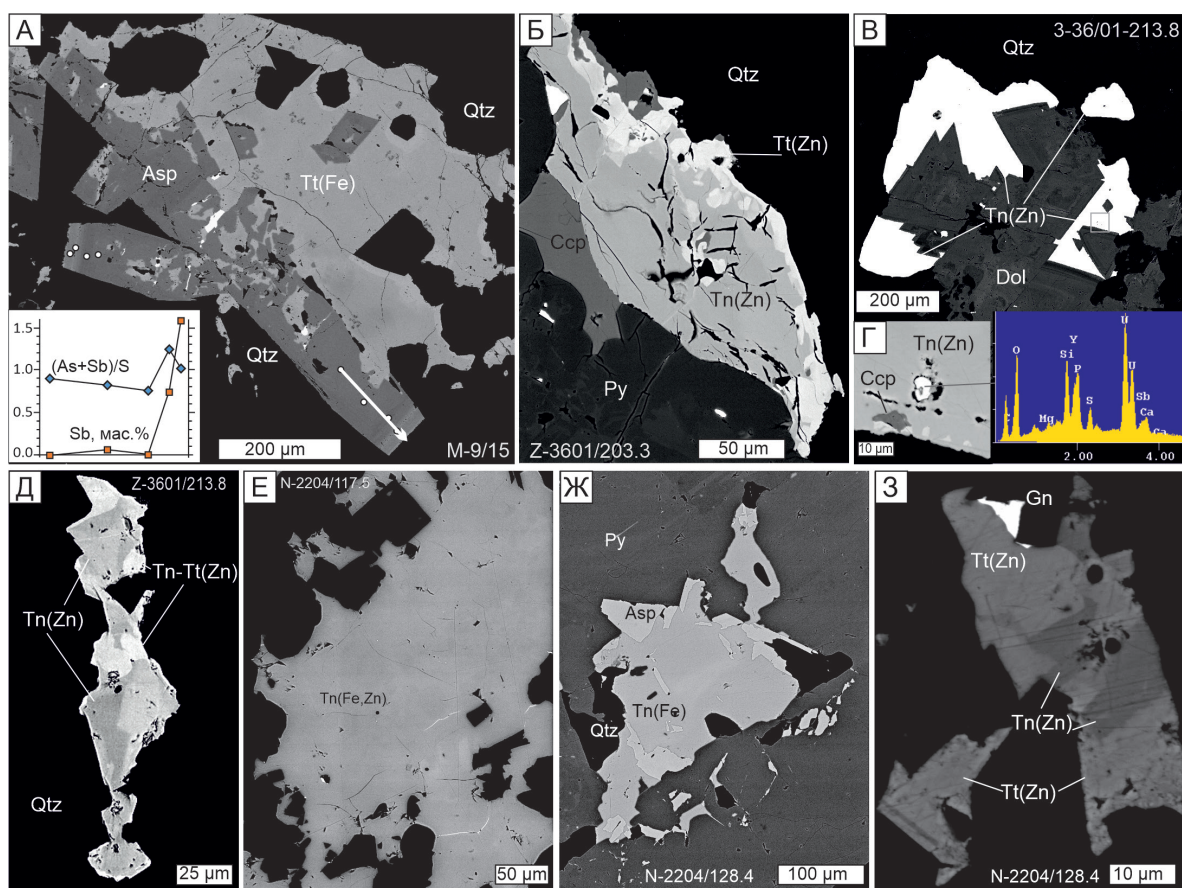


Рис. 4. Арсенопирит и блёклые руды Михеевского рудного узла: А – тетраэдрит-(Fe) обрастает длиннопризматический арсенопирит и совместно с самородным золотом заполняет в нем трещины; на врезке показаны вариации состава арсенопирита вдоль линии профиля РСМА (стрелка) (обр. М-9/15); Б – теннантит-(Zn) с каймой тетраэдрита-(Zn) нарастает на пирит и халькопирит (обр. Z-3601/204.3); В – химически однородный теннантит-(Zn) нарастает на доломит среди кварца (обр. Z-3601/213.8); Г – увеличенный фрагмент (В): включение минерала урана и ЭД спектр; Д – зональный теннантит-тетраэдрит-(Zn) в кварце (обр. Z-3601/213.8); Е – крупное однородное по составу выделение теннантита-(Zn,Fe) (обр. N-2204/117.5); Ж – химически однородный теннантит-(Fe) замещает арсенопирит среди пирита (обр. N-2204/124.8); 3 – выделение блёклой руды с резкой зональностью от теннантита-(Zn) до тетраэдрита-(Zn) (обр. N-2204/124.8).

Рис. А – Михеевское месторождение; Б–Д – Западное рудопроявление; Е–3 – Новониколаевское месторождение. Изображения в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 4. Arsenopyrite and fahlores of the Mikheevsky ore cluster: А – tetrahedrite-(Fe) overgrows long-prismatic arsenopyrite and fills fractures in it in assemblage with native gold; the inset shows variations in the composition of arsenopyrite along the EMPA line profile (arrow) (sample M-9/15); Б – tennantite-(Zn) with tetrahedrite-(Zn) rim overgrows pyrite and chalcopyrite (sample Z-3601/204.3); В – chemically homogeneous tennantite-(Zn) overgrows dolomite within quartz (sample Z-3601/213.8); Г – enlarged fragment of (В): inclusion of a U mineral and its ED spectrum; Д – zoned tennantite-tetrahedrite-(Zn) within quartz (sample Z-3601/213.8); Е – large chemically homogeneous tennantite-(Zn,Fe) grain (sample H-2204/117.5); Ж – chemically homogeneous tennantite-(Fe) replaces arsenopyrite within pyrite (sample H-2204/124.8); 3 – fahlore grain with striking zonation from tennantite-(Zn) to tetrahedrite-(Zn) (sample H-2204/124.8).

Figs. А – Mikheevskoe deposit; Б–Д – Zapadnoe occurrence; Е–3 – Novonikolaevskoe deposit. BSE images.

рудопроявления (рис. 3А–В, Д, Е). В сфалерите постоянно присутствуют примеси Fe (до первых массовых процентов), Cu и Cd (десятые доли массовых процентов), а содержания Mn, Hg, Se, Sn и In ниже предела обнаружения в большинстве анализов (ЭП, табл. 3).

На Михеевском месторождении сфалерит установлен в поздних кварцевых жилах и прожилках (рис. 2Б, Г, 3А). Он образует ксеноморфные выделения, размер которых варьирует от первых сотен микрометров до нескольких миллиметров. Сфалерит обрастает пирит и арсенопирит его пере-

секает и обрастает более поздний галенит (рис. 3А, Б). Почти повсеместно в сфалерите присутствует эмульсионная вкрапленность халькопирита. Сфалерит содержит примеси Fe (1.41–4.15 мас. %, преобладают значения 3–4 мас. %), Cu (до 0.52 мас. %, обычно менее 0.1 мас. %) и Cd (0.21–0.55 мас. %, чаще 0.2–0.3 мас. %). Отсутствие корреляции между Fe и Cu и низкие содержания Cu в большинстве анализов указывают на то, что захват включений халькопирита при анализе был минимальным. Самые высокие содержания Fe и Cd (рис. 5) установлены в обр М-3-1/16. Образец М-7-1/16 отличается заметно более низкими содержаниями Fe (менее 1 мас. %).

В рудах Новониколаевского месторождения сфалерит образует ксеноморфные выделения, размером от первых десятков микрометров до нескольких миллиметров. Сфалерит-1 апоскарновой стадии крупный (до 3 мм) и не содержит эмульсионной вкрапленности (обр. N-2204/117.5). Нередко сфалерит-1 содержит прожилковидные включения пирита более поздних генераций или обрастает и цементирует пирит ранних генераций. В его составе присутствуют небольшие примеси Fe (около 0.8 мас. %), Cu (до 0.2 мас. %) и Cd (примерно 0.2 мас. %). Сфалерит-2 пропилютовой стадии более мелкий (в среднем 100–200 мкм) с эмульсионной вкрапленностью халькопирита. В его составе присутствует Fe (0.35–0.88 мас. %), Cu (до 0.26 мас. %) и Cd (0.3–0.4 мас. %). Блѣклая руда и галенит обрастают сфалерит обеих генераций и выполняют в нем трещины (рис. 3В).

На Западном рудопроявлении сфалерит присутствует в виде крупных (до первых миллиметров) изометричных ксеноморфных выделений среди халькопирит-пиритовых агрегатов (рис. 2М), а также образует мелкие (порядка 100 мкм) ксеноморфные выделения, которые совместно с блѣклой рудой и галенитом нарастают на халькопирит и пирит (рис. 3Д). Иногда наблюдаются срастания сфалерита, халькопирита и пирита с баритом (рис. 3Е). В сфалерите постоянно присутствуют примеси Fe (0.17–0.62 мас. %), Cu (до 0.58 мас. %) и Cd (0.42–0.70 мас. %) (рис. 5), в отдельных анализах установлен In (до 0.09 мас. %). Содержания элементов-примесей в пределах зерен практически не варьируют.

Блѣклые руды. На Михеевском месторождении блѣклые руды встречаются в прожилково-вкрапленных порфириновых рудах и в полиметаллических жилах. В последних они распространены широко и образуют крупные, до нескольких сантиметров,

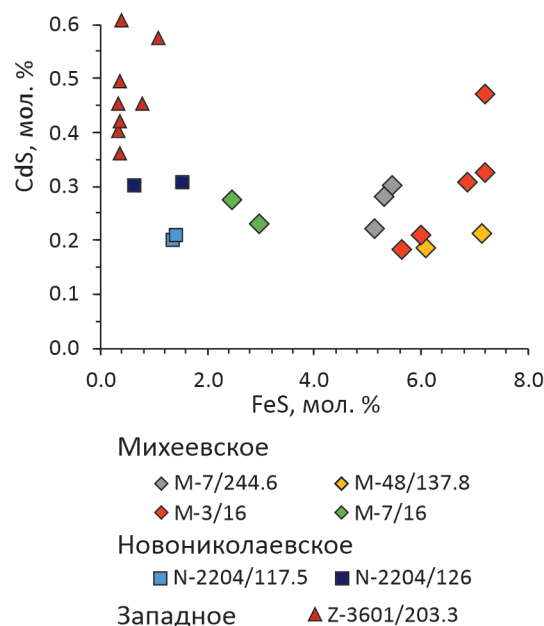


Рис. 5. Диаграмма FeS–CdS (мол. %) для сфалерита Михеевского рудного узла.

Fig. 5. FeS vs CdS plot (mol. %) for sphalerite of the Mikheevsky ore cluster.

гнезда в жильном кварце (рис. 2В, 4А). Их ассоциации и химический состав охарактеризованы в (Плотинская, Ковальчук, 2022) и подробнее обсуждаются ниже.

Блѣклые руды на Западном рудопроявлении совместно с халькопиритом, галенитом и сфалеритом обрастают пирит (рис. 3Д, 4Б) или образуют изолированные выделения среди кварца и карбонатов (рис. 4В, Д). По составу (ЭП, табл. 4) они варьируют от теннантита-(Zn) до тетраэдрита-(Zn), причем встречаются как химически однородные выделения, так и зональные (рис. 4Б–Д). Зональность, чаще всего, выражена в развитии каймы тетраэдрита по теннантиту (рис. 4Б). Однако встречается и более сложное строение со снижением содержания тетраэдритового минала от центра к периферии зерна, а затем его рост во внешней кайме (рис. 4Д).

Блѣклые руды на Новониколаевском месторождении образуют ксеноморфные выделения, размер которых достигает 0.5 мм, но обычно варьирует от десятков до сотен микрометров (рис. 4Е, 3). Блѣклые руды совместно с халькопиритом обрастают пирит, сфалерит и арсенопирит (рис. 3Г). По составу блѣклые руды относятся, преимущественно, к теннантиту с сопоставимыми количествами Fe и Zn (рис. 4Е, 6). Теннантит-(Fe) встречается редко в участках, где блѣклая руда замещает и корродирует арсенопирит (рис. 4Ж, 5). В теннантите при-

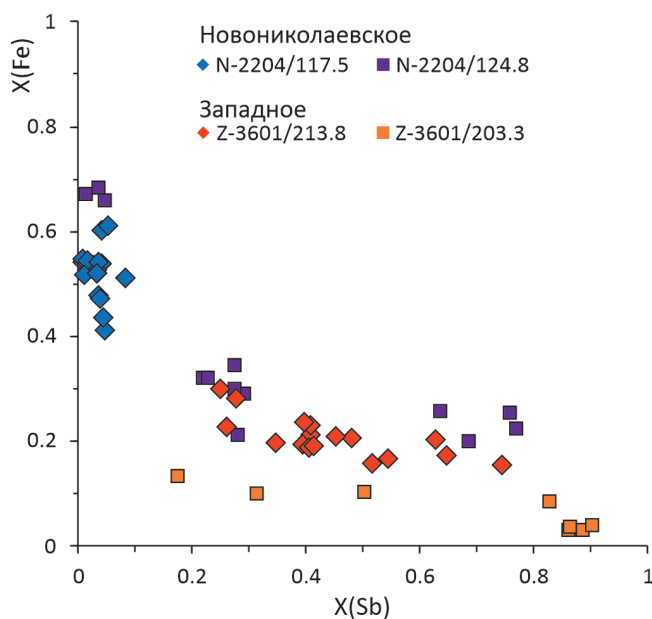


Рис. 6. Диаграмма X(Sb)–X(Fe) для блёклых руд Новониколаевского месторождения и Западного рудопоявления.

$$X(\text{Sb}) = \text{Sb}/(\text{Sb} + \text{As}), X(\text{Fe}) = \text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Zn} + \text{Cd}).$$

Fig. 6. X(Sb) vs X(Fe) plot for fahlore of the Novonikolaevskoe deposit and Zapadnoe occurrence.

$$X(\text{Sb}) = \text{Sb}/(\text{Sb} + \text{As}), X(\text{Fe}) = \text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Zn} + \text{Cd}).$$

существуют невысокие примеси Bi (до 2 мас. %), Ag (до 0.83 мас. %), Cd (до 0.23 мас. %), Pb (до 0.13 мас. %). Тетраэдрит образует каймы вокруг теннантита или отдельные мелкие выделения. В тетраэдрите установлены примеси Bi (от 1.88 до 2.65 мас. %), Ag (от 0.72 до 1.06 мас. %) и Pb (до 0.12 мас. %). Для большинства изученных минералов группы блёклых руд Новониколаевского месторождения не характерно сложное зональное строение. Они либо химически однородны, либо обладают плавной зональностью, обусловленной небольшими вариациями содержаний Sb (рис. 4Е, Ж). Мелкие выделения с выраженной химической неоднородностью встречаются редко, они представлены тетраэдритом-(Zn) с реликтами теннантита-(Zn) (рис. 4З).

Редкие минералы Михеевского рудного узла. В изученных полиметаллических рудах установлен широкий набор минералов Au, Ag, Te, Bi, W, Sn и др. Как правило, эти минералы образуют изометричные включения в пирите, реже в арсенопирите или блёклой руде, или совместно с галенитом и блёклой рудой выполняют трещины в пирите или арсенопирите (рис. 7). Размер выделений обычно не превышает несколько микрон, и это неред-

ко затрудняет их точную диагностику. Редкие минералы в полиметаллических жилах Михеевского месторождения (рис. 7А) были охарактеризованы ранее (Plotinskaya et al., 2018).

В рудах Западного рудопоявления в изученных образцах из редких минералов установлено только единичное субмикронное включение урансодержащего минерала (рис. 4В, Г), которое не удалось идентифицировать из-за слишком малого размера.

В рудах Новониколаевского месторождения в составе минерализации пропилитовой стадии установлены самородное золото, теллуриды, минералы висмута, олова, вольфрама и др.

Самородное золото обнаружено в двух образцах из Новониколаевского месторождения. Оно образует ксеноморфные выделения, которые выполняют поры и трещины в пирите и арсенопирите (рис. 7Б, В) или изометричные округлые выделения среди кварца в сростании с галенитом, блёклой рудой и сфалеритом (рис. 7Г). Размер выделений самородного золота обычно не превышает первые микронметры, но иногда достигает первых десятков микронметров (рис. 7Б, Г). По данным РСМА (ЭП, табл. 5), в составе самородного золота присутствуют Ag (14.8–16.9 мас. %), Cu (0.36 мас. %), Fe (0.15–0.42 мас. %), однако Cu и Fe, скорее всего, были захвачены из матрицы. Пробность самородного золота варьирует незначительно: от 837 до 870‰ (ЭП, табл. 5).

Помимо самородного золота, из минералов благородных металлов, на границе пирита и хлорита установлено микроскопическое зерно (рис. 7Д), в составе которого при помощи ЭДС определены Ag и Te. Вероятнее всего, минерал является гесситом, но нельзя исключать штютцит или эмпрессит.

Теллуриды, помимо фазы Ag–Te, представлены колорадитом HgTe, который образует линзовидное включение в пирите (рис. 7Е) и теллуридами Bi (ЭП, табл. 6). Последние установлены в двух образцах Новониколаевского месторождения (рис. 7Ж, З). Теллуровисмутит Bi_2Te_3 обрастает пирит и выполняет в нем субмикронные трещины; максимальный размер выделений достигает 30 мкм (рис. 7Ж). В пирите обнаружено включение размером менее 4 мкм (рис. 7З) с сопоставимыми количествами Bi и Te, которое может относиться к цумоиту BiTe или тетрадимиту $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$.

Из минералов Bi установлен также айкинит CuPbBiS_3 , который образует выделения размером до первых десятков микронметров в сростании с га-

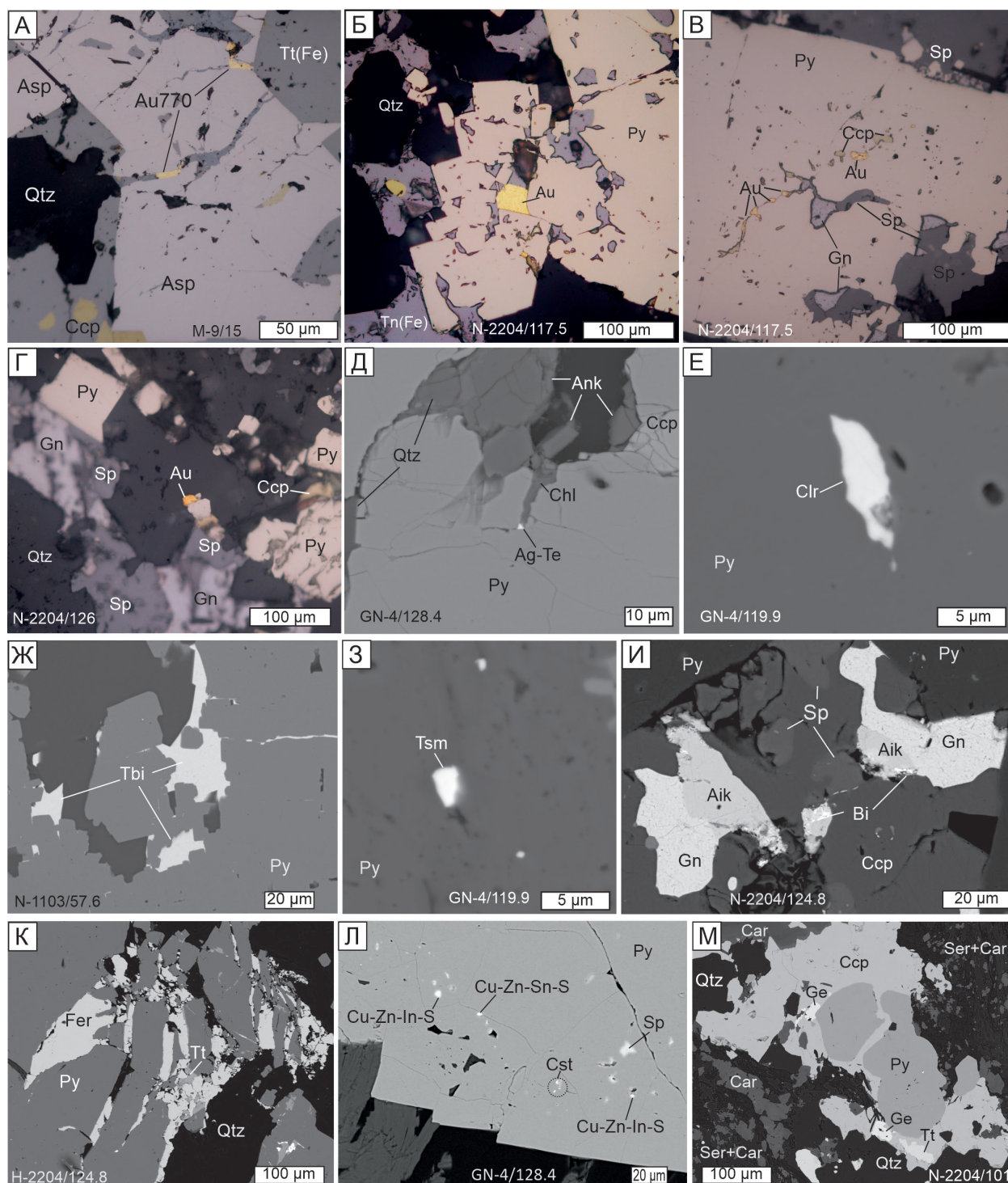


Рис. 7. Редкие минералы полиметаллической минерализации Михеевского рудного узла: А – самородное золото (Au) с тетраэдритом-(Fe) выполняет трещины в арсенопирите, обр. М-9/15; Б – самородное золото с теннантитом-(Fe) выполняет прожилки и поры в пирите, обр. N-2204/117.5; В – включения самородного золота и халькопирита в пирите, обр. N-2204/117.5; Г – самородное золото на границе кварца и пирита, обр. N-2204/126; Д – теллурид Ag (Ag-Te) на границе хлорита и пирита, обр. GN-4/128.4; Е – колорадоит (Clr) среди пирита, обр. GN-4/119.9; Ж – теллуровисмутит (Tbs) нарастает на пирит, обр. 11/03; З – цумоит (Tsm) среди пирита, обр. GN-4/2; И – айкинит (Aik) с выделениями самородного висмута (Bi) в сростании с галенитом, сфалеритом и халькопиритом, обр. N-2204/124.8; К – прожилки ферберита (Fer) в пирите, обр. N-2204/124.8; Л – включения касситерита (Cst) и неуставленных минералов Sn (Cu-Zn-Sn-S) и In (Cu-Zn-In-S) в пирите, обр. GN-4/128.4; М – герсдорфит (Ge) с халькопиритом обрастают пирит, обр. N-2204/101.

Рис. А – Михеевское месторождение, остальные – Новониколаевское месторождение; А–Г – отраженный свет; Д–М – изображения в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 7. Rare minerals of base metal mineralization of the Mikheevsky ore cluster: А – native gold (Au) with tetrahedrite-(Fe) fills fractures in arsenopyrite, sample M-9/15; Б – native gold with tennantite-(Fe) fills veinlets and pores in pyrite, sample N-2204/117.5; В – native gold and chalcopyrite inclusions in pyrite, sample N-2204/117.5; Г – native gold at the boundary of quartz and pyrite, sample N-2204/126; Д – Ag telluride (Ag-Te) at the boundary of chlorite and pyrite, sample GN-4/128.4; Е – coloradoite (Clr) among pyrite, sample GN-4/119.9; Ж – tellurobismuthite (Tbs) overgrows pyrite, sample 11/03; З – tsumoite (Tsm) within pyrite, sample GN-4/2; И – aikinite (Aik) with native bismuth (Bi) grains intergrown with galena, sphalerite and chalcopyrite, sample H-2204/124.8; К – ferberite (Fer) veinlets in pyrite, sample H-2204/124.8; Л – inclusions of cassiterite (Cst) and unidentified Sn (Cu-Zn-Sn-S) and In (Cu-Zn-In-S) minerals in pyrite, sample GN-4/128.4; М – gersdorffite (Ge) with chalcopyrite overgrows pyrite, sample H-2204/101.

Figs. А – Mikheevskoe deposit; other – Novonikolaevskoe deposits; А–Г – reflected light, Д–М – BSE images.

ленимом, сфалеритом и халькопиритом (рис. 7И). В его составе присутствуют (мас. %): Cu – 11.0, Ag – 0.2, Fe – 0.8, Pb – 33.9, Bi – 36.1, As – 0.74 и S – 15.5 (ЭП, табл. 6). На границах айкинита и галенита встречаются субмикроскопические выделения самородного висмута (рис. 7И).

Ферберит FeWO_4 обнаружен в образце из северной части месторождения, где он выполняет прожилки и просечки в пирите (рис. 7К). В его составе присутствует 0.55–0.75 мас. % MnO (ЭП, табл. 7).

Минералы Sn и In образуют субмикроскопические включения в пирите из южной части месторождения (рис. 7Л). Они представлены касситеритом и сульфидами Sn и In, которые невозможно идентифицировать из-за малых размеров. В их составе присутствует от 2 до 15 мас. % In и до 14.5 мас. % Sn, а также 6.6–17.8 мас.% Cu и 8.6–31.5 мас. % Zn, а также значительные количества Fe и S, которые, вероятно, частично захвачены из пирита (ЭП, табл. 8, 9). Наиболее вероятно, это сакураит $(\text{Cu,Zn,Fe,Ag})_3(\text{In,Sn})\text{S}_4$ или петрукит $(\text{Cu,Ag})_2(\text{Fe,Zn})(\text{Sn,In})\text{S}_4$.

В зонах развития полиметаллической минерализации в пропилитах Новониколаевского месторождения иногда присутствует герсдорфит NiAsS . Он обычно образует ксеноморфные выделения размером в первые десятки микрометров в сростании с блёклой рудой (рис. 7М) или халькопиритом. Герсдорфит содержит значительные примеси Fe (0.7–9.3 мас. %) и Co (0.3–4.6 мас. %), а также небольшие количества Cu (до 0.4 мас. %), Se (до 0.56 мас. %) и Pb (до 1.8 мас. %) (ЭП, табл. 10). От минералов ряда кобальтин-герсдорфит, описанных ранее на Михеевском месторождении (Плотинская, Ковальчук, 2025), он отличается преобладанием герсдорфитового минала, постоянной величиной As/S и более заметными содержаниями Fe (рис. 8).

Хлорит установлен в субэпитермальных полиметаллических жилах Михеевского месторождения, а также в апоскарновых и пропиловых ассоциациях Новониколаевского месторождения. На Западном рудопроявлении в образцах с полиметаллической минерализацией хлорит отсутствует. Хлорит из полиметаллических прожилков глубоких горизонтов Михеевского месторождения (обр. М1554/729.8) по составу близок к Fe-амезиту. Хлориты из пропилов Новониколаевского месторождения близки к нему по составу. Хлориты из крупных жил с верхних горизонтов Михеевского месторождения (обр. М-6/16 и М-7/16) отвечают промежуточным члена ряда клинхлор–дафнит (рис. 9А, ЭП, табл. 11).

ОБСУЖДЕНИЕ

Типоморфизм основных рудных минералов

Пирит и арсенопирит из полиметаллической минерализации Михеевского и Новониколаевского месторождений на данном уровне изученности (РСМА) характеризуются сходным химическим составом. Для пирита из обоих месторождений характерны небольшие примеси Ni и заметные количества As. Арсенопирит характеризуется близкими значениями отношения As/S. Единственное важное отличие – каймы с повышенным содержанием Sb, характерные для арсенопирита Михеевского месторождения в участках интенсивного развития блёклых руд (рис. 4А). Можно предположить, что каймы дорастали в процессе образования блёклых руд из флюида с более высокой активностью Sb.

Сфалерит из разных объектов МРУ отличается по содержанию основных элементов-примесей – Fe и Cd (рис. 5). Наиболее высокие содержания FeS (до 7.2 мол. %) характерны для Михеевского месторождения, более низкие (1.0–1.5 мол. %) – для

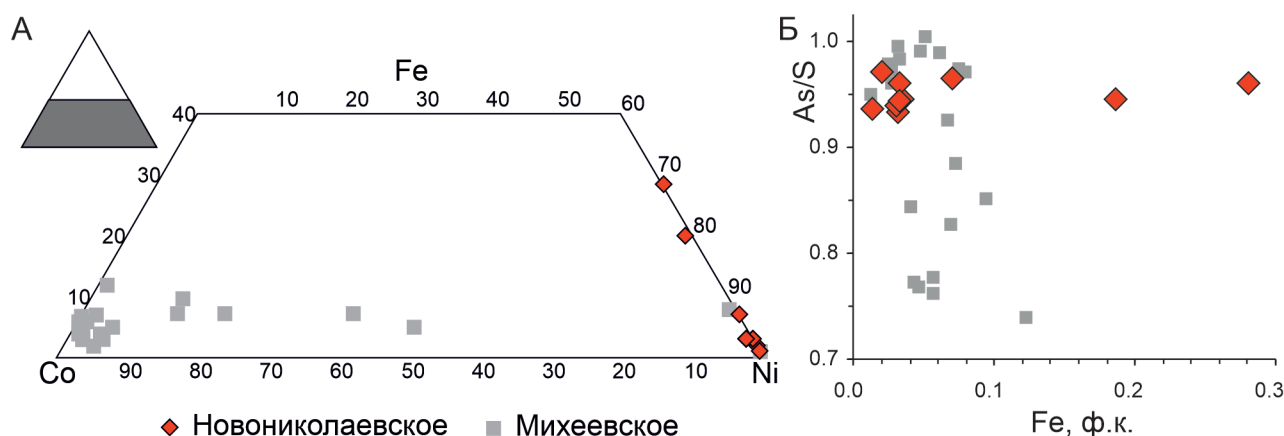


Рис. 8. Диаграммы Co–Ni–Fe (А) и As/S–Fe (Б) для минералов ряда кобальтин–герсдорфит из месторождений Михеевского рудного узла.

Fig. 8. Co–Ni–Fe (A) and As/S–Fe (B) plots for minerals of the cobaltite–gersdorffite series from deposits of the Mikheevsky ore cluster.

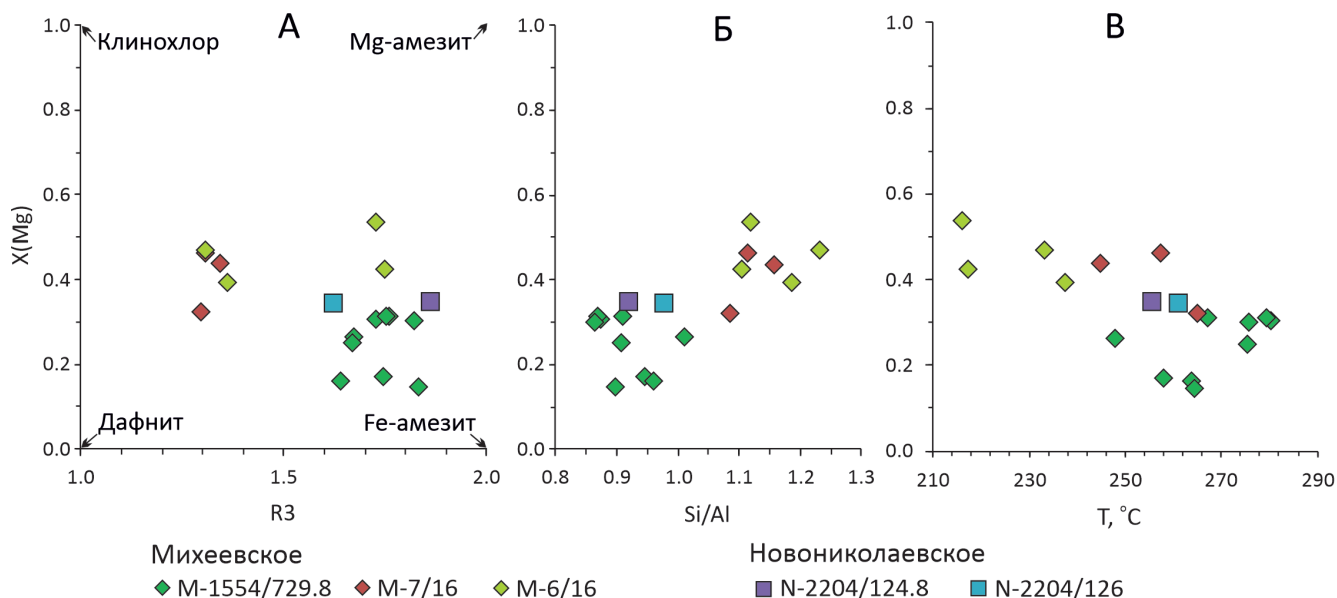


Рис. 9. Химический состав хлорита из Михеевского и Новониколаевского месторождений.

[R³⁺] – сумма трехвалентных катионов в октаэдрической позиции. Номенклатура хлоритов по (Bailey, 1988), температура рассчитана по (Котельников и др., 2012).

Fig. 9. Chemical composition of chlorite from the Mikheevskoe and Novonikolaevskoe deposits.

[R³⁺] is the sum of trivalent cations in octahedral site. The nomenclature of chlorite is after (Bailey, 1988); the temperature is calculated after (Kotelnikov et al., 2012).

Новониколаевского месторождения и самые низкие (0.3–0.4 мол. %) – для Западного рудопоявления. Основными причинами концентрирования Fe в сфалерите являются увеличение температуры и снижение фугитивности S₂ во флюиде (Czamanske, 1974; Scott, Barnes, 1971), эти параметры будут подробнее обсуждаться ниже. В то же время, в сфалерите Западного рудопоявления отмечены самые высокие количества CdS (0.36–0.60 мол. %), тогда

как в сфалерите Новониколаевского и Михеевского месторождений преобладают концентрации около 0.2–0.3 мол. % CdS. Известно, что содержание CdS в сфалерите прямо зависит от отношения Cd/Zn во флюиде. При постоянном Cd/Zn во флюиде повышенным содержаниям CdS способствуют повышенное давление и более низкие температура и содержание хлоридов во флюиде (Базаркина и др., 2010). Поскольку Западное рудопоявление и Ново-

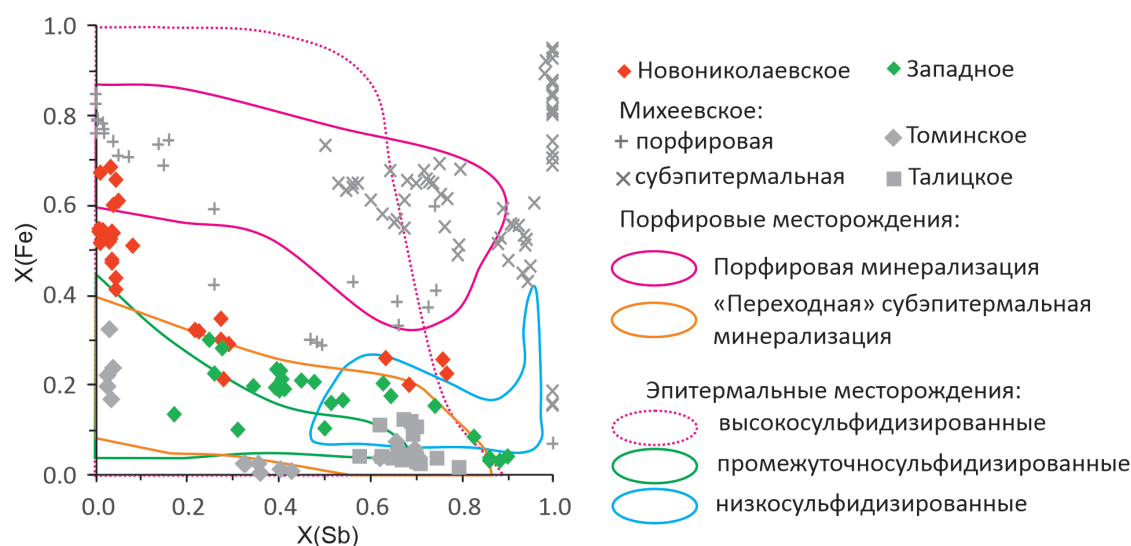


Рис. 10. Сравнение химического состава блёклых руд из месторождений Михеевского рудного узла, порфирировых месторождений Урала по (Плотинская, Ковальчук, 2022) и Cu(Mo)-порфирировых месторождений других регионов по (Marushchenko et al., 2018 и цитируемая литература).

$$X(\text{Sb}) = \text{Sb} / (\text{Sb} + \text{As}), X(\text{Fe}) = \text{Fe} / (\text{Fe} + \text{Zn} + \text{Cd}).$$

Fig. 10. Chemical composition of fahlores from deposits of the Mikheevsky ore cluster and porphyry deposits of the Urals after (Plotinskaya, Kovalchuk, 2022) and Cu(Mo)-porphyry deposits worldwide after (Marushchenko et al., 2018 references therein).

$$X(\text{Sb}) = \text{Sb}/(\text{Sb} + \text{As}), X(\text{Fe}) = \text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Zn} + \text{Cd}).$$

новоиколаевское месторождение приурочены к одному крылу грабен-синклинали (рис. 1), нет оснований предполагать на них заметную разницу в давлении. Более низкие содержания хлоридов (и, в целом, более разбавленный флюид) в сочетании с более низкой температурой являются более вероятными факторами концентрирования Cd в сфалерите, которые, однако, требуют дальнейших исследований.

Минералы группы блёклых руд Новониколаевского месторождения и Западного рудопроявления, в целом, характеризуются сходным химическим составом – и те, и другие относятся, преимущественно, к теннантит-тетраэдриту-(Zn). Однако на Новониколаевском месторождении развит также теннантит-(Fe,Zn), а на Западном рудопроявлении отмечаются более высокие содержания тетраэдритового минала (рис. 10). На Михеевском месторождении блёклые руды установлены в прожилково-вкрапленной (порфировой) минерализации и в поздних полиметаллических жилах, секущих минерализацию порфирирового типа (Плотинская, Ковальчук, 2022). Первые по составу варьируют от теннантита до тетраэдрита с сопоставимыми количествами Fe и Zn, а вторые отвечают тетраэдриту-(Fe). Также установлены редкие мелкие выделения блёклых руд, которые представлены минералами фрей-

бергитовой серии (преобладает аргентотетраэдрит-(Fe). Таким образом, блёклые руды Михеевского месторождения отличаются от таковых Новониколаевского месторождения и Западного рудопроявления более высокими содержаниями Fe (рис. 10). Это, по-видимому, вызвано более высоким содержанием Fe во флюиде Михеевской гидротермальной системы за счет широкого развития на месторождении вмещающих пород основного состава (рис. 1). Для большинства выделений блёклых руд МРУ не характерно сложное зональное строение – они либо химически однородны, либо обладают слабо выраженной плавной зональностью, либо состоят из однородного ядра теннантитового или теннантит-тетраэдритового состава и тетраэдритовой каймы. Это свидетельствует об относительно спокойной обстановке минералообразования без резких колебаний физико-химических параметров рудообразующего флюида, что, в целом, характерно для средних или глубинных уровней порфирировых систем.

Сравнение с литературными данными (Marushchenko et al., 2018 и цитируемая литература) показывает, что блёклые руды Новониколаевского месторождений и Западного рудопроявления по составу близки к таковым из «переходной» субэпи-

термальной минерализации. За счет более высоких содержаний Fe блёклые руды Михеевского месторождения близки к блёклым рудам, характерным для минерализации порфирового типа (рис. 10). Слишком широкие вариации Fe–Zn и Sb–As в блёклых рудах ПЭРС не позволяют использовать эти минералы как однозначный индикатор типа минерализации ПЭРС. Исключение составляют блёклые руды фрейбергитовой серии, которые характерны исключительно для низкосульфидизированного, реже для промежуточно-сульфидизированного типа минерализации и которые были установлены в жилах Михеевского месторождения (Плотинская, Ковальчук, 2022).

Минералогия благородных металлов на порфировых месторождениях, как правило, однообразна и обычно ограничивается высокопробным самородным золотом (Kesler et al., 2002). Наиболее разнообразный набор минералов благородных металлов встречается в эпитермальных рудах, или, в случае глубокого эрозионного среза, в субэпитермальных жилах, секущих минерализацию порфирового типа. Так, разнообразные минералы Вi установлены в рудах Мо-порфирового месторождения Бугдая (Коваленкер и др., 2011), а теллуриды и сульфотеллуриды Ag и Вi отмечены в субэпитермальных жилах Биргильдинского медно-порфирового месторождения (Плотинская и др., 2025), а также месторождений Ак-Суг (Шадчин и др., 2024), Кызык-Чадр (Кужугет и др., 2026), Малмыж (Буханова, 2021) и Баимской рудной зоны (Николаев и др., 2016).

В частности, для Михеевского медно-порфирового месторождения показано, что значительная доля Au, Ag и ЭПГ связана именно с поздней золото-полиметаллической стадией (Plotinskaya et al., 2018). Для полиметаллических жил Михеевского месторождения характерен широкий размах пробности самородного золота: от 372–522‰ в ассоциации со сфалеритом до 767–916‰ в ассоциации с блёклой рудой, причем указанные разбросы могут быть установлены даже в одном образце (Plotinskaya et al., 2018). Для самородного золота из пропилитов Новониколаевского месторождения характерен гораздо более узкий интервал пробности (837–870‰), что указывает на более постоянные РТ-условия при образовании полиметаллической минерализации в пропилитах. Также в рудах Михеевского установлен более широкий набор теллуридов: теллуриды и дителлуриды Au–Ag, теллуриды Hg, Bi, Pb, Ni, Pd, теллуриды и сульфотеллуриды Bi, а в поздней ар-

гиллизитовой стадии также селениды Au–Ag, Ag и Pb (Plotinskaya et al., 2018).

Неустановленный минерал урана найден в рудах Западного рудопоявления, однако в рудах Михеевского месторождения в поздних ассоциациях описаны различные гидросиликаты урана (Азовскова и др., 2018). В целом, минералы урана на порфировых месторождениях чрезвычайно редки (Singer et al., 2008). В скарновых объектах ПЭРС минералогия урана обычно более разнообразна. Уранинит и ураноторит описаны в рудах Быстринского скраново-порфирового месторождения, как в порфировых рудах, так и в магнезиальных скарнах (Киселёва и др., 2026), уранинит отмечен также в скарновых рудах Гумёшевского месторождения (Азовскова и др., 2018).

Минералы Ni в ПЭРС встречаются почти также редко, как и урана (Singer et al., 2008). Они установлены только на тех объектах, где в разрезе присутствуют основные или ультраосновные породы (Плотинская, Ковальчук, 2025 и цитируемая литература) и месторождения Михеевского рудного узла подтверждают эту закономерность.

Минералы Sn и In (касситерит и неопределяемые сульфосоли Sn и In) и W (ферберит) установлены только в рудах Новониколаевского скраново-порфирового месторождения, несмотря на то, что Михеевское месторождение изучено более детально. Этот факт хорошо согласуется с тем, что промышленные концентрации Sn, In и W нередко сосредоточены именно на месторождениях скранового типа, более того, последние являются одним из главных источников Sn и W. Чаще всего, Sn и W образуют собственные минералы на ретроградной скрановой стадии в условиях понижения температуры (Einaudi et al., 1981) либо в секущих скарны кварц-сульфидных прожилках и грейзенах (Monnier et al., 2019; Zhao et al., 2023). Главным минералом W обычно является шеелит, существенно реже встречаются ферберит или гюбнерит, а Sn – касситерит (Kwak, 1987, Meinert et al., 2005, Tian et al., 2026), хотя иногда отмечаются станнин и различные сульфосоли Sn (Chen et al., 2022). Индий в скарновых рудах обычно встречается в виде примесей (до 100 г/т) в сфалерите (Cook et al., 2009), но крайне редко образует собственные минералы, например, рокезит (Bauer et al., 2019).

Хлориты из всех изученных типов минерализации обладают довольно однородным составом (рис. 9). Несколько отличаются только хлориты из субэпитермальных жил с верхних горизонтов Ми-

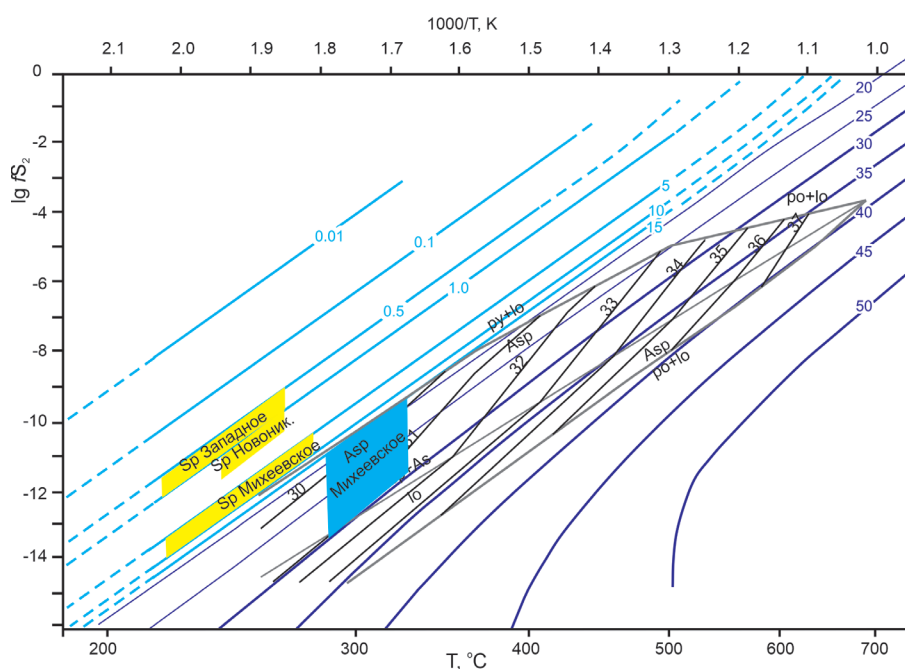


Рис. 11. Диаграмма fS_2 – T для минеральных ассоциаций полиметаллической минерализации Михеевского рудного узла.

Линии: черные – изолинии содержаний As (ат. %) по (Kretschmar, Scott, 1976), синие – содержания FeS в сфалерите в равновесии с пирротинитом, голубые – в равновесии с пиритом по (Czamanske, 1974; Scott, Barnes, 1971).

Fig. 11. fS_2 – T plot for mineral assemblages of base metal mineralization of the Mikheevsky ore cluster.

Lines: black – As content (at. %) after (Kretschmar, Scott, 1976), blue – FeS content of sphalerite in equilibrium with pyrrhotite, light blue – in equilibrium with pyrite after (Czamanske, 1974; Scott, Barnes, 1971), respectively.

хеевского месторождения, которые относятся к ряду клинохлор-дафнит (рис. 9А) и характеризуются более высоким отношением Si/Al (рис. 9Б) и более низкими температурами формирования (рис. 9В). Ранее такие особенности состава были отмечены в хлоритах Михеевского месторождения, ассоциирующих с поздней золото-теллуридной минерализацией (Plotinskaya et al., 2018).

Условия образования полиметаллической минерализации

Температуры гомогенизации флюидных включений в кварце субэпитермальных жил Михеевского месторождения составляют 290–320 °C (Plotinskaya et al., 2018). Такие температуры в сочетании с широким развитием в жилах арсенопирита с содержанием As около 29–31 ат. % (ЭП, табл. 2) указывают на fS_2 примерно от –13 до –9 (рис. 11). (Kretschmar, Scott, 1976). На фоне снижения температуры до 280–220 °C (интервал температур, полученный для хлорита) низкая фугитивность серы, по-видимому, сохранялась на протяжении всего времени формирования жил. Это отразилось в фор-

мировании сфалерита с относительно высокими FeS (5–7 мол. %) (рис. 11). Исключение составляет только сфалерит из обр. М-7/16, содержащий 2.5–3.0 мол. % FeS. В этом образце отсутствует арсенопирит, но широко развит пирит.

На Новониколаевском месторождении сфалерит из апоскарновой и пропиловитовой минерализации формировался в области устойчивости пирита, что отразилось в более низких содержаниях FeS (около 1 мол. %). Данные о температурах формирования ограничены данными по хлориту из двух образцов с пропиловитовой минерализацией: 255–260 °C. Эти температуры близки таковым для жил Михеевского месторождения и подтверждают предположение о несколько более высокой фугитивности серы на Новониколаевском (рис. 11). Можно предположить, что полиметаллическая минерализация Западного рудопоявления формировалась при близких температурах, а более низкие содержания FeS сфалерите указывают на еще более высокую fS_2 . Однако повышенные количества CdS в сфалерите Западного рудопоявления могут свидетельствовать о более низкой температуре формирования сфалерита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полиметаллическая минерализация Михеевского рудного узла (Южный Урал) отличается по геологическому положению и сопровождающим ее метасоматитам. На Михеевском Си-порфировом месторождении золото-полиметаллическая минерализация присутствует в виде крупных субэпитермальных жил с пиритом, арсенопиритом, блёклой рудой, сфалеритом, галенитом и самородным золотом, которые сопровождаются парагонитсодержащими метасоматитами. На Новониколаевском Си-скарново-порфировом месторождении галенит-1 и сфалерит-1 присутствуют в массивных сульфидных рудах апоскарновой стадии, а галенит-2, сфалерит-2, блёклая руда и самородное золото приурочены к пропилитам. На Си-порфировом рудопроявлении Западное минералы полиметаллов представлены блёклой рудой, галенитом и сфалеритом, они ассоциируют с пиритом и сопровождаются кварц-серицит-карбонатными метасоматитами.

Для сфалерита из жил Михеевского месторождения характерны наиболее высокие содержания FeS (до 7.2 мол. %) и самые низкие – CdS (0.2–0.3 мол. %), сфалерит Новониколаевского месторождения содержит 1.0–1.5 мол.% FeS, а для сфалерита Западного рудопроявления характерны самые низкие концентрации FeS (0.3–0.4 мол. %) и высокие – CdS (0.36–0.60 мол. %). Минералы группы блёклых руд также заметно отличаются. В субэпитермальных жилах Михеевского месторождения это ранние теннантит-тетраэдрит-(Fe) и поздний фрейбергит-(Fe), тогда как в пропилитах и кварц-карбонат-серицитовых метасоматитах Новониколаевского месторождения и Западного рудопроявления наблюдается постепенная эволюция от теннантита-(Fe) к тетраэдриту-(Zn). Самородное золото из субэпитермальных жил имеет широкий интервал пробности от 372 до 916‰, тогда как самородное золото из пропилитов Новониколаевского месторождения характеризуется постоянным составом с пробностью 837–870‰. Полиметаллические ассоциации Новониколаевского месторождения содержат теллуриды Ag, Hg, Bi, а также минералы W, In, Sn, которые не установлены в субэпитермальных жилах Михеевского. В пропилитах Михеевского месторождения в ассоциации с борнитом и халькопиритом установлен более широкий набор теллуридов Au-Ag, Hg, Bi, Pb, Ni, Pd и других элементов.

Таким образом, несмотря на сходный набор рудных минералов и близкие температуры минералообразования, выявленные типы полиметаллической минерализации Михеевского рудного узла отличаются по типохимизму основных рудных минералов и по набору редких минералов.

ЛИТЕРАТУРА

- Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Байрамгалина Л.Н., Гемель В.А. (2022) Урановая и ториевая минерализация в рудах Михеевского медно-порфирового месторождения, Южный Урал. *Металлогения древних и современных океанов-2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений*. Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 114–117.
- Азовскова О.Б., Ровнушкин М.Ю., Мошев С.И., Байрамгалина Л.Н. (2018) Висмутовая и урановая минерализация на глубоких горизонтах Гумешевского месторождения, Средний Урал. *XII Межрегиональная конференция «Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий»*. Уфа, ИГ УФИЦ РАН, 218–220.
- Базаркина Е.Ф., Зотов А.В., Акинфиев Н.Н. (2010) Устойчивость хлоридных комплексов кадмия в зависимости от давления: потенциометрические измерения при 1–1000 бар и 25 °С. *Геология рудных месторождений*, 52(2), 186–197.
- Белгородский Е.А., Черкашов С.А., Грабежев А.И., Шаргородский Б.М. (1991) Медно-порфировый Новониколаевский рудный узел. Свердловск, УрО АН СССР, 54 с.
- Бурмистров А.А., Хребтневский В.В., Ерастов Е.А. (2023) Предварительные исследования закономерностей связи петрофизических свойств с типами и интенсивностью метасоматических изменений вмещающих пород и руд Новониколаевского участка Михеевского медно-порфирового месторождения (Южный Урал). *Недропользование XXI век*, 3–4(100), 42–51.
- Буханова Д.С. (2021) Минералого-геохимические особенности Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения, Хабаровский Край. Дисс. на соиск. степ. канд. геол.-мин. наук. Владивосток, ДВГИ ДВО РАН, 200 с.
- Гирфанов М.М., Сергеева Н.Е., Шишаков В.Б. (1991) Рудно-метасоматическая зональность Михеевского медно-порфирового месторождения на Южном Урале. *Вестник МГУ*, 5, 75–79.
- Горбунов А.А., Аликин О.В., Захарова А.А., Гусева Т.А., Рудашевский В.Н., Гемель В.А. (2019) Особенности минералогии руд Михеевского месторождения, Новониколаевского и Западного участков (Южный Урал). *Уральская минералогическая школа-2019*. Екатеринбург, УГТУ, 41–44.

- Грабежев А.И. (2014) Новониколаевский (Мо, Au)-Cu-порфировый рудный узел (Южный Урал): петрогеохимия рудоносных гранитоидов и метасоматитов. *Литосфера*, 2, 60–76.
- Грабежев А.И., Белгородский Е.А. (1992) Продуктивные гранитоиды и метасоматиты медно-порфировых месторождений (на примере Урала). Екатеринбург, УрО РАН, 199 с.
- Грабежев А.И., Ронкин Ю.Л. (2011) U-Pb возраст цирконов из рудоносных гранитоидов медно-порфировых месторождений Южного Урала. *Литосфера*, 3, 104–116.
- Жариков В.А., Русинов В.Л., Маракушев А.А., Зарайский Г.П., Омеляненко Б.И., Перцев Н.Н., Расс И.Т., Андреева О.В., Абрамов С.С., Подлесский К.В. (1998) Метасоматизм и метасоматические породы. М., Научный мир, 492 с.
- Киселева Г.Д., Коваленкер В.А., Борисовский С.Е., Языкова Ю.И., Трубкин Н.В. (2026) U-Th-REE минерализация Быстринского скарново-порфирового Au-Cu-Fe месторождения (Восточное Забайкалье): типоморфные характеристики, особенности формирования и генетические импликации. *Геология рудных месторождений*, 68(3), 259–276. <https://doi.org/10.7868/S3034507326030022>
- Коваленкер В.А. (2006) Условия формирования и факторы крупномасштабного концентрирования золота порфировых и эпitherмальных месторождений / Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых, т. 2. М., ИГЕМ РАН, 143–214.
- Коваленкер В.А., Киселева Г.Д., Крылова Т.Л., Андреева О.В. (2011) Минералогия и условия формирования руд золотоносного W-Mo-порфирового Бугдаинского месторождения (Восточное Забайкалье, Россия). *Геология рудных месторождений*, 53, 107–142.
- Котельников А.Р., Сук Н.И., Котельникова З.А., Щекина Т.И., Калинин Г.М. (2012) Минеральные геотермометры для низкотемпературных парагенезисов. *Вестник ОНЗ РАН*, 4. https://doi.org/10.2205/2012NZ_ASEMPG
- Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Лосев В.И., Калинин Ю.А., Шавекина А.Ш., Байыр-Оол А.В., Викентьев И.В. (2026) *Геология рудных месторождений*, 68 (3), 277–307. <https://doi.org/10.7868/S3034507326030037>
- Кузнецов А.Ж., Великанов А.Я., Арафаилов А.Е., Измайлов М.Р., Морозова Г.В., Будник Т.Л., Ентальцев Е.В., Панфиленкова О.В., Тарасова Н.Н. (2020ф) Отчет с оперативным подсчетом запасов медно-порфировых руд Новониколаевского участка (Западное и Новониколаевское рудопоявления) Михеевского месторождения по состоянию на 01.01.2020 г. на территории Каргалинского и Варненского районов Челябинской области. Екатеринбург, ООО «Геосинтез», 475 с.
- Николаев Ю.Н., Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю., Нагорная Е.В., Марущенко Л.И., Сидорина Ю.Н., Читалин А.Ф., Калько И.А. (2016) Au-Ag минерализация порфирово-эпitherмальных систем Баимской зоны (Западная Чукотка, Россия). *Геология рудных месторождений*, 58 (4), 319–345. <https://doi.org/10.1134/S107570151604005X>
- Плотинская О.Ю., Ковальчук Е.В. (2022) Блестящие руды Cu-(Mo)-порфировых месторождений Урала. *Минералогия*, 8(3), 5–22. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2022-8-3-1>
- Плотинская О.Ю., Ковальчук Е.В. (2025) Минералы Co и Ni в рудах Михеевского Cu-порфирового месторождения (Южный Урал). *Минералогия*, 11(1), 17–27. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-1-2>
- Плотинская О.Ю., Грабежев А.И., Зелтманн Р. (2015) Рений в рудах Михеевского Mo-Cu-порфирового месторождения, Южный Урал. *Геология рудных месторождений*, 57(2), 132–147. <https://doi.org/10.1134/S1075701515020051>
- Плотинская О.Ю., Азовскова О.Б., Белогуб Е.В. (2025) Теллуридная минерализация в рудах Биргильдинского медно-порфирового месторождения (Южный Урал, Россия). *Геология рудных месторождений*, 67(6), 829–843. <https://doi.org/10.7868/S3034507325060065>
- Прибавкин С.В., Сорока Е.И., Азовскова О.Б., Смолева И.В., Леонова Л.В., Готтман И.А., Сустанов С.Г., Ровнушкин М.Ю. (2023) Ассоциация сидерита с сульфидами и силикатами железа в породах Михеевского Cu(Mo,Au)-порфирового месторождения (Южный Урал). *Геология рудных месторождений*, 65(4), 354–368. <https://doi.org/10.31857/S0016777023040044>
- Тевелев А.В., Кошелева И.А., Бурштейн Е.Ф. и др. (2018ф) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-41-XXV (Карталы). Объяснительная записка. М., Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 175 с.
- Хребтиевский В.В. (2024) О последовательности минералообразования и впервые найденных минералах олова и теллура на Новониколаевском месторождении (Южный Урал). *Металлогения древних и современных океанов-2024. Рудогенез*. Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 144–147.
- Хребтиевский В.В. (2025) Особенности распределения содержаний Cu и Au на Новониколаевском медно-порфировом месторождении (Южный Урал). *Металлогения древних и современных океанов-2025. От гипотез рудогенеза к критериям прогнозирования*. Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 104–107.
- Хребтиевский В.В. (2026) Гидротермальная зональность и генезис Новониколаевского скарново-медно-порфирового месторождения (Южный Урал). *Металлогения древних и современных океанов-2026. Стратегические элементы: минералого-геохимические и цифровые модели*. Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 125–128.
- Хребтиевский В.В., Плотинская О.Ю. (2026) Гранаты из скарнов Новониколаевского месторождения меди (Южный Урал). *Минералогия*, 12(1), 44–59. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-1-3>

- 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-порфирового 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 медно-порфировых руд на Южном Урале. *Отечественная геология*, 2, 57–61.
- Bailey S.W. (1988) Chlorites: structures and crystal chemistry / Hydrous Phyllosilicates (Exclusive of Micas). *Reviews in Mineralogy*, 19, 347–403.
- Bauer M.E., Seifert T., Burisch M., Krause J., Richter N., Gutzmer J. (2019) Indium-bearing sulfides from the Hämmerlein skarn deposit, Erzgebirge, Germany: evidence for late-stage diffusion of indium into sphalerite. *Mineralium Deposita*, 54, 175–192. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0773-1>
- Catchpole H., Kouzmanov K., Fontboté L. (2012) Copper-excess stannoidite and tennantite-tetrahedrite as proxies for hydrothermal fluid evolution in a zoned cordilleran base metal district, Morococha, Central Peru. *The Canadian Mineralogist*, 50, 719–743. <https://doi.org/10.3749/canmin.50.3.719>
- Chen S. C., Yu J. J., Bi M. F., Lehmann B. (2022) Tin-bearing minerals at the Furong tin deposit, South China: Implications for tin mineralization. *Chemie der Erde*, 82(1), 125856. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125856>
- Cook N.J., Ciobanu C.L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Saini-Eidukat B., Melcher F. (2009) Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICP-MS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 4761–4791. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045>
- Czamanske G.K. (1974) The FeS content of sphalerite along the chalcopyrite-pyrite-bornite sulfur fugacity buffer. *Economic Geology*, 69, 1328–1334. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.69.8.1328>
- Donahue K.M. (2002) Geochemistry, geology and geochronology of the Victorio mining district, Luna County, New Mexico: Linking skarn and porphyry systems to carbonate-hosted lead-zinc replacement deposits. MSc Thesis. Socorro, New Mexico, New Mexico Institute of Mining and Technology, 186 p.
- Einaudi M.T., Meinert L.D., Newberry R.J. (1981) Skarn deposits. *Economic Geology*, 75, 317–391. <https://doi.org/10.5382/AV75.11>
- Hedenquist J.W., Arribas A.R., Gonzalez-Urrien E. (2000) Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13, 245–277. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>
- <https://nedradv.ru/nedradv/ru/places?mineral=ea137769ab1dc8b338a79c54c3009281> (последнее обращение 28/06/2026)
- Kesler S.E., Chrysosoulis S.L., Simon G. (2002) Gold in porphyry copper deposits: Its distribution and fate. *Ore Geology Reviews*, 21, 103–124. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(02\)00084-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(02)00084-7)
- Kretschmar U., Scott S.D. (1976) Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. *The Canadian Mineralogist*, 14, 364–386.
- Kwak T.A.P. (1987) W-Sn skarn deposits and related metamorphic skarns and granitoids. Amsterdam-Oxford-New York, Elsevier, 451 p.
- Lipson R. (2014) The promise and perils of porphyry deposits in the future of gold production. *SEG Newsletter*, 98, 1–21. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2014-98.fea>
- Marushchenko L.I., Baksheev I.A., Nagornaya E.V., Chitalin A.F., Nikolaev Y.N., Vlasov E.A. (2018) Compositional evolution of the tetrahedrite solid solution in porphyry-epithermal system: A case study of the Baimka Cu-Mo-Au trend, Chukchi Peninsula, Russia. *Ore Geology Reviews*, 103, 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.018>
- Meinert L.D. (1992) Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, 19, 145–162.
- Meinert L.D., Dipple G.M., Nicolescu S. (2005) World skarn deposits. *Economic Geology*, 100, 299–336. <https://doi.org/10.5382/AV100.11>
- Monnier L., Salvi S., Melleton J., Bailly L., Béziat D., de Parseval P., Gouy S., Lach P. (2019) Multiple generations of wolframite mineralization in the Echassieres district (Massif Central, France). *Minerals*, 9(10), 637. <https://doi.org/10.3390/min9100637>
- 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>
- Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Tessalina S., Seltmann R., Groznova E.O., Abramov S.S. (2017) Porphyry deposits of the Urals: geological framework and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 85, 153–173. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.07.002>
- 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>
- Rovnushkin M.Y., Azovskova O.B. (2022) Rhenium-bearing molybdenite in the argillization zone of the Mikheevskoe molybdenum-copper-porphyry deposit (Southern Urals). *Известия Уральского государственного горного университета*, 3(67), 7–13. <http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-7-13>
- Scott C.D., Barnes H.L. (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Economic Geology*, 66, 653–669. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.4.653>
- 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. Reston, Virginia, US Geological Survey Open File Report 2008, 45 p.

Tessalina S.G., Plotinskaya O.Y. (2017) Silurian to Carboniferous Re-Os molybdenite ages of the Kalinovskoe, Mikheevskoe and Talitsa Cu-Mo porphyry deposits in the Urals: implications for geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 85, 174–180. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.005>

Tian M., Xiao Y., Shang Y., Wang M., Li L., Zhao M., Kang D. (2026) The occurrence of Sn in the Shizhuyuan W-Sn polymetallic skarn-greisen deposit: Insights into the magmatic-hydrothermal Sn mineralization process. *Ore Geology Reviews*, 188, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.107026>

Zhao H., Shao Y., Zhang Y., Cao G., Zhao L., Zheng X. (2023) Big data mining on trace element geochemistry of sphalerite. *Journal of Geochemical Exploration*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2023.107254>

REFERENCES

Azovskova O.B., Rovnushkin M.Y., Bairamgalina L.N., Gemel V.A. (2022) Uranium and thorium mineralization in ores of the Mikheevskoe porphyry copper deposit, South Urals. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2022. Ot veshchestvennogo sostava k modelyam i prognozirovaniyu mestorozhdeniy (Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2022. From Composition to Models and Forecasting Deposits)*. Miass, YuU FNTs MiG UrO RAN, 114–117. (in Russian)

Azovskova O.B., Rovnushkin M.Y., Moshev S.I., Bairamgalina L.N. (2018) Bismuth and uranium mineralization at the deep horizons of the Gumeshevskoe deposit, Central Urals. *XII Mezhhregionalnaya konferentsiya "Geologiya, poleznye iskopaemye i problemy geoekologii Bashkortostana, Urala i sopredelnykh territoriy" (XII Interregional Conference "Geology, Mineral Deposits, and Problems of Geoecology of Bashkortostan, Urals, and Adjacent Territories")*. Ufa, IG UFITS RAN, 218–220. (in Russian)

Bailey S.W. (1988) Chlorites: structures and crystal chemistry / Hydrous Phyllosilicates (Exclusive of Micas). *Reviews in Mineralogy*, 19, 347–403.

Bauer M.E., Seifert T., Burisch M., Krause J., Richter N., Gutzmer J. (2019) Indium-bearing sulfides from the Hämmerlein skarn deposit, Erzgebirge, Germany: evidence for late-stage diffusion of indium into sphalerite. *Mineralium Deposita*, 54, 175–192. <https://doi.org/10.1007/s00126-017-0773-1>

Bazarkina E.F., Zotov A.V., Akinfiyev N.N. (2010) Pressure-dependent stability of cadmium chloride complexes: Potentiometric measurements at 1–1000 bar and 25 °C. *Geology of Ore Deposits*, 52, 167–178. <https://doi.org/10.1134/S1075701510020054>

Belgorodsky E.A., Cherkashov S.A., Grabezhev A.I., Shargorodsky B.M. (1991) Porphyry copper

Novonikolaevsky ore cluster. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 54 p. (in Russian)

Bukhanova D.S. (2021) *Mineralogical and geochemical features of the Malmyzh gold-copper porphyry deposit, Khabarovsk krai*. (Candidate dissertation). Vladivostok, DVGI DVO RAN, 200 p. (in Russian)

Burmistrov A.A., Khrebtievsky V.V., Erastov E.A. (2023) Preliminary studies of petrophysical properties and types and intensity of metasomatic alteration of rocks and ores of the Novonikolaevskoe area of the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals). *Nedropolzovanie XXI vek (Subsoil Use XXI Century)*, 3–4(100), 42–51. (in Russian)

Catchpole H., Kouzmanov K., Fontboté L. (2012) Copper-excess stannoidite and tennantite-tetrahedrite as proxies for hydrothermal fluid evolution in a zoned cordilleran base metal district, Morococha, Central Peru. *The Canadian Mineralogist*, 50, 719–743. <https://doi.org/10.3749/canmin.50.3.719>

Chen S. C., Yu J. J., Bi M. F., Lehmann B. (2022) Tin-bearing minerals at the Furong tin deposit, South China: Implications for tin mineralization. *Chemie der Erde*, 82(1), 125856. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125856>

Cook N.J., Ciobanu C.L., Pring A., Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Saini-Eidukat B., Melcher F. (2009) Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICP-MS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 4761–4791. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045>

Czamanske G.K. (1974) The FeS content of sphalerite along the chalcopyrite-pyrite-bornite sulfur fugacity buffer. *Economic Geology*, 69, 1328–1334. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.69.8.1328>

Donahue K.M. (2002) Geochemistry, geology and geochronology of the Victorio mining district, Luna County, New Mexico: Linking skarn and porphyry systems to carbonate-hosted lead-zinc replacement deposits. MSc Thesis. Socorro, New Mexico, New Mexico Institute of Mining and Technology, 186 p.

Einaudi M.T., Meinert L.D., Newberry R.J. (1981) Skarn deposits. *Economic Geology*, 75, 317–391. <https://doi.org/10.5382/AV75.11>

Girfanov M.M., Sergeeva N.E., Shishakov V.B. (1991) Ore-metasomatic zonation of the Mikheevskoe porphyry copper deposit in the South Urals. *Vestnik Moskovskogo universiteta (Moscow State University Bulletin)*, 5, 75–79. (in Russian)

Gorbunov A.A., Alikin O.V., Zakharova A.A., Guseva T.A., Rudashevsky V.N., Gemel V.A. (2019) Mineralogical features of ores of the Mikheevskoe deposit, Novonikolaevsky and Zapadny areas (South Urals). *Uralskaya mineralogicheskaya shkola-2019 (Urals Mineralogical School-2019)*. Yekaterinburg, UGGU, 41–44. (in Russian)

Grabezhev A.I. (2014) Novonikolaevsky (Mo, Au)-Cu porphyry ore cluster (South Urals): petrogeochemistry

of ore-bearing granitoids and metasomatites. *Litosfera (Lithosphere Russia)*, 2, 60–76. (in Russian)

Grabbezhev A.I., Belgorodsky E.A. (1992) Productive granitoids and metasomatites of porphyry copper deposits: example of the Urals. Yekaterinburg, UrO RAN, 199 p. (in Russian)

Grabbezhev A.I., Ronkin Y.L. (2011) U-Pb age of zircons from ore-bearing granitoids of porphyry copper deposits in the South Urals. *Litosfera (Lithosphere Russia)*, 3, 104–116. (in Russian)

Hedenquist J.W., Arribas A.R., Gonzalez-Urrien E. (2000) Exploration for epithermal gold deposits. *Reviews in Economic Geology*, 13, 245–277. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.07>

<https://nedradv.ru/nedradv.ru/places?mineral=ea137769ab1dc8b338a79c54c3009281> (last access on June 28, 2026)

Kesler S.E., Chrysosoulis S.L., Simon G. (2002) Gold in porphyry copper deposits: Its distribution and fate. *Ore Geology Reviews*, 21, 103–124. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(02\)00084-7](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(02)00084-7)

Khrebtievsky V.V. (2024) Mineral formation sequence and new Sn and Te minerals at the Novonikolaevskoe deposit (South Urals). *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov-2024. Rudogenez (Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2024. Ore Genesis)*. Miass, SU FNTs MiG UrO RAN, 144–147. (in Russian)

Khrebtievsky V.V. (2025) Features of the distribution of Cu and Au contents at the Novonikolaevskoe porphyry copper deposit (South Urals). *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov-2025. Ot gipotez rudogeneza k kriteriyam prognozirovaniya (Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2025. From Ore Genesis Hypotheses to Forecasting Criteria)*. Miass, SU FNTs MiG UrO RAN, 104–107. (in Russian)

Khrebtievsky V.V. (2026) Hydrothermal zonation and genesis of the Novonikolaevskoe skarn copper porphyry deposit (Southern Urals). *Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov-2026. Strategicheskie elementy: mineralogo-geokhimicheskie i tsifrovye modeli (Metallogeny of Ancient and Modern Oceans-2026. Strategic Elements: Mineralogical and Geochemical and Digital Models)*. Miass, SU FNTs MiG UrO RAN, 125–128. (in Russian)

Khrebtievsky V.V., Plotinskaya O.Y. (2026) Skarn garnets of the Novonikolaevskoe copper deposit (South Urals). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 12(1), 44–59. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2026-12-1-3> (in Russian)

Kiseleva G.D., Kovalenker V.A., Borisovsky S.E., Yazykova Yu.I., Trubkin N.V. (2026) U-Th-REE mineralization of the Bystrinsk skarn-porphyry Au–Cu–Fe deposit (Eastern Transbaikalia): typomorphic characteristics, peculiarities of formation, and genetic implications. *Geology of Ore Deposits*, 68, 396–412. <https://doi.org/10.1134/S1075701525600926>

Kotelnikov A.R., Suk N.I., Kotelnikova Z.A., Shchekina T.I., Kalinin G.M. (2012) Mineral geothermometers for low-temperature parageneses. *Vestnik ONZ RAN (Bulletin of the Earth Sciences Department of the Russian Academy of Sciences)*, 4. https://doi.org/10.2205/2012NZ_ASEMPG (in Russian)

Kovalenker V.A. (2006) Formation conditions and causes of large-scale concentration of gold, porphyry, and epithermal deposits. In: *Kрупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых (Large and Super-Large Deposits of Ore Mineral Deposits)*, vol. 2. Moscow, IGEM RAN, 143–214. (in Russian)

Kovalenker V.A., Kiseleva G.D., Krylova T.L., Andreeva O.V. (2011) Mineralogy and ore formation conditions of the Bugdaya Au-bearing W–Mo porphyry deposit, Eastern Transbaikalia Region, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 53, 93–125. <https://doi.org/10.1134/S1075701511020048>

Kretschmar U., Scott S.D. (1976) Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application. *The Canadian Mineralogist*, 14(3), 364–386.

Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N., Losev V.I., Kalinin Yu. A., Shavekina A.Sh., Bayir-Ool A.V., Vikentyev I.V. (2026) Kyzzyk-Chadr Au–Mo–Cu porphyry deposit (Eastern Tuva, Russia): noble-metal mineralization, PT-parameters and ore-bearing fluid composition. *Geology of Ore Deposits*, 68, 413–441. <https://doi.org/10.1134/S1075701525600744>

Kuznetsov A.Z., Velikanov A.Y., Arafailov A.E., Izmailov M.R., Morozova G.V., Budnik T.L., Ental'tsev E.V., Panfilenkova O.V., Tarasova N.N. (2020) Unpublished report with operative calculation of copper porphyry ore reserves of the Novonikolaevsky area (Zapadnoe and Novonikolaevskoe ore occurrences) of the Mikheevskoe deposit as of 01.01.2020 in the Kartaly and Varna districts of the Chelyabinsk region. Yekaterinburg, OOO Geosintez, 475 p. (in Russian)

Kwak T.A.P. (1987) W–Sn skarn deposits and related metamorphic skarns and granitoids. Amsterdam–Oxford–New York, Elsevier, 451 p.

Lipson R. (2014) The promise and perils of porphyry deposits in the future of gold production. *SEG Newsletter*, 98, 1–21. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2014-98.fea>

Marushchenko L.I., Baksheev I.A., Nagornaya E.V., Chitalin A.F., Nikolaev Y.N., Vlasov E.A. (2018) Compositional evolution of the tetrahedrite solid solution in porphyry–epithermal system: A case study of the Baimka Cu–Mo–Au trend, Chukchi Peninsula, Russia. *Ore Geology Reviews*, 103, 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.018>

Meinert L.D. (1992) Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, 19, 145–162.

Meinert L.D., Dipple G.M., Nicolescu S. (2005) World skarn deposits. *Economic Geology*, 100, 299–336. <https://doi.org/10.5382/AV100.11>

- Monnier L., Salvi S., Melleton J., Bailly L., Béziat D., de Parseval P., Gouy S., Lach P. (2019) Multiple generations of wolframite mineralization in the Echassieres district (Massif Central, France). *Minerals*, 9(10), 637. <https://doi.org/10.3390/min9100637>
- Nikolaev Y.N., Baksheev I.A., Prokofiev V.Y., Nagornaya E.V., Marushchenko L.I., Sidorina Yu.N., Chitalin A.F., Kal'ko I.A. (2016) Gold–silver mineralization in porphyry–epithermal systems of the Baimka trend, western Chukchi Peninsula, Russia. *Geology of Ore Deposits*, 58, 284–307. <https://doi.org/10.1134/S107570151604005X>
- Plotinskaya O.Yu., Kovalchuk E.V. (2023) Fahlores from porphyry Cu–(Mo) deposits of the Urals. *Mineralogiya (Mineralogy)*, 8(3), 5–22. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2022-8-3-1> (in Russian)
- Plotinskaya O. Y., Kovalchuk E.V. (2025) Co and Ni minerals in ores of the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 11(1), 17–27. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-1-2> (in Russian)
- Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltnmann 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>
- Plotinskaya O.Yu., Grabezhev A.I., Seltnmann R. (2015) Rhenium in ores of the Mikheevskoe Mo–Cu porphyry deposit, South Urals. *Geology of Ore Deposits*, 57(2), 118–132. <https://doi.org/10.1134/S1075701515020051>
- Plotinskaya O.Y., Grabezhev A.I., Tessalina S., Seltnmann R., Groznova E.O., Abramov S.S. (2017) Porphyry deposits of the Urals: geological framework and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 85, 153–173. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.07.002>
- Plotinskaya O.Y., Azovskova O.B., Belogub E. V. (2025) Telluride Mineralogy in Ores of the Birgilda Porphyry Copper Deposit (South Urals, Russia). *Geology of Ore Deposits*, 67(6), 799–811. <https://doi.org/10.1134/S1075701525600306>
- Pribavkin S.V., Soroka E.I., Azovskova O.B., Smoleva I.V., Leonova L.V., Gottman I.A., Sustavov S.G., Rovnushkin M.Yu. (2023) Association of siderite with iron sulfides and silicates in rocks of the Mikheevskoe Cu(Mo,Au) porphyry deposit (Southern Urals). *Geology of Ore Deposits*, 65, 332–345. <https://doi.org/10.1134/s1075701523040049>
- 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>
- Rovnushkin M.Y., Azovskova O.B. (2022) Rhenium-bearing molybdenite in the argillization zone of the Mikheevskoe molybdenum-copper-porphyry deposit (Southern Urals) *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta (News of the Urals State Mining University)*, 3(67), 7–13. <http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-7-13>
- Scott C.D., Barnes H.L. (1971) Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Economic Geology*, 66, 653–669. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.4.653>
- Shadchin M.V., Shvedov G.I., Makarov V.A., Lobastov B.M., Silyanov S.A., Serdyuk S.S. (2024) New data on mineralogy of ores of the Ak-Sug Au–Mo–Cu porphyry deposit (Northeastern Tuva). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 10(3), 32–51. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2024-10-3-3> (in Russian)
- Shargorodsky B.M., Novikov I.M., Aksenov S.A. (2005) The Mikheevskoe porphyry copper ore deposit in the South Urals. *Otechestvennaya geologiya (National 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. Reston, Virginia, US Geological Survey Open File Report 2008, 45 p.
- Tessalina S.G., Plotinskaya O.Y. (2017) Silurian to Carboniferous Re–Os molybdenite ages of the Kalinovskoe, Mikheevskoe and Talitsa Cu–Mo porphyry deposits in the Urals: implications for geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 85, 174–180. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.005>
- Tevelev A.V., Kosheleva I.A., Burshtein E.F., et al. (2018) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Second Edition. South Ural Series. Sheet N-41-XXV (Kartaly). Explanatory Note. Moscow, Moskovsky filial FGBU VSEGEI, 175 p. (in Russian)
- Tian M., Xiao Y., Shang Y., Wang M., Li L., Zhao M., Kang D. (2026) The occurrence of Sn in the Shizhuyuan W–Sn polymetallic skarn-greisen deposit: Insights into the magmatic-hydrothermal Sn mineralization process. *Ore Geology Reviews*, 188, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2025.107026>
- Zhao H., Shao Y., Zhang Y., Cao G., Zhao L., Zheng X. (2023) Big data mining on trace element geochemistry of sphalerite. *Journal of Geochemical Exploration*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107254>
- Zharikov V.A., Rusinov V.L., Marakushev A.A., Zaraysky G.P., Omelyanenko B.I., Pertsev N.N., Rass I.T., Andreeva O.V., Abramov S.S., Podlessky K.V. (1998) Metasomatism and metasomatic rocks. Moscow, Nauchnyi mir, 492 p. (in Russian)

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

Хребтиевский Владимир Валерьевич – аспирант, Московский государственный университет, г. Москва, Россия; st064292@gmail.com

Ковальчук Елена Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, Россия; elena7kovalchuk@gmail.com

Савостьянова Маргарита Михайловна – старший специалист, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, г. Москва, Россия; savostyanova_m@inbox.ru

Information about the authors

Olga Yu. Plotinskaya – Doct. Sci. (Geol.-Mineral), Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia; plotin@igem.ru

Vladimir V. Khrebtievsky – Post-Graduate Student, Moscow State University, Moscow, Russia; st064292@gmail.com

Elena V. Kovalchuk – Cand. Sci. (Geol.-Mineral), Scientific Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia; elena7kovalchuk@gmail.com

Margarite M. Savostyanova – Senior Specialist, Fedorovsky All-Russian Scientific Research Institute of Mineral Resources, Moscow, Russia; savostyanova_m@inbox.ru