

УДК 549.324.35 + 552.18 (571.53/55)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-5-60-68

СРАСТАНИЯ ХОЛИНГВОРТИТА И СПЕРРИЛИТА В СУЛЬФИДНЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУДАХ БАЙКАЛЬСКОГО И НОРИЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Эрнст Максович Спиридонов 

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ernstspiridon@gmail.com 

Аннотация: В статье рассматривается проблема формирования срастаний холингвортита $RhAsS$ и сперрилита $PtAs_2$. Первичные сульфидные $Cu-Ni$ пентландит-пирротиновые руды Норильского и Байкальского месторождений содержат срастания метакристаллов холингвортита и сперрилита. Пирротин этих руд содержит до 31 г/т Rh и заметную примесь Ru и Ir ; возник при субсолидусном превращении сульфидного твердого раствора Mss (ранний продукт кристаллизации сульфидного $Fe-Cu-Ni$ расплава). В норильских рудах заметное количество метакристаллов сперрилита, наиболее позднего из пневматолитовых (флюидно-метасоматических) минералов Pd , Pt , Au , Ag . Состав норильского сперрилита обычно близок к $PtAs_2$. В участках с обилием геверсита $PtSb_2$, стибипалладинита Pd_5Sb_2 или налдреттита Pd_2Sb метакристаллы сперрилита содержат до 11 масс. % Sb . Особенность мало сульфидных руд гипербазит-базитового Йоко-Довыренского плутона (байкалиды Северного Прибайкалья) — отсутствие в них сперрилита. Лишь в приконтактных участках плутона близ толщ ороговичкованных пиритовых черных сланцев руды содержат единичные метакристаллы сперрилита. В заметном количестве сперрилит развит в сульфидных $Cu-Ni$ рудах Байкальского месторождения, размещенного в нижнем экзо- и эндоконтакте Йоко-Довыренского плутона у границы с толщей ороговичкованных пиритовых черных сланцев. Сперрилит в пирротиновых рудах Норильского и Байкальского месторождений — продукт взаимодействия обогащенных As и Pt флюидов с пирротинном. Очевидно, что эти же флюиды извлекли Rh (и Ru , и Ir) из твердого раствора пирротина. В результате возникли срастания сперрилита и холингвортита. Состав сперрилита в срастании с холингвортитом: $(Pt_{0.985}Rh_{0.015})_1(As_{1.965}Se_{0.035})_2$ (Норильское), $(Pt_{0.985}Rh_{0.015})_1(As_{1.935}Sb_{0.065})_2$ (Байкальское). Норильский холингвортит обогащен Pt и Ru , его состав $(Rh_{0.71}Pt_{0.12}Ru_{0.11}Ir_{0.05})_{0.99}As_{1.01}S_{0.99}Se_{0.01}$. В байкальском холингвортите октаэдрический сектор роста содержит Pt — $(Rh_{0.84}Pt_{0.05}Ir_{0.02}Co_{0.04}Ni_{0.03}Fe_{0.02})_{1.00}As_{0.99}S_{1.00}Se_{0.01}$; тетраэдрический сектор роста не содержит Pt — $(Rh_{0.85}Ir_{0.01}Co_{0.08}Ni_{0.04}Fe_{0.02})_{1.00}As_{0.98}S_{1.00}Se_{0.02}$.

Ключевые слова: срастания сперрилита и холингвортита, продукт флюидного воздействия, родийсодержащий пирротин, магматогенные сульфидные руды

Для цитирования: Спиридонов Э.М. Срастания холингвортита и сперрилита в сульфидных медно-никелевых рудах Байкальского и Норильского месторождений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 5. С. 60–68.

INTERGROWTHS OF THE SPERRYLITE AND HOLLINGWORTHITE FROM COPPER-NICKEL SULFIDE ORES AT BAIKAL AND NORILSK DEPOSITS

Ernst M. Spiridonov 

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ernstspiridon@gmail.com 

Abstract. Primary (non-metamorphosed) $Cu-Ni$ sulphide ores of pyrrhotite composition contain intergrowths of sperrylite $PtAs_2$ and hollingworthite $RhAsS$ metacrystals in the Norilsk and Baikal deposits. Pyrrhotite of these ores is enriched in Rh (up to 31 ppm g/t); it contains a noticeable impurity of Ru and arose during the subsolidus transformation of high-temperature sulphide solid solution Mss (an efflorescence of sulphide $Fe-Cu-Ni$ melt). Norilsk ores contain a significant amount of sperrylite metacrystals, the latest of pneumatolytic (fluid-metasomatic) Pd , Pt , Au and Ag minerals. The composition of Norilsk sperrylite is usually close to $PtAs_2$. Small-sized sperrylite metacrystals contain up to 11 wt. % of Sb in ore zones with geversite $PtSb_2$, stibiopalladinite Pd_5Sb_2 and naldrettite Pd_2Sb abundance. An absence of sperrylite is the feature of low-sulphide ores of the hyperbasite-basite Yoko-Dovyren pluton (baikalides at Northern Baikal region), whereas single sperrylite metacrystals occur only in pluton contact zones near the series of hornfelsed pyrite-bearing black shales. Sperrylite is developed significantly in $Cu-Ni$ sulphide ores of the Baikal deposit, located in the lower exo- and endocontact of the Yoko-Dovyren pluton at the boundary with hornfelsed pyrite-bearing black shales series. Sperrylite in pyrrhotite ores of the Norilsk and Baikal deposits is a product of interaction of As - and Pt -rich fluids with pyrrhotite. Obviously, these fluids extracted Rh (as well as Ru and Ir) from pyrrhotite solid solution. As a result, sperrylite and hollingworthite intergrowths occurred. Composition of the sperrylite from intergrows with hollingworthite is $(Pt_{0.985}Rh_{0.015})_1(As_{1.965}Se_{0.035})_2$ (Norilsk) and $(Pt_{0.985}Rh_{0.015})_1(As_{1.935}Sb_{0.065})_2$ (Baikal). Norilsk hollingworthite rich in platinum; its composition is $(Rh_{0.63}Pt_{0.22}Ru_{0.10}Ir_{0.04})_{0.99}As_{1.01}S_{0.99}Se_{0.01}$. Baikal hollingworthite crystals are sectorial: some of the growth sectors contain platinum, their composition corresponds to $(Rh_{0.84}Pt_{0.05}Ir_{0.02}Co_{0.04}Ni_{0.03}Fe_{0.02})_{1.00}As_{0.99}S_{1.00}Se_{0.01}$, whereas other growth sectors are poor in platinum — $(Rh_{0.85}Ir_{0.01}Co_{0.08}Ni_{0.04}Fe_{0.02})_{1.00}As_{0.98}S_{1.00}Se_{0.02}$.

Keywords: intergrowths pneumatolytic sperrylite — hollingworthite, product at fluid interaction, rhodium-bearing pyrrhotite, magmatogenic sulfide ores

For citation: Spiridonov E.M. Intergrowths of the sperrylite and hollingworthite from copper-nickel sulfide ores at Baikal and Norilsk deposits. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 5: 60–68. (In Russ.).

Введение. В магматогенных Cu-Ni месторождениях распространены интерметаллиды, сульфиды, арсениды, стибниды, висмутиды, теллуриды, станниды, пюмбиды Pt и Pd [Naldrett, 2004]. Стандартный тренд благородных металлов в высокотемпературных эндогенных процессах: Ru (+S) → Os (+S) → Ir (+S) → Rh (+S, As) → Pt + Au + Ag (±S, As) → Pd + Au + Ag (+S, As, Sb, Bi, Te, Sn, Pb, Cd, Hg, Ge, Tl) → Au + Pd + Ag (±S, As, Sb, Bi, Te, Sn, Pb, Se, Cd, Hg, Ge, Tl) [Спиридонов, 2022]. Один из пневматолитовых минералов платины, сперрилит, обычно развит в магматогенных сульфидных рудах, которые содержат халькопирит, кубанит, талнахит, моихукит, паторанит и галенит. В редких случаях метакристаллы сперрилита развиты в магматогенных рудах преимущественно пирротинового состава. В таких случаях со сперрилитом нередко ассоциирует холингвортит. В статье описаны их сростания и рассмотрены причины их возникновения.

Сперрилит. Кубический диарсенид платины сперрилит PtAs₂ — один из распространенных минералов платины. Кристаллами сперрилита размером до 2,5 см известны пегматоидные гортонолитовые дуниты трубок Дрикоп, Онвервахт и Моихук в Бушвелдском плутоне [Wells, 1889; Wagner, Moreno, 1925]. Магматогенные сульфидные руды Главной Хараелахской залежи Октябрьского месторождения Норильского рудного поля содержат метакристаллы сперрилита длиной до 4–7 см, кристаллы — двойники длиной до 11–21 см, скопления метакристаллов сперрилита до десятков см в поперечнике [Спиридонов и др., 2015; Спиридонов, 2022]. В магматических малосульфидных (Бушвелд и иные) и сульфидных рудах (Норильск, Садбери и другие) развиты метакристаллы сперрилита, замещившие продукты распада сульфидных твердых растворов — пирротин, троилит, пентландит, халькопирит, кубанит, талнахит, моихукит, паторанит, магматогенные куперит PtS и брэггит PdPt₃S₄, интерметаллиды Pt-Fe [Wells, 1889; Wagner, Melor, 1925; Генкин, 1968; Кулагов, 1968; Бегизов и др., 1976; Cabri, et al., 1977; Mostert, et al., 1982; Качаровская, 1986; Евстигнеева и др., 1990; Kinloch, Peyerl, 1990; Балмасова и др., 1992; Moreno et al., 1999; Назимова и др., 2003; Орсоев и др., 2003; Спиридонов и др., 2003, 2010, 2015, 2019; Спиридонов, 2010, 2022; Naldrett, 2004; Dare, et al., 2010; Мочалов, 2019], магнетит. По нашим данным, генезис такого сперрилита — пневматолитовый [Спиридонов, 2010; Спиридонов и др., 2015, 2019], состав его обычно близок к теоретическому, значительно реже минерал содержит заметную примесь Sb [Спиридонов и др., 2015], крайне редко — заметную примесь родия [Изох, Майорова, 1990]. Изредка, малосульфидные руды месторождений Уральского (Нижнетагильского) — Аляскинского (Гуд-ньюс-бей) типа содержат полный ряд твердых растворов

сперрилит PtAs₂ — геверсит PtSb₂ [Johan, et al., 1989]. Сперрилит — характерный минерал гидротермальных плутогенных Au-Mo-Cu-порфировых месторождений [Tarkian, Koopman, 1995], эпитеермальных Pt-Pd-Au-Se и U-Ag-Bi-Ni-Co месторождений [Botelho, et al., 2006 и др.]. Сперрилит довольно широко развит и в метаморфизованных рудах платиновых металлов и золота. В золотоносных конгломератах Витватерсранда, метаморфизованных в условиях пумпеллиит-актинолитовой фации, сперрилит слагает каймы замещения на окатанных зернах ферроплатины (источник As — метаморфизируемые пиритовые черные сланцы прослоев в золотоносных конгломератах) [Malitch, Merkle, 2004]. В рудах, метаморфизованных в условиях от фации зеленых сланцев до амфиболитовой и гранулитовой, метаморфогенный сперрилит ассоциирует с арсенидами и сульфоарсенидами Ni-Co-Fe: кобальтином и другими [Ohnenstetter, et al., 1991; Barkov, et al., 1996; Gervilla, et al., 1998; Barkov, Fleet, 2009]. В высокоградно метаморфизованных рудах развит и сернистый сперрилит, твердый раствор сперрилит — платарсит PtAsS [Barkov, Fleet, 2009; Dare, et al., 2010], структуры которых сходны [Szymanski, 1979]; а также родисто-сернистый сперрилит, вплоть до состава Pt_{0.8}Rh_{0.2}As_{1.5}S_{0.5} — это твердый раствор сперрилита и холингвортита RhAsS [Tarkian, Prichard, 1987; Barkov, et al., 1996]; в них наиболее распространен парагенез бедного Rh сперрилита и холингвортита [Prichard, et al., 1994; Olivo, Theier, 2004]. В участках норильских руд, метаморфизованных в условиях пренит-пумпеллиитовой фации, новообразованного сперрилита нет [Spiridonov, et al., 2016].

Холингвортит. Кубический сульфоарсенид родия — холингвортит RhAsS — самый распространенный минерал родия. В Уральском (Нижнетагильском) типе минерализации платиновых металлов в дунитовых ядрах зональных дунит-верлит-клинопироксенит-габбровых плутонов складчатых областей с преобладающей изоферроплатиной, Ос иридием, осмием ассоциируют небольшие количества сульфидов, сульфоарсенидов и арсенидов: лаурит RuS₂, эрлихманит OsS₂, кашинит Ir₂S₃, бовиит Rh₂S₃, куперит PtS, купроиридсит CuIr₂S₄, купрородсит CuRh₂S₄, феррородсит FeRh₂S₄, купроплатсит CuPt₂S₄, ирарсит IrAsS, холингвортит RhAsS, сперрилит PtAs₂ [Высоцкий, 1913; Бегизов и др., 1976; Johan, et al., 1989; Назимова и др., 2003; Naldrett, 2004; Мочалов, 2009]. Гулинский-Кондёрский тип минерализации платиновых металлов в дунитах и оливинитах дунит-клинопироксенитовых комплексов кольцевых плутонов платформ — изоферроплатина, Ir осмий, звягинцевит, рустенбургит-атокит, котульскит, таймырит-татьянаит, стибнопалладинит; сульфиды и сульфоарсениды платиновых металлов развиты здесь в подчиненных количествах: это

лаурит $(\text{Ru}, \text{Os}, \text{Ir})\text{S}_2$ — эрлихманит $(\text{Os}, \text{Ru}, \text{Ir})\text{S}_2$, куперит $(\text{Pt}, \text{Pd}, \text{Ni})\text{S}$, купрородсит $(\text{Cu}, \text{Fe})(\text{Rh}, \text{Ir}, \text{Pt})_2\text{S}_4$, купроиридсит $\text{Cu}(\text{Ir}, \text{Rh})_2\text{S}_4$, феррородсит, кашинит $(\text{Ir}, \text{Rh})_2\text{S}_3$, кондёрит $\text{PbCu}_3(\text{Rh}, \text{Pt}, \text{Ir})_8\text{S}_{16}$, ирарсит IrAsS — платарсит PtAsS — холингвортит RhAsS [Балмасова и др., 1992; Мочалов, 2019; Рудашевский и др., 1984а, 1984б]. Особый Бушвелдский тип минерализации платиновых металлов в трубообразных телах высоко железистых пегматоидных титаномagnetит-оливиновых пироксенитов и гортонолитовых дунитов: основные минералы платиновых металлов — изоферроплатина Pt_3Fe в сростании с холингвортитом $(\text{Rh}, \text{Pt}, \text{Os} \dots)\text{AsS}$; рутений Ru ; сперрилит PtAs_2 в сростании с родиевым лауритом $(\text{Ru}, \text{Os}, \text{Rh})\text{S}$ [Stumpfl, Clark, 1965; Cabri, et al., 1977; Ohnenstetter, et al., 1991; Naldrett, 2004]. В сульфидных Ni-Cu рудах Норильского месторождения холингвортит в сростании со сперрилитом установил А.Д. Генкин [1968]. В сульфидных Cu-Ni рудах Байкальского месторождения сростания холингвортита с пневматолитовым сперрилитом установлены автором. Холингвортит — типичный продукт высокоградно метаморфизованных руд благородных металлов. Минералы платиновых металлов — продукты метаморфизма руд в условиях фации зеленых сланцев — сульфоарсениды: руарсит RuAsS , твердые растворы холингвортит RhAsS — ирарсит IrAsS — руарсит RuAsS — платарсит PtAsS — осарсит OsAsS ; арсениды: твердые растворы сперрилит — холингвортит; сульфиды: твердые растворы тиошпинелей: купрородсит — купроиридсит — купроплатсит (маланит) — феррородсит — полидимит [Tarkian, Pricard, 1987; Prichard, et al., 1994; Moreno, et al., 1999; Olivo, Theier, 2004].

Норильское месторождение. Норильское рудное поле расположено в северо-западном углу дорифейской Восточно-Сибирской платформы, в области краевых дислокаций [Годлевский, 1968; Степанов, Туровцев, 1988]. Рудное поле образуют южный Норильский и северный Талнахский рудные узлы. Плутоногенные Co-Ni-Cu сульфидные месторождения с крупнейшими ресурсами Pd , Pt , Au , Ag , Rh генетически связаны с интрузивами оливиновых габбронорит-долеритов норильского типа [Годлевский, 1968; Кулагов, 1968; Степанов, Туровцев, 1988], производных трапповой формации $\text{P}_2\text{-T}_1$. Головные части Норильских, Талнахского (Верхнеталнахского), Хараелахского рудоносных интрузивов в значительной степени залегают среди контактово-метаморфизованных угленосных пород тунгусской серии. Магматические сульфиды слагают вкрапленность, шилы, жилы и залежи в интрузивных породах и около интрузивных роговиках. Поскольку температура кристаллизации сульфидных расплавов ниже, чем у силикатных, при остывании рудоносных интрузивов значительная часть сульфидных расплавов была выжата в их нижние части и под интрузивы [Годлевский, 1968; Кулагов, 1968; Степанов, Туровцев, 1988; Naldrett, 2004]. Изотопный

состав Pb в породах рудоносных интрузивов, в магматических сульфидных рудах и у минералов Pd и Pt в Норильском и в Талнахском рудном узлах заметно отличается, талнахские заметно более радиогенные [Спиридонов и др., 2010]. Это — свидетельство генетических связей минералов Pd и Pt с сульфидными рудами, а руд — с конкретными интрузивами.

При кристаллизации высокотемпературных сульфидных твердых растворов благородные металлы были селективно включены в них, при этом, Rh , Ru , Os , Ir — Mss -совместимые, Pt , Pd , Au , Ag — Iss -совместимые [36]. Соответственно, существенно пирротиновые руды — продукты субсолидусных превращений Mss — обогащены родием, отчасти рутением, осмием и иридием. Они не должны были бы содержать заметное количество минералов Pt и Pd , а их там местами немало, в частности, сперрилита. Это свидетельствует о флюидном перераспределении благородных металлов при формировании их минералов.

Уникальная особенность норильских руд — наличие поздних легкоплавких ($T_{\text{крист}} \sim 550^\circ\text{C}$) эвтектик $\text{PbSss} - \text{Iss5}$ (или Iss4 , Iss3) [Спиридонов, 2010, 2022; Спиридонов и др., 2010, 2015, 2019]. Сульфидные руды — эвтектические сростания слагают гнезда и секущие жилы нескольких поколений мощностью от первых до 120 см и длиной от первых см до многих метров в различных частях залежей массивных сульфидных руд, в интрузивных породах и роговиках, которые эти руды окружают. Причина их появления — обилие K и когерентного Pb в норильских рудно-магматических системах [Спиридонов, 2010, 2019]. Продукты субсолидусных превращений $\text{PbSss} - \text{матрица галенита и тельца распада алтаита}$. Судя по составу продуктов распада, температура распада отвечала $425\text{--}415^\circ\text{C}$ [Коваленкер и др., 1979]. Сульфидные руды — эвтектические сростания $\text{PbSss} - \text{Iss}$ экстремально богаты Pd , Pt , Ag , Au и их минералами [Спиридонов, 2010, 2022; Спиридонов и др., 2015, 2019]. Во многих рудных столбах значительная часть минералов благородных металлов находится в гнездах и жилах эвтектических руд, либо у контакта таких жил, часто замещая структуры распада галенит — алтаит. Приуроченность значительной части минералов Pd и Pt к выделениям галенита подчеркнута и в книге А.Д. Генкина [1968].

Норильские сульфидные расплавы были богаты флюидами (H_2O , K , Cl , F , CO , COS , CH_4 , P , Ba , Tl и др.). Каждое тело магматических сульфидов окружено ореолом флюидного воздействия из агрегатов титанистого биотита-флогопита, хлорапатита, фторапатита, амфиболов, ангидрита, магнетита или титаномagnetита, джерфишерита [Генкин, 1968; Годлевский, 1968; Кулагов, 1968; Спиридонов и др., 2003, 2010, 2015, 2019; Спиридонов, 2010, 2022]. Масштаб ореола связан с размером тел сульфидов, около крупных залежей ширина ореола превышает 10–15 м. Ареал распространения минералов благородных металлов шире контуров сульфидных тел

и совпадает с ореолами флюидного воздействия около них. Так, в шести метрах выше кровли Главной Хараелахской залежи Октябрьского месторождения среди роговиков в гнезде биотита и паргасита без сульфидов найден кристалл сперрилита размером 8 мм [Спиридонов, 2019].

Значительная часть Pd, Pt, Au, Ag в норильских рудах представлена собственными минералами, часто микронного размера. Часть Pd и Ag рассеяна в пентландите. Rh в основном рассеян в пирротине [Годлевский, 1968; Кулагов, 1968; Naldrett, 2004].

Байкальское месторождение. Рудоносный Йоко-Довыренский гипербазит-базитовый интрузив рифейского возраста внедрился в байкалиты северо-восточного Прибайкалья [Орсоев и др., 2003]. Размер интрузива 26х~3,5х~5 км. Интрузив образуют нижний горизонт приконтактовых оливиновых габбронорит-долеритов, толща бронзит — эндиопсид — плагиоклаз содержащих дунитов и лерцолитов (около трети разреза интрузива), толща троктолитов со шлирами и жилами анортозитов и верлитов (около трети разреза интрузива), верхняя толща оливиновых, безоливиновых и пижонитовых габброноритов [Орсоев и др., 2003]. Интрузив окружен мощным ореолом контактово-метаморфизованных терригенных, известняково-доломитовых, кремнисто-карбонатных и пиритиносных паралических углеродистых пород рифея. Особенностью мало сульфидных руд гипербазит-базитового Йоко-Довыренского плутона является почти полное отсутствие в них сперрилита. Лишь в приконтактовых участках плутона близ толщ ороговикованных пиритиносных черных сланцев руды содержат единичные метакристаллы сперрилита. В заметном количестве сперрилит развит в сульфидных Cu-Ni рудах Байкальского месторождения, размещенного в нижнем экзо- и эндоконтакте Йоко-Довыренского плутона у границы с толщей ороговикованных пиритиносных черных сланцев. Байкальское месторождение включает вкрапленные, массивные и жильные Cu-Ni пентландит-халькопирит-кубанит-пирротинные и пентландит-пирротинные руды с Pt-Pd минерализацией; в более высоких частях разреза интрузив содержит линзовидные участки и гнездовые проявления малосульфидных руд с Pt-Pd минерализацией [Качаровская, 1986; Орсоев и др., 2003; Spiridonov, et al., 2019a, 2019b]. Магматические сульфиды окружены ореолами титанистого (3–6 масс. % TiO_2) флогопита, содержащего 0,6–1 масс. % Cl, реже паргасита (до ферроэденита) с 0,7–1,1 масс. % Cl, с включениями апатита, который содержит более 3 масс. % Cl и до 1 % F. Ареал распространения метакристаллов минералов благородных металлов также шире контуров сульфидных тел и совпадает с ореолами флюидного воздействия около них [Spiridonov, et al., 2019a, 2019b].

Материалы и методы исследования. Коллекция сульфидных руд Норильского рудного поля собрана автором при многолетнем (1996–2021) изучении подземных выработок, карьеров, керн поисковых

и разведочных скважин по программе Российского фонда фундаментальных исследований (исследовательские гранты № 98-05-64762, 01-05-64051, 04-05-64162, 07-05-99957, 10-05-00674, 13-05-00839; экспедиционные гранты № 96-05-79073, 97-05-79016, 98-05-79051, 99-05-79025, 00-05-79088, 01-05-79083, 02-05-79114, 03-05-79024, 04-05-79163, 05-05-79069, 06-05-79107, 07-05-10088, 08-05-10052); ряд образцов руд передали сотрудники Норильского ГМК им. А.П. Завенягина — С.Н. Беляков, Э.А. Кулагов, Е.В. Середа, В.В. Бутенко, И.Н. Тушенцова, которым автор сердечно благодарен. Коллекция руд Байкальского месторождения автором собрана при экспедиционных работах 2016 г. по программе Российского научного фонда (грант РНФ № 16-17-10129).

Фотографии в режиме отраженных электронов и исследование химического состава минералов благородных металлов выполнены в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на электронном сканирующем микроскопе JSM IT-500 (“Jeol”, Япония) с энерго дисперсионным спектрометром X-Max^N (“Oxford Instruments”, Великобритания), аналитик — исследователь Н.Н. Коротаева. Измерения проведены при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока электронного зонда 0,7 нА. Время накопления спектра — 100 с. Систематическая погрешность измерения главных (более 10 %) компонентов не превышает 1 отн. %. Для содержаний от 1 до 10 % относительная ошибка находится в пределах 5 %. Анализы выполнены с использованием стандартов — чистых металлов Ru, Os, Ir, Rh, Pt, Pd, Au, Ag, Bi, Sb, Ge, Ni, Co, Cu, Zn, пирита FeS_2 (S), алтаита PbTe (Pb), синтетических InAs (As) и CdSe (Cd, Se).

Сперрилит и холингвортит Норильского месторождения. Сперрилит обогащает руды — графические срастания $\text{PbSss} - \text{Iss3-5}$, обилен в отдельных участках моихукитовых, талнахитовых, кубанит-халькопиритовых руд. Размер метакристаллов сперрилита варьирует от микронного до 4–7 см, двойников — до 11–21 см. Размер гнезд (скоплений метакристаллов сперрилита) варьирует от долей мм до десятков см в поперечнике [Спиридонов, 2022]. История образования пневматолитовых минералов благородных металлов норильских руд по соотношениям пересечения, обрастания, замещения разделена на 7 стадий [Спиридонов, 2022].

Пневматолитовые минералы Pd и Pt 1 стадии — метакристаллы протоинтерметаллидов Pt и Pd, содержащие до 3–8 масс. % Au. Их сопровождает алтаит PbTe , замесивший часть галенита эвтектических руд. Установлено 9 типов протоинтерметаллидов — вероятно кубических твердых растворов, реконструированных по структурам распада: 1) на основе изоферроплатины Pt_3Fe , 2) на основе ферроплатины Pt_2Fe , 3) срастания интерметаллида Pt на основе тетраферроплатины PtFe и интерметаллида Pd на основе атокита $(\text{Pd,Pt,Au})_3(\text{Sn,Pb})$, 4) на основе

состава паоловита Pd_2Sn , 5) на основе состава паоловита Pd_2Sn и минерала Pd_4SnSb , 6) на основе состава минерала Pd_4SnSb , 7) на основе состава минерала Pd_4SnSb и надреттита Pd_2Sb , 8) на основе состава соболевскита $\text{Pd}(\text{Bi}, \text{Te})$, 9) на основе мончеита $(\text{Pt}, \text{Pd})(\text{Bi}, \text{Te})_2$. Состав протоинтерметаллидов 4–8 типов эквивалентный $\approx (\text{Pd}, \text{Pt}, \text{Au}, \text{Ag})_1(\text{Sn}, \text{Sb}, \text{Bi}, \text{Te}, \text{Pb}, \text{As})_1$. Протоинтерметаллиды Pd и Pt в норильских рудах ранее не описывались.

Пневматолитовые минералы Pd и Pt 2 стадии — продукты субсолидусных превращений протоинтерметаллидов: их полиморфных превращений и распада твердых растворов, а также новообразованные интерметаллиды Pt и Pd . Некоторые из них содержат до 5 масс. % Au . Распространены минералы Pt-Fe : в рудах с сернистым пирротинном — изоферроплатина Pt_3Fe , в рудах с железистым пирротинном — ферроплатина Pt_2Fe , в рудах с троилитом — тетраферроплатина $\text{Pt}_2\text{Fe}(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Cu})$. Итак, состав минералов Pt-Fe определяло наличие «реакционно способного» железа. Типичны зональные кристаллы Pd рустенбургита — Pt атокита $(\text{Pd}, \text{Pt})_3\text{Sn}$. Заметная часть паоловита Pd_2Sn норильских руд возникла при твердофазном превращении протоинтерметаллидов при переходе предположительно кубической фазы в ромбическую (паоловит), с образованием классических перекрещивающихся двойников полиморфного перехода и ламелей распада Sb и Te-Sb инсизвайта, Bi геверсита, мончеита, телец распада нигглиита. Ориентировка ламелей распада в каждом блоке — двойнике полиморфного перехода паоловита особая. Распространен двухстадийный распад твердого раствора, что коррелируется с гипабиссальными условиями становления норильских плутоногенных месторождений. Паоловит раннего зарождения обособленных зональных кристаллов в сростании с ферроплатиной богат платиной — $(\text{Pd}_{1.65-1.80}\text{Pt}_{0.35-0.20})_2(\text{Sn}_{0.7-0.8}\text{Sb}_{0.2-0.15}\text{Te}_{0.05}\text{Bi}_{0.05})_1$. Минерал Pd_4SnSb — распространенный пневматолитовый минерал норильских руд, его средний состав ($n = 113$ в 21 образце), масс. %: Pd 61,08, Pt 2,95, Au 0,14, Cu 0,14, Sn 17,68, Sb 17,65, Bi 0,27, Pb 0,40, сумма 100,31, формула — $(\text{Pd}_{3.87}\text{Pt}_{0.10}\text{Au}_{0.005}\text{Cu}_{0.005})_{3.99}(\text{Sn}_{1.005}\text{Sb}_{0.98}\text{Bi}_{0.01}\text{Pb}_{0.015})_{2.01}$. Надреттит более редок, его средний состав — $(\text{Pd}_{1.95}\text{Pt}_{0.05})_2(\text{Sb}_{0.75-0.8}\text{Sn}_{0.25-0.2})_1$. Для него, как для паоловита и минерала Pd_4SnSb , характерен изоморфизм олово — сурьма.

Пневматолитовые минералы Pd и Pt 3 стадии — продукты превращений протоинтерметаллидов Pt-Pd-Ag-Au и новообразованные тетраферроплатина II, зональные рустенбургит II — атоцит II, звягинцевит II; пластинчатые паоловит II, минерал Pd_4SnSb II, надреттит II и стибиопалладинит; мончеит II, инсизвайт II, геверсит II; соболевскит II, масловит I. Характерен массовый рост пластин паоловита II без структур распада, их размер до 26×6 мм. Это самые крупные в мире кристаллы паоловита. Паоловит II отличается от паоловита I более низким содержанием Au , Sb и Pt и наличием

небольших устойчивых примесей Te , Cd , Tl . С пластинчатым паоловитом II ассоциирует, а также образует обособленные кристаллы гексагональный минерал Pd_4SnSb II. В эвтектических рудах Октябрьского месторождения установлен моноклинный служеникинит $\text{Pd}_{15}(\text{Sb}, \text{Sn})_7$, морфология которого не отличима от морфологии пластин минерала Pd_4SnSb — $\text{Pd}_2(\text{Sb}, \text{Sn})$. Состав этой фазы близок к составу служеникинита. Возможно, служеникинит — продукт процесса упорядочения гексагонального минерала Pd_4SnSb — $\text{Pd}_2(\text{Sb}, \text{Sn})$, с небольшим изменением состава. С новообразованным паоловитом II нередко ассоциируют пластины стибиопалладинита.

Пневматолитовые минералы Pd, Pt, Au, Ag 4 стадии — продукты замещения пневматолитовых интерметаллидов 1, 2 и 3 стадий: станнопалладинит, таймырит-татьянаит; тонко пластинчатые сростания плюмбополярит + станнопалладинит + плюмбопалладинит + звягинцевит и продукты их собирательной перекристаллизации; арсениды-станнды и арсениды-стибиды Pd : паларстанид, Sb паларстанид, минералы гр. мертиита; продукты замещения пентландита: аргентопентландит, маякит, нипаларсит; тетраферроплатина; тетрааурикуприд, аурикуприд, Au томамаеит; интерметаллиды — Ag-Au-Cu-Pd-Pt . Их сопровождают джерфишерит и талфенисит. Среди образований 4 стадии — новая изоморфная серия: томамаеит PtCu_3 — аурикуприд AuCu_3 — нильсенит PdCu_3 . В отличие от предыдущих, для 4 стадии характерно активное участие Cu и As в процессах минералогенеза. Наличие тетрааурикуприда и аурикуприда [Спиридонов и др., 2003] — свидетельство температур кристаллизации минералов 4 стадии $<390-410^\circ \text{C}$.

Пневматолитовые минералы Pd, Pt, Au, Ag 5 стадии. Их образованию предшествовала заметная деформация и частичная перекристаллизация более ранних минеральных агрегатов. Минералы 5 стадии нередко слагают среди них прожилки. Характерные минералы 5 стадии — фрудит PdBi_2 , незональные минералы ряда $\text{Au} - \text{Ag}$ и гессит Ag_2Te , с которыми ассоциируют монохалькогениды Pd и Pt (Te соболевскит, садбериит и котульскит) и дихалькогениды Pd и Pt (мончеит, масловит, майчнерит), арсениды Pd (меньшиковит и минералы гр. мертиита), а также палладогерманид, алтаит. Широко распространены незональные электрум, кюстелит, Au серебро, часто в сростании с фрудитом. Золото с пробностью $>800\%$ — продукт распада богатых золотом интерметаллидов Pd и Pt .

Пневматолитовые минералы Pd, Pt, Au, Ag 6 стадии — фрудит II, обычно в сростании со сложными зональными электрумом II ($598-308\%$) — кюстелитом II ($300-105\%$) — Au серебром II ($98-4\%$) \pm алтаит \pm масловит III; алтаит \pm масловит III \pm беспримесные геверсит IV и инсизвайт IV; сростания паоловита IV и гессита III \pm фрудит II; реакционные каймы кабриита вокруг раннего паоловита; реакционный туламинит (феррокупроплатина), замещающий

томамаеит на контакте с зональными золотинами. Характерны золотины с прямой, обратной, осцилляционной, сложной и очень сложной зональностью. Вариации состава золотин обусловлены колебаниями активности Те во флюиде. Наличие богатых Ag золотин на глубоких горизонтах месторождения Октябрьское — возможный признак существенного продолжения залежей богатых руд на глубину.

Пневматолитовые минералы Pt, Rh 7 стадии. Наиболее поздний пневматолитовый минерал благородных металлов норильских руд — сперрилит $PtAs_2$ [Спиридонов и др., 2015]. Границы его метакристаллов секут все типы первичных сульфидных минералов и магнетит, тетраферроплатину, паоловит, инсизваит, геверсит, нигглиит, рустенбургит, атокит, таймырит, соболевскит, меньшековит, котульскит, фрудит, кабриит, электрум, кюстелит, Au серебро. Форма кристаллов разнообразная: от простых кубов и кубооктаэдров до весьма сложной, нередко уплощенные кристаллы. Обычный случай, когда одни грани метакристалла идеальной формы и гладкие, остальная морфология неровная. Обычно норильский сперрилит — минерал мало примесный. Сперрилит, заместивший Sb-паоловит и геверсит $PtSb_2$, содержит до 11 масс. % Sb [Спиридонов и др., 2015]. Норильский сперрилит постоянно содержит микропримеси Rh, Sn, Sb и Те, периодически — Au и Cu. Отдельные кристаллы сперрилита содержат до 0,9 масс. % Se [Spiridonov, et al., 2016]. Зональные по составу кристаллы редки, их центральные зоны обогащены сурьмой, заимствованной из замещенного геверсита. Это характерно для небольших кристаллов, крупные же по составу близки к $PtAs_2$.

Сперрилит распределен крайне неравномерно. Максимальное его количество находится в экзоконтактах жил эвтектических руд. В Главной Хараелахской залежи у ее кровли возле мощной жилы эвтектических руд встречены скопления сперрилита с поперечником до 120 см (наблюдения Э.А. Кулагова в 1970-е годы, устное сообщение). В той же ситуации С.Н. Беляков в 1990-е годы наблюдал гнездо сперрилита размером 30×20×20 см, состоящее из нескольких кристаллов длиной 3–4 см и многих десятков кристаллов длиной до 1,5 см (устное сообщение). Это были находки на верхних горизонтах –330–430 м Главной Хараелахской залежи Октябрьского месторождения. В 2018 г. С.Н. Беляков наблюдал в той же ситуации скопление кристаллов сперрилита с поперечником около 25 см на горизонте минус 710 м (устное сообщение). Это — возможное свидетельство продолжения Главной Хараелахской залежи на существенную глубину.

Значительно реже небольшие метакристаллы сперрилита и их сростания развиты среди сульфидных руд пентландит-пирротинового состава. В таких рудах А.Д. Генкин установил включения единичных мелких кубовидных кристаллов холингвортита в сперрилите [Генкин, 1068]. Сперрилит из сростания с холингвортитом содержит неболь-

Таблица

Химический состав (масс. %) сперрилита (№ 1–2) и холингвортита (№ 3–7) сростаний в магматогенных пентландит-пирротиновых рудах Норильского (№ 1, 3) и Байкальского (№ 2, 4–7) месторождений

№ анализов	1	2	3	4	5	6	7
Pt	55,68	56,28	10,31	4,56	4,57	нпо	нпо
Rh	0,39	0,40	32,21	40,39	39,92	42,71	43,89
Ru	нпо	нпо	4,89	нпо	нпо	нпо	нпо
Ir	нпо	нпо	4,23	1,79	0,90	0,96	0,98
Co	нпо	нпо	нпо	1,10	1,65	2,36	2,02
Ni	нпо	нпо	нпо	1,10	0,82	1,18	1,15
Fe	нпо	нпо	нпо	0,52	0,53	0,56	0,55
As	43,05	42,52	33,34	35,01	34,66	36,71	35,99
Sb	нпо	2,32	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
S	нпо	нпо	14,13	14,83	14,98	16,19	15,56
Se	0,81	нпо	0,34	нпо	0,37	0,79	0,77
Сумма	99,93	101,52	99,45	99,30	98,40	99,31	100,91
Число атомов в формуле							
Pt	0,985	0,985	0,12	0,05	0,05	–	–
Rh	0,015	0,015	0,71	0,84	0,83	0,83	0,87
Ru	–	–	0,11	–	–	–	–
Ir	–	–	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
Co	–	–	–	0,04	0,06	0,08	0,07
Ni	–	–	–	0,04	0,03	0,04	0,04
Fe	–	–	–	0,02	0,02	0,02	0,02
Сумма	1,00	1,00	0,99	1,01	1,00	0,99	1,01
As	1,965	1,935	1,01	1,00	0,99	0,98	0,98
Sb	–	0,065	–	–	–	–	–
S	–	–	0,99	0,99	1,00	1,01	0,99
Se	0,035	–	0,01	–	0,01	0,02	0,02
Сумма	2,00	2,00	2,01	1,99	2,00	2,01	1,99
Сумма	3						

Примечание. нпо — ниже предела обнаружения. Os, Au, Ag, Cu, Sn, Bi, Те не обнаружены.

шие примеси родия и селена, его состав отвечает $(Pt_{0.985}Rh_{0.015})_1(As_{1.965}Se_{0.035})_2$ (ан. № 1, таблица). Размер кристаллов холингвортита варьирует от 3–5 мкм (преобладают) до 15–20, изредка до 40 мкм. Холингвортит существенно более твердый минерал, чем сперрилит, поэтому отчетливо более рельефный. Минерал изотропный, отражение заметно ниже, чем у сперрилита. Норильский холингвортит обогащен Pt (~10 масс. %), содержит существенные количества Ru (~5 масс. %) и Ir (~4 масс. %), которые изоморфно замещают Rh; небольшая часть S замещена Se (ан. № 3, таблица). Состав норильского холингвортита отвечает $(Rh_{0.71}Pt_{0.12}Ru_{0.11}Ir_{0.05})_{0.99}As_{1.01}S_{0.99}Se_{0.01}$.

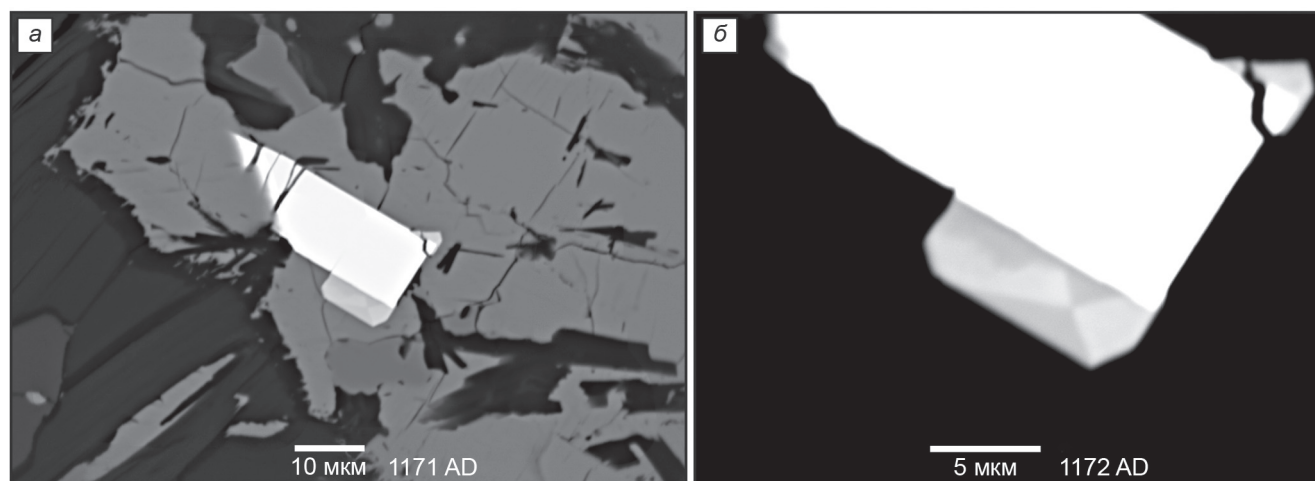


Рисунок. Густо вкрапленные магматогенные пентландит-пирротиновые руды Байкальского месторождения. Срастание метакристаллов сперрилита (белый) и холингвортита (светло-серый) в гнезде пирротина (серый) с множеством включений пластин хлорсодержащего флогопита. Трещины в сперрилите заполнены эпоксидной смолой (черное). Справа — деталь. Кристалл холингвортита секториальный. Холингвортит более светлых секторов содержит Pt (ан. № 4-5, таблица). Холингвортит более темных секторов не содержит Pt (ан. № 6-7, таблица). В отраженных электронах

Таким образом, минерал по составу практически стехиометричен.

Сперрилит и холингвортит Байкальского месторождения. Сперрилит в кристаллах размером от первых мкм до 1–3 мм в существенно халькопиритовых рудах Байкальского месторождения и связанных с ними россыпях реки Ондоко установлен Л.Н. Качаровской [Качаровская, 1986] и Д.А. Орсоевым [Орсоев и др., 2003]. Автором в густо вкрапленных пентландит-пирротиновых рудах Байкальского месторождения обнаружены срастания мелких метакристаллов сперрилита и холингвортита (рисунок). Сперрилит из срастания с холингвортитом содержит небольшую примесь Rh и заметную Sb (ан. № 2, таблица); состав данного сперрилита отвечает $(\text{Pt}_{0.985}\text{Rh}_{0.015})_1(\text{As}_{1.935}\text{Sb}_{0.065})_2$. Метакристаллы холингвортита секториально-зональные (рисунок). Октаэдрические секторы роста обогащены платиной — в них холингвортит содержит ~4,5 масс. % Pt, 1–2 масс. % Ir, примеси Co, Ni, менее Fe, немного Se (ан. № 4, 5, таблица), в отраженных электронах они более светлые; их составу отвечает формула — $(\text{Rh}_{0.83-0.84}\text{Pt}_{0.05}\text{Ir}_{0.01-0.02}\text{Co}_{0.04-0.06}\text{Ni}_{0.03-0.04}\text{Fe}_{0.02})_{1-1.01}\text{As}_{0.99-1}\text{S}_{0.99-1}\text{Se}_{0-0.01}$.

Тетраэдрические секторы роста холингвортита бедны платиной, содержат ~1 масс. % Ir, до 2,5 масс. % Co, менее Ni, Fe, Se (ан. № 6, 7, таблица), в отраженных

электронах они более темные, их составу отвечает формула — $(\text{Rh}_{0.83-0.87}\text{Ir}_{0.01}\text{Co}_{0.07-0.08}\text{Ni}_{0.04}\text{Fe}_{0.02})_{0.99-1.01}\text{As}_{0.99}\text{S}_{0.99-1.01}\text{Se}_{0.02}$.

Выводы. Метакристаллы сперрилита в магматогенных пентландит-пирротиновых рудах Норильского и Байкальского месторождений являются продуктами взаимодействия флюидов, обогащенных As и Pt, с пирротинном, который обогащен Rh, в меньшей степени Ru и Ir. Очевидно, что эти же флюиды извлекли Rh (и Ru, и Ir) из твердого раствора пирротина. В результате возникли срастания пневматолитовых сперрилита и холингвортита, который в различной степени обогащен Pt, Ru и Ir.

Благодарности. Автор благодарен А.А. Арискину и Е.В. Кислову, организовавшим экспедиционные работы на Йоко-Довыренском плутоне и Байкальском месторождении; Н.Н. Коротаевой — за высокое качество анализов минералов, А.Г. Мочалову и Г.С. Николаеву — за конструктивные замечания по тексту статьи.

Финансирование. Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ кафедры минералогии геологического факультета МГУ, с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балмасова Е.А., Смольская Л.С., Лопатина Л.А. и др. Самородный осмий и иридосмин Гулинского массива // Докл. РАН. 1992. Т. 323. С. 748–751.

Бегизов В.Д., Завьялов Е.Н., Хвостова В.П. Минералы лаурит — эрлихманитовой и холингвортит — ирарситовой серий уральских россыпей // Зап. ВМО. 1976. Ч. 101. С. 112–118.

Высоцкий Н.К. Месторождения платины Исковского и Нижне-Тагильского районов на Урале // Тр. Геол. ком. Новая серия. Вып. 62. СПб., 1913. 694 с.

Генкин А.Д. Минералы платиновых металлов и их ассоциации в медно-никелевых рудах Норильского месторождения. М.: Наука, 1968. 106 с.

Годлевский М.Н. Магматические месторождения // Генезис эндогенных месторождений. М.: Недра, 1968. С. 7–83.

Евстигнеева Т.Л., Ким А.А., Некрасов И.Я. О дегарсенизации сперрилита в природе // Минерал. ж. 1990. Т. 12, № 3. С. 90–96.

- Изох А.Э., Майорова О.Н. Родийсодержащий сперрит из Номгонского комплекса (Монголия) // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. С. 1212–1215.
- Качаровская Л.Н. Сульфидные медно-никелевые руды Йоко-Довыренского расслоенного плутона (состав и условия образования): Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Улан-Удэ, 1986. 180 с.
- Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Павлов Е.Г. О распаде природного твердого раствора в системе PbS — PbTe // Упорядоченность и распад твердых растворов в минералах. М.: Наука, 1979. С. 185–190.
- Кулагов Э.А. Особенности минерального состава руд месторождения Норильск-I: Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1968. 239 с.
- Мочалов А.Г. Замечательные минералы платины массива Кондёр (Хабаровский край) // Минералогический альманах. Т. 23, вып. 3. 2019. 117 с.
- Мочалов А.Г. Новый осмиево-платиновый минерально-геохимический тип зональных габбро-пироксенит-дунитовых массивов на юге Корякского нагорья (Россия) // Докл. РАН. 2009. Т. 426, № 2. С. 226–231.
- Назимова Ю.В., Зайцев В.П., Мочалов А.Г. Минералы платиновой группы габбро-пироксенит-дунитового массива Гальмознан южной части Корякского нагорья // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45, № 6. С. 547–565.
- Орсове Д.А., Рудаевский Н.С., Крейцер Ю.Л., Конников Э.Г. Благороднометаллическая минерализация малосульфидного оруденения в Йоко-Довыренском расслоенном массиве // Докл. РАН. 2003. Т. 390, № 4. С. 233–237.
- Рудаевский Н.С., Мочалов А.Г., Бегизов В.Д. и др. Ингалиит $PbCu_3(Ir,Pt)_6S_{16}$ — новый минерал // Зап. ВМО. 1984а. Ч. 113. С. 712–717.
- Рудаевский Н.С., Мочалов А.Г., Трубкин Н.В. и др. Кондёрит $Cu_3Pb(Rh,Pt,Ir)_8S_{16}$ — новый минерал // Зап. ВМО. 1984б. Ч. 113. С. 703–712.
- Спиридонов Э.М. Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. К 120-летию М.Н. Годлевского // Отечественная геология. 2022. № 6. С. 95–116.
- Спиридонов Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. С. 1356–1378.
- Спиридонов Э.М., Беляков С.Н., Янакурт В.О., Коротаева Н.Н. Норильское рудное поле: прямое доказательство пневматолитового генезиса минералов палладия в сплошных сульфидных рудах // Новые идеи в науках о Земле. 2019. Т. II. С. 380–383.
- Спиридонов Э.М., Голубев В.Н., Гриценко Ю.Д. Изотопный состав свинца галенита, алтаита и интерметаллидов палладия сульфидных руд Норильского рудного поля // Геохимия. 2010. Т. 55, № 8. С. 867–875.
- Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Куликова И.М. Платинисто-палладистый тетрааурикуприд и ассоциирующие минералы в рудах месторождения Норильск-I // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45, № 3. С. 267–277.
- Спиридонов Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А. и др. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 5. С. 447–476.
- Степанов В.К., Туровцев Д.М. Многофакторные модели медно-никелевых месторождений норильского типа // Тр. ЦНИГРИ, 1988. Вып. 223. С. 86–94.
- Barkov A., Alapieti T., Laajoki K. Osmian hollingworthite and rhodian cobaltite — gersdorffite from the Lukkulaivaa layered intrusion, Russian Karelia // Mineral. Mag. 1996. Vol. 60. P. 973–978.
- Barkov A.Y., Fleet M.E. An unusual association of hydrothermal platinum-group mineral from the Imandra layered complex, Kola peninsula, NW Russia // Canad. Mineral. 2004. Vol. 42. P. 455–467.
- Botelho N.F., Moura M.A., Peterson R.C., et al. Kalungaite, $PdAsSe$, a new platinum-group mineral from the Buraco do Ouro gold mine, Calacante, Goi'as State, Brazil // Mineral. Mag. 2006. Vol. 70. P. 123–130.
- Cabri L.J., Laflamme J.H.G., Stewart J.M. Platinum-group minerals from Onverwacht. II. Platarsite, a new sulfoarsenide of platinum // Canad. Mineral. 1977. Vol. 15. P. 385–388.
- Dare S.A.S., Barnes S.-J., Prichard H.M., Fisher P.C. The timing and formation of platinum-group minerals from the Creighton Ni-Cu-PGE sulfide deposit, Sudbury, Canada: early crystallization of PGE-rich sulfarsenides // Econ. Geol. 2010. Vol. 105. P. 1071–1100.
- Gervilla F., Papunen H., Kojonen K. Pt-, Pd- and Au-rich arsenide from the Kylmäkoski Ni-Cu deposit (Vammala Nickel Belt, SW Finland) // Mineral. Petrol. 1998. Vol. 64. P. 163–185.
- Johan Z., Ohnenstetter M., Slansky E. Platinum mineralization in the Alaskan-type intrusive complexes near Fifield, New South Wales, Australia. 1. Platinum-group minerals in clinopyroxenites of the Kelvin Grove Prospect, Owendale intrusion // Mineral. Petrol. 1989. Vol. 40. P. 289–309.
- Kinloch E.D., Peyerl W. Platinum-group minerals in various rock types of the Merensky Reef: genetic implications // Econ. Geol. 1990. Vol. 85. P. 537–555.
- Malitch K.N., Merkle R.K.W. Ru-Os-Ir-Pt and Pt-Fe alloy from the Evander goldfield, Witwatersrand basin, South Africa: detrital origin inferred from compositional and osmium-isotope data // Canad. Mineral. 2004. Vol. 42. P. 631–650.
- Moreno T., Prichard H.M., Lunar R. et al. Formation of a secondary platinum-group mineral assemblage in chromitites from the Herbeira ultramafic massif in Cabo Ortegal, NW Spain // Eur. J. Mineral. 1999. Vol. 11. P. 363–378.
- Mostert A.B., Hofmeyr P.K., Potgieter G.A. The platinum group mineralogy of the Merensky Reef at the Impala platinum mines, Bophuthatswana // Econ. Geol. 1982. Vol. 77. P. 1385–1394.
- Naldrett A.J. Magmatic sulfide deposits. Geology, geochemistry and exploration. Berlin; Heidelberg; N.Y.: Springer, 2004. 727 p.
- Ohnenstetter D., Watkinson D.H., Dahl R. Zoned hollingworthite from the Two Duck Lake intrusion, Coldwell complex, Ontario // Amer. Mineral. 1991. Vol. 76. P. 1694–1700.
- Olivo G.R., Theyer P. Platinum-group minerals from the McBratney PGE-Au prospect in the Flin Flon greenstone belt, Manitoba, Canada // Canad. Mineral. 2004. Vol. 42. P. 667–681.
- Prichard H.M., Ixer R.A., Lord R.A., et al. Assemblages of platinum-group minerals and sulfides in silicate lithologies and chromite-rich rocks within the Shetland ophiolite // Canad. Mineral. 1994. Vol. 32. P. 271–294.
- Seabrook C.L., Prichard H.M., Fisher P.C. Platinum-group minerals in the Raglan Ni-Cu sulfide deposit, Cape Smith, Quebec, Canada // Canad. Mineral. 2004. Vol. 42. P. 485–497.
- Spiridonov E.M., Orsoev D.A., Ariskin A.A., et al. Germanium-rich palladium minerals — palladogermanide Pd_2Ge , Ge-paolovite $Pd_2(Sn, Ge)$, zvyagintsevite — in sulfide-bearing anorthosites of the Yoko-Dovyren pluton, Baikal region // Geochemistry International. 2019a. Vol. 57, N 5. P. 600–603.
- Spiridonov E.M., Orsoev D.A., Ariskin A.A., et al. Hg- and Cd-bearing Pd, Pt, Au and Ag minerals in sulfide-bearing mafic and ultramafic rocks of the Yoko-Dovyren pluton in Baikalides

of the Northern Baikal region // *Geochemistry International*. 2019b. Vol. 57, N 1. P. 42–55.

Spiridonov E.M., Serova A.A., Kulikova I.M., Zhukov N.N. Metamorphic-hydrothermal Ag-Pd-Pt mineralization in the Norilsk sulfide ore deposit, Siberia // *Canad. Mineral*. 2016. Vol. 54. P. 429–452.

Stumpfl E.F., Clark A.M. Hollingworthite, a new rhodium mineral identified by electronprobe microanalysis // *Amer. Mineral*. 1965. Vol. 50. P. 1068–1074.

Szymanski J.T. The crystal structure of platarsite, $\text{Pt}(\text{As,S})_2$, and a comparison with sperrylite, PtAs_2 // *Canad. Mineral*. 1979. Vol. 17. P. 117–123.

Tarkian M., Koopmann G. Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Philex) porphyry copper-gold deposit,

Luzon Island, Philippines // *Mineral. Deposita*. 1995. Vol. 30. P. 39–47.

Tarkian M., Prichard H.M. Irarsite-hollingworthite solid solution series and other associated Ru-, Os-, Ir- and Rh-bearing PGM from the Shetland ophiolite complex // *Mineral. Deposita*. 1987. Vol. 22. P. 178–184.

Wagner P.A., Mellor E.T. On platinum bearing hortonolite dunite of the Lydenburg district, Transvaal // *Trans. Geol. Soc. South Africa*. 1925. Vol. 28. P. 1–18.

Wells H.H. Sperrylite, a new mineral // *Amer. J. Sci.* 1889. Vol. 37. P. 67–70.

Статья поступила в редакцию 02.04.2025,
одобрена после рецензирования 23.05.2025,
принята к публикации 30.10.2025