



Метакристаллы и метасомы сперрилита в сульфидных рудах месторождений Норильского рудного поля

Спиридонов Э.М.^{1,2}, Беляков С.Н.³, Кулагов Э.А.³,
Машкина А.А.¹, Иванова Ю.А.¹, Егоров К.В.¹, Коротаева Н.Н.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ernstspiridon@gmail.com

²Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва

³Норильский горно-металлургический комбинат им. А.П. Завенягина

Сульфидные руды Норильского рудного поля знамениты самыми крупными в мире кристаллами сперрилита. Размер его метакристаллов изменяется от первых микрон до 4–7 см, двойников – до 14–21 см, скоплений кристаллов – до нескольких десятков см. Распространены и прожилки сперрилита различной морфологии. Сперрилит распределен крайне неравномерно. Максимальное его количество развито в экзоконтактах жил эвтектических галенит–халькопиритовых (-талнахитовых, -моихукитовых) руд и среди них. Сперрилит – наиболее поздний из пневматолитовых минералов Pd, Pt, Au, Ag. Границы его кристаллов секут все типы первичных сульфидных минералов и магнетит, паоловит, таймырит – татьянит, фрудит, алтait, соболевскит, нигглиит, гессит, атокит – рустенбургит, инсизвайт, геверсит, тетраферроплатину, станнопалладинит, плюмбопалладинит, мончеит, меньшиковит, электрум – кюстелит – Au-серебро, минерал Pd₄SnSb, налдреттит... Состав крупных кристаллов сперрилита и большинства небольших близок к PtAs₂ с малой примесью, < 0.5 мас.%, Sb, Rh, Bi, Sn. Среди метакристаллов малого размера немало тех, которые содержат 1–2 мас.% Sb. В рудах, богатых минералами Sb, развит сурьмянистый сперрилит. С ростом сурьмянистости сперрилита в нем обычно заметно повышается содержание олова. Состав норильского сперрилита стехиометричен; вариации его состава – (Pt_{0.98–1.01}Rh_{0–0.015})_{0.99–1.01}(As_{1.99–1.58}Sb_{0–0.36}Sn_{0–0.07}Se_{0–0.05}Bi_{0–0.035})_{1.99–2.01}. Содержание изоморфных примесей достигает (мас.%): Sb 11.8: Bi 2.1; Sn 2.0; Se 1.2; Rh 0.5. Сперрилит возник преимущественно в сульфидных рудах, гораздо реже в силикатных породах при воздействии на них флюидов, богатых Pt и As. В тех редких случаях, когда сперрилит развит в пирротиновых рудах, обогащенных Rh, со сперрилитом ассоциирует сульфоарсенид родия холингвортит. Sb и Sn в норильском сперрилите заимствованы из замещенных пневматолитовых минералов, богатых этими химическими элементами. Селенсодержащий сперрилит обычно развит среди графических руд, галенит которых содержит заметное количество Se. Рентгенограмма и параметр элементарной ячейки беспримесного норильского сперрилита $a_0 = 5.967 (2)$ Å отвечает эталонному значению. В ходе эпигенетического низкоградного метаморфизма в условиях пренит-пумпеллиитовой фации местами на сперрилите возникли каемки замещения платины.

Ключевые слова: пневматолитовые сперрилит и сурьмянистый сперрилит, сульфидные руды, Норильское рудное поле.

Сульфидные руды месторождений Норильского рудного поля знамениты самыми крупными в мире кристаллами сперрилита, срастания которых достигают десятков см. Ниже описано распределение сперрилита в этих рудах, морфология и размер его кристаллов, особенности их химического состава.

Сперрилит

Кубический диарсенид платины сперрилит PtAs_2 открыт в рудах месторождения Садбери [Wells, 1889]. Это один из распространенных минералов Pt. Кристаллами сперрилита размером до 2.5 см славились пегматоидные гортонолитовые дуниты трубок Дрикоп, Онвервахт и Моихук в Бушвелдском интрузиве [Wagner, Mellor, 1925]. Магматогенные сульфидные руды Главной Хараэлахской залежи Октябрьского месторождения Норильского рудного поля содержат метакристаллы сперрилита длиной до 4–7 см, кристаллы-двойники длиной до 11–21 см, срастания кристаллов (метакристаллов) сперрилита до лесятков см [Спиридонов и др., 2015]. В магматических малосульфидных (Бушвелд...) и сульфидных месторождениях (Норильск, Садбери...) развиты метакристаллы сперрилита, заместившие продукты распада высокотемпературных сульфидных твердых растворов – пирротин, троилит, пентландит, халькопирит, кубанит, талнахит, моихукит, пуроранит, магматогенные куперит PtS и брэггит $\text{Pd}(\text{Pt},\text{Pd},\text{Ni})_3\text{S}_4$, интерметаллиды Pt-Fe [Wagner, Mellor, 1925; Генкин, 1968; Кулагов, 1968; Cabri et al., 1977; Генкин и др., 1981; Mostert et al., 1982; Johan et al., 1989; Евстигнеева, Генкин, 1990; Kinloch, Peyerl, 1990; Поляков и др., 1999; Naldrett, 2004; Спиридонов, 2010, 2019, 2022, 2025; Spiridonov, Serova, 2018; Спиридонов и др., 2020], магнетит; по нашим данным, генезис такого сперрилита – пневматолитовый [Спиридонов, 2010]; состав этого сперрилита обычно близок к теоретическому; значительно реже минерал содержит заметную примесь Sb [Поляков и др., 1999; Спиридонов, 2019]. Изредка в малосульфидных рудах месторождений Урало-Аляскинского типа развит полный изоморфный ряд сперрилита PtAs_2 – геверсит PtSb_2 [Johan et al., 1989]. Сперрилит – характерный аксессорный минерал гидротермальных плутоногенных Au-Mo-Cu-порфировых месторождений [Tarkian, Koopmann, 1995], эпимеральных 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 благородных металлов. В золотоносных конгломератах Витватерсранда, метаморфизованных в условиях пумпеллиит-актинолитовой фации до фации голубых сланцев, сперрилит слагает каймы замещения на окатанных зернах ферроплатины [Malitch, Merkle, 2004] (источник As – прослои пи-

ритоносных черных сланцев). В рудах, метаморфизованных в условиях от фации зеленых сланцев до амфиболитовой и гранулитовой, сперрилит обычно ассоциирует с арсенидами и сульфоарсенидами Ni-Co-Fe: кобальтином, маухеритом... [Cabri et al., 1977; Gerville et al., 1998; Barkov, Fleet, 2004; Olivo, Theyer, 2004; Seabrook et al., 2004; Dare et al., 2010]. В высокоградно метаморфизованных рудах развит и сернистый сперрилит: твердый раствор сперрилита – платарсит PtAsS [Cabri et al., 1977; Barkov, Fleet, 2004], кристаллические структуры которых сходны [Szimanske, 1979]. В высокоградно метаморфизованных рудах развит и родиево-сернистый сперрилит, вплоть до состава $\text{Pt}_{0.8}\text{Rh}_{0.2}\text{As}_{1.5}\text{S}_{0.5}$ [Barkov, Fleet, 2004], это твердый раствор сперрилита и холингвортита RhAsS . Более распространен парагенез сперрилита и холингвортита [Olivo, Theyer, 2004; Seabrook et al., 2004]. Такой парагенез развит и в рудах не метаморфизованных месторождений [Генкин, 1968; Спиридонов, 2025]. В норильских рудах, метаморфизованных в условиях пренит-пумпеллиитовой фации, новообразований сперрилита нет [Spiridonov et al., 2016].

Норильское рудное поле

Норильское рудное поле расположено в северо-западном углу дориевой Восточно-Сибирской платформы, в области краевых дислокаций [Годлевский, 1959, 1968; Степанов, 1981; 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 габронорит-долеритов норильского типа, производных трапповой формации P_2T_1 [Годлевский, 1959; Кулагов, 1968; Генкин и др., 1981; Степанов, 1981; Степанов, Туровцев, 1988]. Магматические сульфиды слагают вкрапленность в интрузивных породах, шлиры, жилы и залежи. 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 [Спиридонов и др., 2010]; все талнахские заметно более радиогенные. Это свидетельствует о генетических связях минералов Pd и Pt с сульфидными рудами и руд – с конкретными интрузивами.

Сульфидные залежи

Поскольку температура кристаллизации сульфидных расплавов ниже, а плотность выше, чем у силикатных, при остывании рудоносных интрузивов значительная часть сульфидных расплавов была выжата в их нижние части и под интрузивы, при этом были сформированы многочисленные сульфидные залежи, в том числе знаменитая круп-

нейшая. Главная Хараэлахская сульфидная залежь размером $\sim 3000 \times 1000 \times (5\text{--}75)$ м субширотного простирания размещена в нижней части и главным образом под Хараэлахским интрузивом норильского типа. Это крупнейшее месторождение Pd на Земле, богатое и Pt, Au, Ag. Низы залежи и ее периферические части сложены скоплениями кристаллов MSS1, MSS2, заметно обогащенных серой; температура их кристаллизации ~ 1150 и ~ 1100 °C; среди продуктов их субсолидусных превращений преобладает сернистый моноклинный пирротин Fe_7S_8 [Спиридов, 2019, 2022]. Поэтому остальная часть залежи – центр и ее верхние части, – помимо кристаллов MSS1, MSS2, сложены скоплениями кристаллов ISS1, ISS2, ISS3, ISS4, ISS5, недосыщенных серой; температура их кристаллизации от ~ 950 до ~ 760 °C; среди продуктов их субсолидусных превращений наряду с халькопиритом, кубанитом, пентландитом обильны минералы группы халькопирита, недосыщенные серой: талнахит $\text{Cu}_{18}\text{Fe}_{16}\text{S}_{32}$, моихукит $\text{Cu}_{18}\text{Fe}_{18}\text{S}_{32}$, путоранит $\text{Cu}_{17}(\text{Fe},\text{Ni})_{18}\text{S}_{32}$ [Генкин и др., 1981; Спиридов, 2019, 2022; Спиридов и др., 2022]. Размер кристаллов ISS3 в центре Главной Хараэлахской залежи составляет до 35 см, кристаллов ISS4 и ISS5 в прикровельной части залежи – до 15 см, размер кристаллов пентландита (продукта распада ISS4 – ISS5) – до 6 см. При кристаллизации высокотемпературных сульфидных твердых растворов благородные металлы были включены в эти твердые растворы; при этом Rh, Ru, Os, Ir – MSS-совместимые, Pt, Pd, Au, Ag – ISS-совместимые [Naldrett, 2004]. Соответственно существенно пирротиновые руды не должны были бы содержать заметное количество минералов платины и палладия, а их там местами много, в частности сперрилита. Это свидетельствует о флюидном перераспределении благородных металлов при формировании их минералов.

Уникальная особенность норильских руд – наличие поздних легкоплавких (T крист. ~ 550 °C) эвтектик PbSSS – ISS5 (или ISS4, ISS3) [Спиридов, 2019; Спиридов и др., 2015]. Сульфидные руды – эвтектические срастания – слагают гнезда и секущие жилы нескольких поколений мощностью от первых см 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. Значительное число таких гнезд и жил развиты в прикровельной части Главной Хараэлахской залежи. Причина их появления – обилие калия и когерентного свинца в норильских рудно-магматических системах [Спиридов, 2010]. Продукты субсолидусных превращений PbSSS – матрица галенита и тельца распада алтита; судя по составу продуктов распада, температура распада отвечала 425–415 °C [Коваленкер и др., 1979]. Сульфидные

руды – эвтектические срастания PbSSS – ISS – экстремально богаты Pd, Pt, Ag, Au и их минералами [Спиридов, 2010, 2022; Спиридов и др., 2015, 2020, 2022]. Во многих рудных столбах Главной Хараэлахской залежи преобладающая часть минералов платиновых металлов и золота-серебра находится в гнездах и жилах эвтектических руд либо у контакта таких жил.

Норильские сульфидные расплавы были богаты флюидами (H_2O , K, Cl, F, CO, COS, CH_4 , P, Ba, Tl...). Каждое тело магматических сульфидов окружено ореолом флюидного воздействия из агрегатов титанистого биотита-флогопита, хлорапатита, фторапатита, амфиболов, ангидрита, магнетита или титаномагнетита, джерфишерита [Годлевский, 1968; Кулагов, 1968; Генкин и др., 1981; Спиридов, 2010; Спиридов и др., 2015, 2019; Серова, Spiridonov, 2018; Spiridonov et al., 2018]. Масштаб ореола коррелирован 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 сульфидных тел. Так, в 6 м выше кровли Главной Хараэлахской залежи среди роговиков в гнезде Ti-биотита и хлорсодержащего паргасита без сульфидов нашли 8-мм кристалл сперрилита [Спиридов, 2019].

Для норильских руд типичны соотношения Pd:Pt = 3:4, Ag:Au = 30:40. Преобладающая часть Pd, Pt, Au, Ag в норильских рудах представлена собственными минералами часто микронного размера. Часть Pd и Ag рассеяна в пентландите.

Пневматолитовые минералы Pd, Pt, Au, Ag, Rh сульфидных руд Норильского рудного поля

Несмотря на то что изучение минералов благородных металлов в норильских рудах многие десятилетия проводили О.Е. Звягинцев, Е.В. Искьюль, И.Н. Масленицкий, Э.А. Кулагов, А.Д. Генкин, И.В. Муравьёва, В.Д. Бегизов, Т.Л. Евстигнеева, С.Ф. Служеникин, Л.Н. Вяльсов, В.А. Коваленкер, А.Ю. Барков, О.Е. Юшко-Захарова, А.И. Пономаренко, Н.С. Рудашевский, А. Вимазалова, Э.М. Спиридов, Н.С. Горбачёв и иные исследователи, мы только начинаем понимать реально сложную и длительную историю их формирования. Большинство геологов считают минералы благородных металлов норильских руд продуктами магматической кристаллизации. Уже в 1968 г. А.Д. Генкин показал, что часть этих минералов возникла в послемагматических процессах при участии флюидов [Генкин, 1968]. В дальнейшем многие исследователи доказали, что часть минералов благородных металлов – метакристаллы [Кулагов, 1968; Коваленкер и др., 1979; Генкин и др., 1981 и др.]. Наши

наблюдения показали, что вся масса минералов благородных металлов норильских руд образована путем замещения магматических сульфидных руд и прилегающих пород, эти минералы замещали структуры распада галенит – алтант, при этом галенит очищался от тела алтантита, с метасомами этих минералов ассоциируют метасомы алтантита и метасомы хлорсодержащих сульфидов К-Tl джерфишерита и талфенисита [Спиридов и др., 2003, 2010, 2019, 2022; Спиридов, 2010, 2019, 2022; Spiridonov et al., 2018]. Эти факты – прямое доказательство флюидно-метасоматического, пневматолитового генезиса минералов Pd, Pt, Au, Ag в норильских сульфидных рудах. Пневматолитовые минералы Pd и Pt – интерметаллиды: станинды, висмутиды, куприды-станинды, плюмбиды и близкие теллуриды, арсениды, антимониды. С ними ассоциируют минералы Au-Cu и Au-Ag. В рудах присутствует когенит. Таким образом, пневматолитовые минералы благородных металлов возникли в резко восстановительных условиях, при крайне низкой активности сульфидной серы и кислорода, вероятно, при участии карбонилов (и/или фуллеридов) платиновых металлов при T менее 415–410 °C, это T распада PbSs [Коваленкер и др., 1979] и верхний предел устойчивости тетрааурикуприда, ассоциирующего со многими минералами Pd и Pt [Спиридов и др., 2003].

Э.М. Спиридов разделил историю образования минералов благородных металлов первичных норильских руд на семь стадий [Спиридов, 2022, 2025].

Пневматолитовые минералы Pd и Pt 1-й стадии – метакристаллыprotoинтерметаллидов Pt и Pd, содержащие до 3–8 мас.% Au. Их сопровождает алтант PbTe, заместивший часть галенита эвтектических руд. Установлено девять типов protoинтерметаллидов – вероятно, кубических твердых растворов, реконструированных по структурам распада: (1) на основе изоферроплатины Pt₃Fe, (2) на основе ферроплатины Pt₂Fe, (3) срастания интерметаллида Pt на основе тетраферроплатины PtFe и интерметаллида Pd на основе атокита (Pd,Pt,Au)₃(Sn,Pb), (4) на основе состава паоловита Pd₂Sn, (5) на основе состава паоловита Pd₂Sn и минерала Pd₄SnSb, (6) на основе состава минерала Pd₄SnSb, (7) на основе состава минерала Pd₄SnSb и налдреттита Pd₂Sb, (8) на основе состава соболевского Pd(Bi,Te), (9) на основе мончейита (Pt,Pd)_(Bi,Te). Состав protoинтерметаллидов 4–8-го типов эквиатомный \approx (Pd,Pt,Au,Ag)₁(Sn,Sb,Bi,Te,Pb,As)₁. Protoинтерметаллиды Pd и Pt в норильских рудах ранее не описывались.

Пневматолитовые минералы Pd и Pt 2-й стадии – продукты полиморфных превращений и распада твердых растворов protoинтерметал-

лидов, а также новообразованные интерметаллиды Pt и Pd. Некоторые из них содержат до 6 мас.% Au. Распространены минералы Pt-Fe: в рудах с сернистым пирротином изоферроплатина Pt₃Fe, в рудах с железистым пирротином ферроплатина Pt₂Fe, в рудах с троилитом тетраферроплатина Pt₂Fe(Fe,Ni,Cu). Итак, состав минералов Pt-Fe определяло наличие «реакционно способного» Fe. Типичны зональные кристаллы рустенбургита (Pt,Pd)₃Sn – атокита (Pd,Pt)₃Sn. Заметная часть паоловита возникла при превращении предположительно кубическихprotoинтерметаллидов эквиатомного состава в ромбический паоловит (в виде классических перекрещивающихся двойников полиморфного перехода) с включениями ламелей распада Sb- и Te-Sb-инсизванта PtBi₂, Bi-геверсита PtSb₂, мончейита PtTeBi, тело распада ниггелиита PtSn. Ориентировка ламелей распада особая в каждом блоке – двойнике полиморфного перехода паоловита. Распространен двухстадийный распад твердого раствора, что коррелируется с гипабиссальными условиями становления норильских плутоногенных месторождений. Паоловит I богат Pt и Sb. Минерал Pd₄SnSb I – распространенный минерал норильских руд. Налдреттит Pd₂Sb I более редок, для него, как для паоловита и минерала Pd₄SnSb, характерен изоморфизм Sb – Sn.

Пневматолитовые минералы Pd и Pt 3-й стадии – продукты превращенийprotoинтерметаллидов Pt-Pd-Ag-Au и новообразованные тетраферроплатина II, зональные рустенбургит II – атокит II, зиягинцевит Pd₃Pb I; пластинчатые паоловит II, минерал Pd₄SnSb II, налдреттит II и стибиопалладинит Pd₅Sb₂; мончейит II, инсизвант II, геверсит II; соболевский 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. С пластинчатым паоловитом II ассоциирует, а также образует обособленные кристаллы гексагональный минерал Pd₄SnSb II. С паоловитом II нередко ассоциируют пластины стибиопалладинита.

Пневматолитовые минералы Pd, Pt, Au, Ag 4-й стадии – продукты замещения интерметаллидов 1, 2 и 3-й стадий. Это станинопалладинит, таймырит – татьянит; тонкопластинчатые срастания плюмбополярит + станинопалладинит + плюмбопалладинит + зиягинцевит и продукты их собирательной перекристаллизации; арсениды-станинды и арсениды-стибнайды Pd: паларстанид, Sb-паларстанид, минералы группы мертиита; продукты замещения пентландита: аргентопентландит, маякит, нипаларсит; тетраферроплатина; тетрааурикуприд, аурикуприд, томамаеит; интер-

металлиды Ag-Au-Cu-Pd-Pt. Их сопровождают джерфишерит и талфенисит. В отличие от предыдущих, для 4-й стадии характерно активное участие Cu и As в процессах минералогенеза. Наличие тетрааурикуприда и аурикуприда – свидетельство температур кристаллизации минералов 4-й стадии – < 390–410 °C.

Пневматолитовые минералы Pd, Pt, Au, Ag 5-й стадии. Их образованию предшествовала заметная деформация и частичная перекристаллизация более ранних минеральных агрегатов. Минералы 5-й стадии нередко слагают среди них прожилки. Характерные минералы 5-й стадии: фрудит $PdBi_2$, незональные минералы ряда Au – Ag и гессит Ag_2Te , с которыми ассоциируют монохалькогениды Pd и Pt: Тe-соболевскит, садберриит и котульскит, и дихалькогениды Pd и Pt: мончейт, масловит, майчнерит, арсениды Pd – меньшиковит и минералы группы мертиита, а также палладогерманид, алтант. Широко распространены незональные электрум, кюстелит, Au-серебро, часто в срастании с фрудитом.

Пневматолитовые минералы Pd, Pt, Au, Ag 6-й стадии – фрудит II, обычно в срастании со сложнозональными электрумом II (598–308%) – кюстелитом II (300–105%) – Au-серебром II (98–4%) ± алтант ± масловит III; алтант ± масловит III ± беспримесные геверсит IV и инсивзит IV; срастания паоловита IV и гессита III ± фрудит II; реакционные каймы кабриита вокруг раннего паоловита; реакционный туламинит (феррокупроплатина), замещающий томамаит. Характерны золотины с прямой, обратной, осцилляционной, сложной и очень сложной зональностью. Вариации состава золотин обусловлены колебаниями активности Te во флюидах.

Пневматолитовые минералы Pt, Rh 7-й стадии. Наиболее поздний пневматолитовый минерал благородных металлов норильских руд – сперрилит $PtAs_2$. В тех довольно редких случаях, когда метакристаллы сперрилита развиты в существенно пирротиновых рудах, обогащенных родием, в них включены мелкие кристаллы холингвортита $(Rh,Pt,Ru,Ir)AsS$ [Генкин, 1968; Спиридовонов, 2025].

Материалы и методы исследования

Коллекцию руд месторождений Норильского рудного поля собрали Э.М. Спиридовонов, С.Н. Беляков, Э.А. Кулагов при многолетнем изучении подземных выработок, карьеров, керна поисковых и разведочных скважин. Ряд интереснейших образцов передали Е.В. Середа, В.В. Бутенко, И.Н. Тушенцова, которым авторы сердечно благодарны.

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 им. М.В. Ломоносова на электронном сканирующем микроскопе JSM IT-500 (Jeol, Japan) с энергодисперсионным спектрометром X-MaxN (Oxford Instruments, GB), аналитик-исследователь Н.Н. Коротаева. Измерения проведены при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока электронного зонда 0.7 нА. Время накопления спектра 100 секунд. Систематическая погрешность измерения главных компонентов (более 10%) 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), алтата PbTe (Pb,Te), синтетических InAs (As) и CdSe (Cd, Se).

Сперрилит сульфидных руд месторождений Норильского рудного поля

Сперрилит распределен крайне неравномерно. Максимальное его количество находится в экзоконтактах жил эвтектических руд (рис. 1–4) и среди них особенно тех жил, которые развиты среди моихукитовых и талнахитовых руд.

В Главной Хараэлахской залежи у ее кровли возле мощной жилы эвтектических руд было встреченено скопление сперрилита с поперечником до 120 см (наблюдение Э.А. Кулагова в 1970-е годы). В той же ситуации С.Н. Беляков в 1990-е годы наблюдал гнездо размером 30 × 20 × 20 см,



Рис. 1. Метакристалл сперрилита (4 мм) на контакте жилы эвтектических руд (справа) и роговиков (слева). У верхнего контакта Главной Хараэлахской залежи. Горизонт –430 м. Колл. и фото Э.М. Спиридовона.

состоящее из серии кристаллов сперрилита длиной 3–4 см и многих десятков кристаллов длиной до 1.5 см. Это были находки на верхних горизонтах –330–430 м Главной Хараэлахской залежи Октябрьского месторождения. В 2018 г. С.Н. Беляков наблюдал в той же ситуации скопление кристаллов сперрилита с поперечником около 25 см на горизонте –710 м, но уже в центральной части этой залежи. Значительно реже и меньшего размера метакристаллы сперрилита и их срастания раз-

виты среди сульфидных руд существенно халько-пиритового и халькопирит-кубанитового состава. Они редки среди руд пентландит-пирротинового состава. Как правило, крупные, > 1–2 см, метакристаллы сперрилита, как и гнезда с поперечником 1.5–4 см с сотнями мелких метакристаллов сперрилита (часто это псевдоморфозы по галениту графических руд), развиты обособленно от скоплений иных пневматолитовых минералов Pd, Pt, Au, Ag.



Рис. 2. Скопление метакристаллов сперрилита в моиху-китовых рудах. 50 × 36 мм.
Экзоконтакт жилы эвтектических руд. Верхи Главной Хараэлахской залежи, гор. –430 м.
Колл. и фото Э.М. Спиридонова.



Рис. 3. Плоский метакристалл сперрилита длиной 47 мм в талнахит-моихукитовых рудах с массой мелких метакристаллов сперрилита. Экзоконтакт жилы эвтектических руд. Главная Хараэлахская сульфидная залежь, гор. –330 м.
Колл. Е.В. Середы, фото М.А. Богомолова.



Рис. 4. Гнездо метакристаллов сперрилита в крупнозернистых талнахит-моихукитовых рудах. 65 × 33 мм. Экзоконтакт жилы эвтектических руд. Верхи Главной Хараэлахской сульфидной залежи, гор. –530 м.
Колл. и фото Э.М. Спиридонова.

Сперрилит сульфидных руд – наиболее поздний из пневматолитовых минералов благородных металлов. Границы его кристаллов секут все типы первичных сульфидных минералов и магнетит, паоловит (рис. 5, 9, 10, 15, 17, 20), таймырит (рис. 5, 8, 11, 18), фрудит (рис. 5, 11), алтант (рис. 6, 23, 24), соболевскит (рис. 6, 9, 14), нигглийт (рис. 9), атокит – рустенбургит (рис. 8, 13), инсизвайт (рис. 10), геверсит (рис. 10, 20, 22–24), тетраферроплатину (рис. 12), станнopalладинит (рис. 12), плюмбопалладинит (рис. 12), мончейт (рис. 14, 17), гессит (рис. 14, 17), меньшиковит (рис. 16), электрум – кюстен-

лит – Au-серебро (рис. 17, 22), минерал Pd_4SnSb (рис. 22–24), налдреттит (рис. 23, 24).

Разнообразие форм кристаллов сперрилита в пределах участка 1 × 1 мм представляет рис. 17.

Такое разнообразие форм – классика для метакристаллов.

Состав крупных кристаллов сперрилита и большинства небольших близок к теоретическому $PtAs_2$ с малой примесью Sb, Rh, Bi, Sn (< 0.5 мас.%) (табл. 1). Среди метакристаллов малого размера немало тех, которые содержат 1–2 мас.% сурьмы.

Относительно более редок селенсодержащий

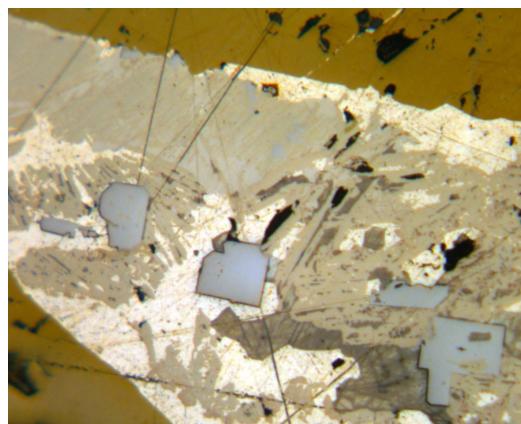


Рис. 5. Цепочка кубических и сложной формы метакристаллов сперрилита в агрегате паоловита (коричневатый), алтантита (серый), фрудита (белый), таймырита (бурый) среди халькопирита. В отраженном свете при 1 николе. Ширина поля зрения 0.6 мм. Графические руды. Главная Хараэлахская залежь, гор. –430 м. Колл. и фото Э.М. Спирионова.



Рис. 6. Мелкий правильной формы метакристалл сперрилита (рельефный серый) на контакте соболевскита (сиреневатый) и алтантита (голубоватый) внутри агрегата соболевскита в графических галенит-талнахитовых рудах. В отраженном свете при 1 николе. Красная линейка 50 мкм. Главная Хараэлахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. –800 м. Колл. и фото Э.М. Спирионова.

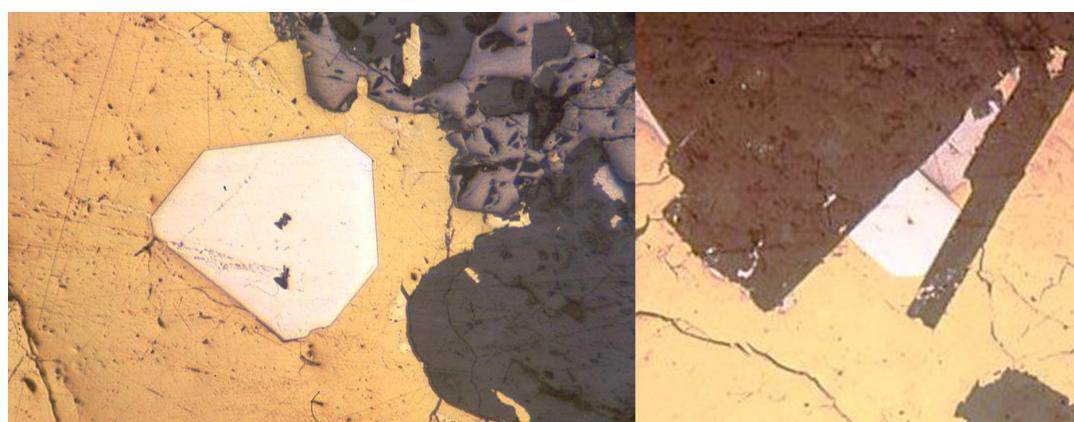


Рис. 7. Метакристаллы сперрилита – кубооктаэдр и куб – во вкрапленных магнетит-пентландит-халькопиритовых рудах в габронорите-долеритах. Месторождение Норильск I, рудник Заполярный. В отраженном свете при 1 николе. Ширина каждого снимка 0.3 мм. Колл. Э.А. Кулагова, фото Э.М. Спирионова.

Таблица 1. Химический состав (мас.%) малопримесного сперрилита месторождений Норильского рудного поля

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7
№ рис.	8	17 низ	11	13 лев.	14	17 верх	18
Pt	56.06	55.84	55.14	56.41	55.12	56.43	55.38
Rh	нпо	нпо	нпо	0.31	0.14	нпо	0.29
As	42.89	42.84	41.72	43.06	42.09	42.30	41.36
Sb	0.07	0.25	0.35	0.38	0.94	1.58	1.59
Bi	0.35	нпо	2.08	нпо	нпо	нпо	нпо
Sn	нпо	нпо	нпо	0.10	0.14	нпо	0.14
сумма	99.37	98.93	99.29	100.26	98.43	100.31	98.76
Число атомов в формуле							
Pt	1.00	1.00	0.995	0.995	0.995	1.01	1.00
Rh	–	–	–	0.01	0.005	–	0.01
сумма	1.00	1.00	0.995	1.005	1.00	1.01	1.01
As	1.99	1.99	1.96	1.98	1.97	1.95	1.935
Sb	–	0.01	0.01	0.01	0.025	0.05	0.05
Bi	0.01	–	0.035	–	–	–	–
Sn	–	–	–	0.005	0.005	–	0.005
сумма	2.00	2.00	2.005	1.995	2.00	2.90	1.99

Примечание. нпо – ниже предела обнаружения. Ru, Os, Ir, Pd, Au, Ag, Pb, Se, S не обнаружены. Электронный микрозонд, аналитик Н.Н. Коротаева.



Рис. 8. На четырех фотографиях серия метакристаллов сперрилита (рельефный) (ан. №1, табл. 1). Границы метакристаллов сперрилита секут галенит, срастания рустенбургита – атокита с оторочками таймырита – татьянаита, алтантита и электрума. В отраженном свете при 1 николе. Ширина каждого снимка 1 мм. Графические галенит-халько-пиритовые руды. Месторождение Норильск II. Колл. Э.А. Кулагова, фото Э.М. Спирионова.

сперрилит (рис. 16, 19) (табл. 2).

Содержание селена не коррелируется с иными компонентами сперрилита (табл. 2, 3).

В рудах, богатых минералами Sb, развит в различной степени сурьмянистый сперрилит (рис. 10, 20–24). Эти кристаллы обычно однородны по со-

ставу. Изредка встречаются зональные кристаллы, в которых в центральных обогащенных Sb зонах сохранились реликты замещенных минералов сурьмы – геверсита... (рис. 20).

Обычно включения минералов сурьмы полностью растворены (рис. 21–24).

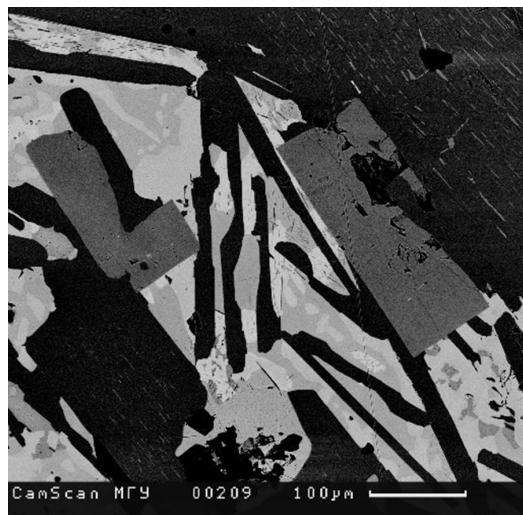


Рис. 9. Три прямоугольной формы метакристалла сперрилита (темно-серый) с включениями реликтов паоловита (черный). Границы метакристаллов сперрилита секут пластины паоловита, нигглиит (светлый) и соболевскит (серый). В отраженных электронах. Длина линейки 100 мкм. Графические руды. Главная Хараэлахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. -430 м.

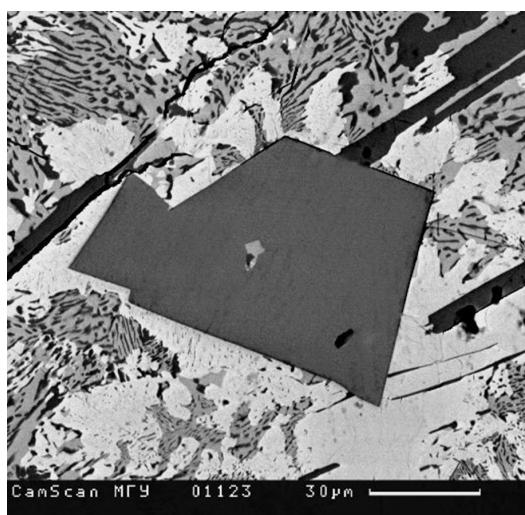


Рис. 10. Метакристалл Sb-сперрилита (в центре) с реликтами геверсита (серый) и паоловита (черный) сечет выделения инсизвайта (светлый), срастания геверсита (серый) и паоловита (черный), пластины паоловита. В отраженных электронах. Длина линейки 30 мкм. Анализы №23–24, табл. 4. Гнездо минералов благородных металлов в эвтектических рудах. Главная Хараэлахская залежь, гор. -530 м.

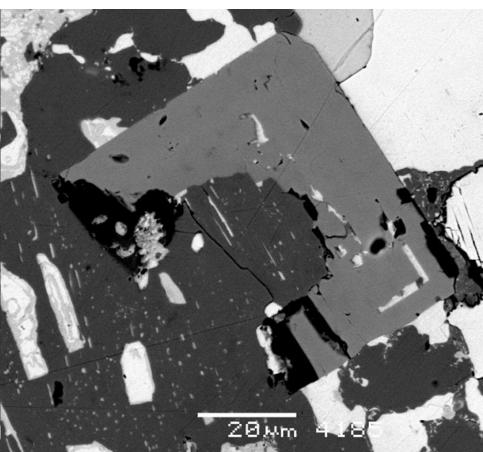
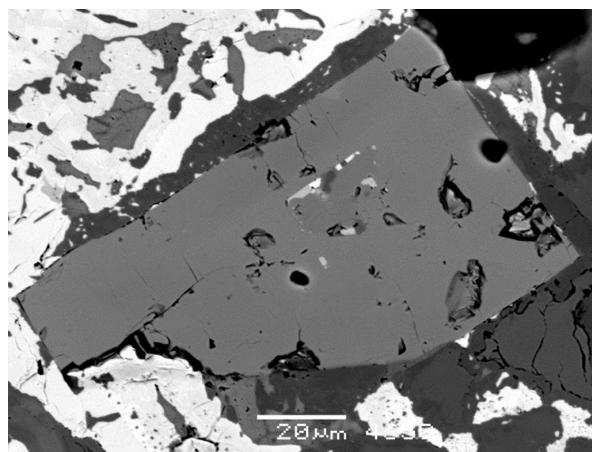


Рис. 11. Два кубовидных сложной формы метакристалла сперрилита (темно-серый) (ан. №3, табл. 1) с включениями реликтов паоловита (черно-серый), таймырита (черный) и фрудита (белый). В отраженных электронах. Длина линейки 20 мкм. Графические руды. Главная Хараэлахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. -430 м.

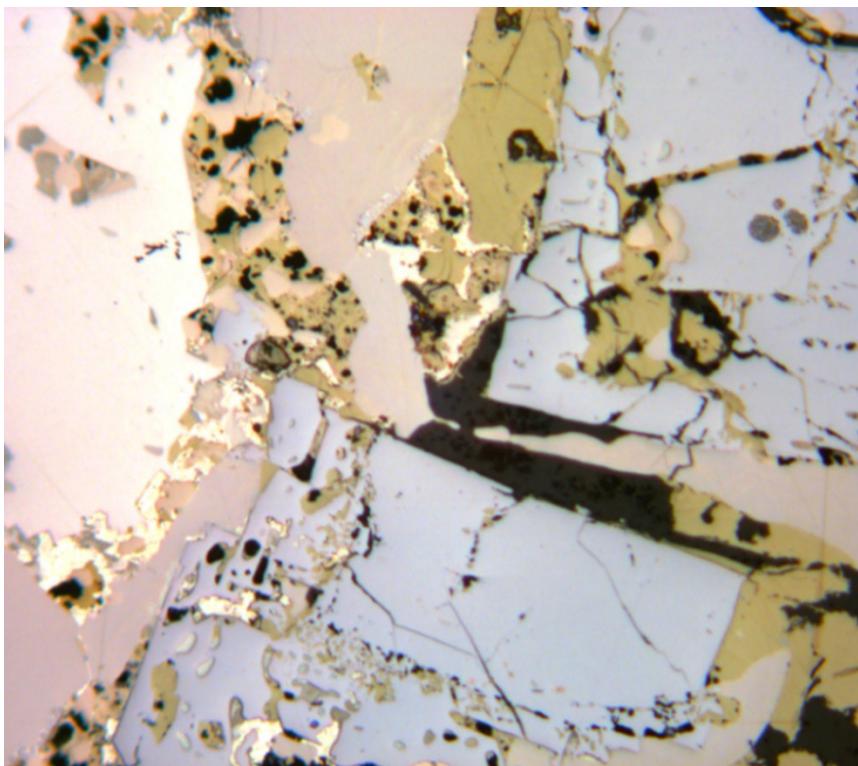


Рис. 12. Скелетные кубические метакристаллы сперрилита. Сперрилит сечет станинопалладинит (розоватый), плюмбопалладинит (желтоватый), тетраферроплатину (белая), халькопирит. Черное – поздний валлерит. В отраженном свете при 1 николе. Ширина поля зрения 0.7 мм. Пентландит-халькопиритовые руды. Месторождение Талнахское, рудник Маяк.
Колл. и фото Э.М. Спирионова.

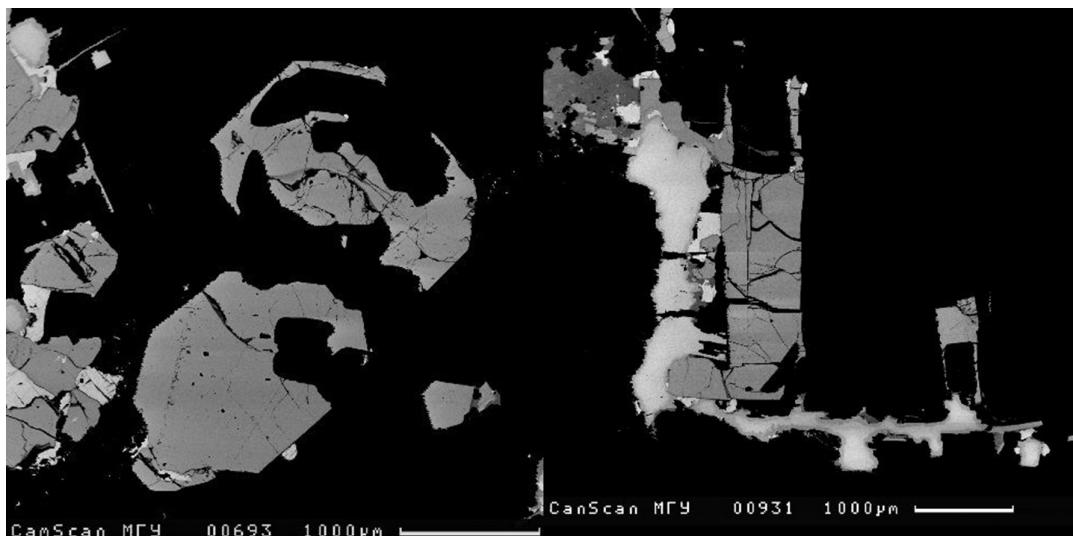


Рис. 13. Сложной формы метакристаллы сперрилита (серые) (ан. №4, табл. 1) секут выделения рустенбургита – аточита (светлые) и матрицу моихукита. В отраженных электронах. Длина линейки 1 мм. Гнездо минералов благородных металлов в эвтектических рудах. Главная Хараелахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. -430 м.

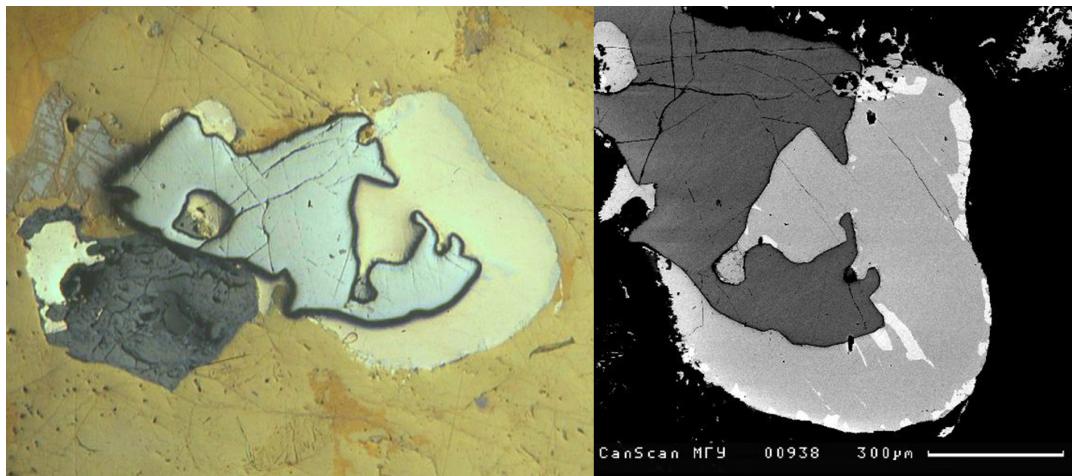


Рис. 14. Метакристалл сперрилита сложной формы (ан. №5, табл. 1) сечет богатые магнетит-галенит-пентландит-талнахитовые руды. Левый снимок в отраженном свете при 1 николе, сперрилит рельефный, яркий, поле зрения 2 мм. Правый снимок в отраженных электронах: сперрилит (темно-серый) сечет соболевскит (светло-серый), мончешит (белый), гессит (темно-серый). Длина линейки 300 мкм. Главная Хараэлахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. –430 м.

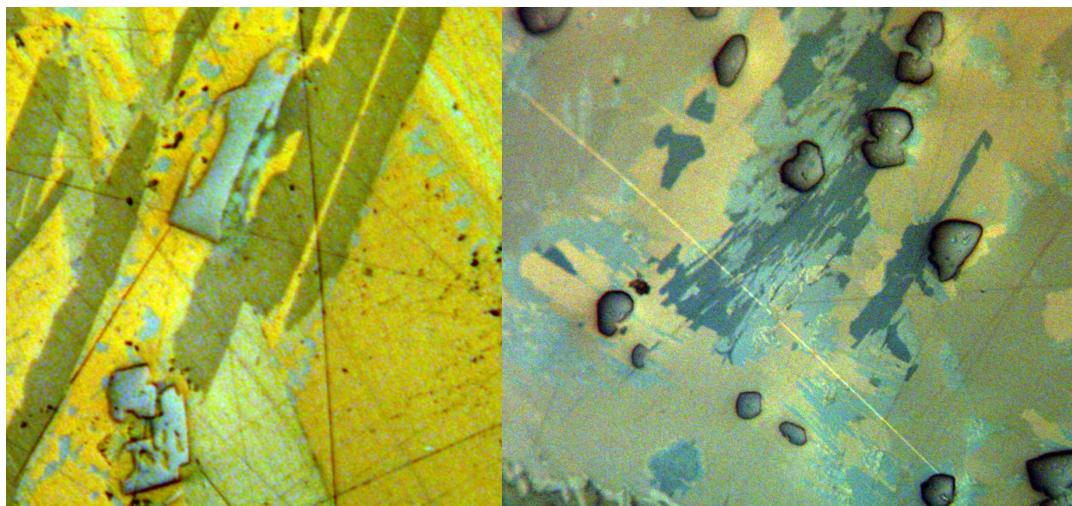


Рис. 15. Левый снимок: метакристаллы сперрилита сложной формы (рельефные серые) в агрегате паоловита (перекрещивающиеся двойники полиморфного перехода кубический → ромбический), с мелкими вrostками геверсита (голубоватые). Ширина поля зрения 0,4 мм. Правый снимок: небольшие метакристаллы сперрилита (рельефные серые) в агрегате паоловита (перекрещивающиеся двойники сложной формы). Ширина поля зрения 0,2 мм. В отраженном свете, николи ×. Графические руды. Главная Хараэлахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. –430 м. Колл. и фото Э.М. Спиридонова.

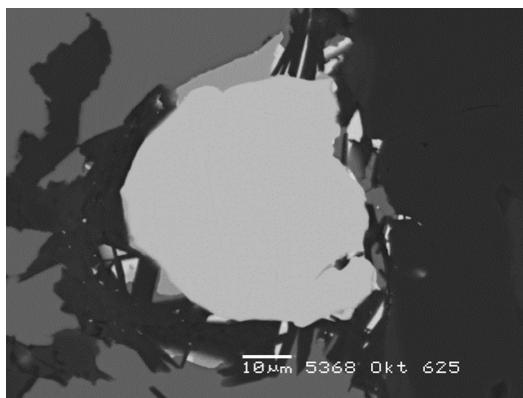


Рис. 16. Овальный метакристалл сперрилита сечет меньшиковит (серый угловатый) на контакте сульфидов (темно-серые слева) и силикатов (черные справа). В отраженных электронах. Анализы №8–10, табл. 2. СВ фланг Октябрьского месторождения.

Состав сурьмянистого сперрилита незональных кристаллов приведен в табл. 4.

Как видно, отчетливо проявлен изоморфизм As – Sb. С ростом сурьмянистости сперрилита в нем обычно заметно повышается содержание олова (табл. 4).

В целом состав сперрилита норильских руд стехиометричен; вариации состава отвечают $(\text{Pt}_{0.98-1.01}\text{Rh}_{0-0.015})_{0.99-1.01}(\text{As}_{1.99-1.58}\text{Sb}_{0-0.36}\text{Sn}_{0-0.07}\text{Se}_{0-0.05}\text{Bi}_{0-0.035})_{1.99-2.01}$. Содержание изоморфных примесей достигает (мас.%): Sb 11.8; Bi 2.1; Sn 2.0; Se 1.2; Rh 0.5.

Размер метакристаллов варьирует от микронного до 4–7 см, двойников – до 11–21 см. По воспоминаниям корифея норильской геологии Ю.К. Krakowecкого, кристалл-двойник сперрилита длиной 21 см геофизики много лет использовали как гирю при определении плотности пород и руд. Размер скоплений метакристаллов сперрилита от

Таблица 2. Химический состав (мас.%) селенсодержащего сперрилита норильских руд

Компо-ненты	8	9	10	11	12	13
№ рис.	16			19 лев.	19 прав.	из срастания с холингвортитом
Pt	55.99	55.97	55.66	56.24	56.02	55.68
Rh	нпo	нпo	0.48	0.39	0.41	0.39
As	42.38	43.01	42.18	43.05	43.15	43.05
Sb	0.32	нпo	нпo	нпo	нпo	нпo
Se	0.73	0.69	0.90	0.81	0.82	0.80
сумма	99.42	99.66	99.22	100.49	100.40	99.92
Число атомов в формуле						
Pt	1.00	0.99	0.99	0.985	0.98	0.985
Rh	–	–	0.015	0.015	0.015	0.015
сумма	1.00	0.99	1.005	1.00	0.995	1.00
As	1.96	1.98	1.955	1.965	1.97	1.965
Sb	0.01	–	–	–	–	–
Se	0.03	0.03	0.04	0.035	0.035	0.035
сумма	2.00	2.01	1.995	2.00	2.005	2.00

Примечание. Ru, Os, Ir, Pd, Au, Ag, Bi, Sn, Pb, S не обнаружены. Электронный микрозонд, аналитик Н.Н. Коротаева.

Таблица 3. Химический состав (мас.%) сурьмянистого сперрилита, зонального кристалла графических галенит-моихукитовых руд. Главная Хараелахская залежь. Рис. 20

Компо-ненты	14	15	16	17	18	19
участки кристалла	центр	промежуточная зона		внешняя зона		края
Pt	54.97	55.64	55.63	56.50	56.11	55.72
Rh	0.42	0.34	нпo	0.28	0.42	0.28
As	36.41	43.01	42.18	43.05	43.15	43.05
Sb	8.31	6.73	5.60	3.77	3.56	3.46
Sn	0.57	0.60	0.65	нпo	нпo	0.63
Se	0.86	1.05	1.04	1.17	0.91	1.14
сумма	101.54	102.03	100.88	102.10	102.00	100.95
Число атомов в формуле						
Pt	0.99	0.99	1.00	0.99	0.98	0.99
Rh	0.015	0.01	–	0.01	0.015	0.01
сумма	1.005	1.00	1.00	1.00	0.995	1.00
As	1.70	1.745	1.775	1.845	1.865	1.83
Sb	0.24	0.19	0.16	0.105	0.10	0.10
Sn	0.015	0.02	0.02	–	–	0.02
Se	0.04	0.045	0.04	0.05	0.04	0.05
сумма	1.995	2.00	2.00	2.00	2.005	2.00

Примечание. Ru, Os, Ir, Pd, Au, Ag, Bi, Sn, Pb, S не обнаружены. Электронный микрозонд, аналитик Н.Н. Коротаева.

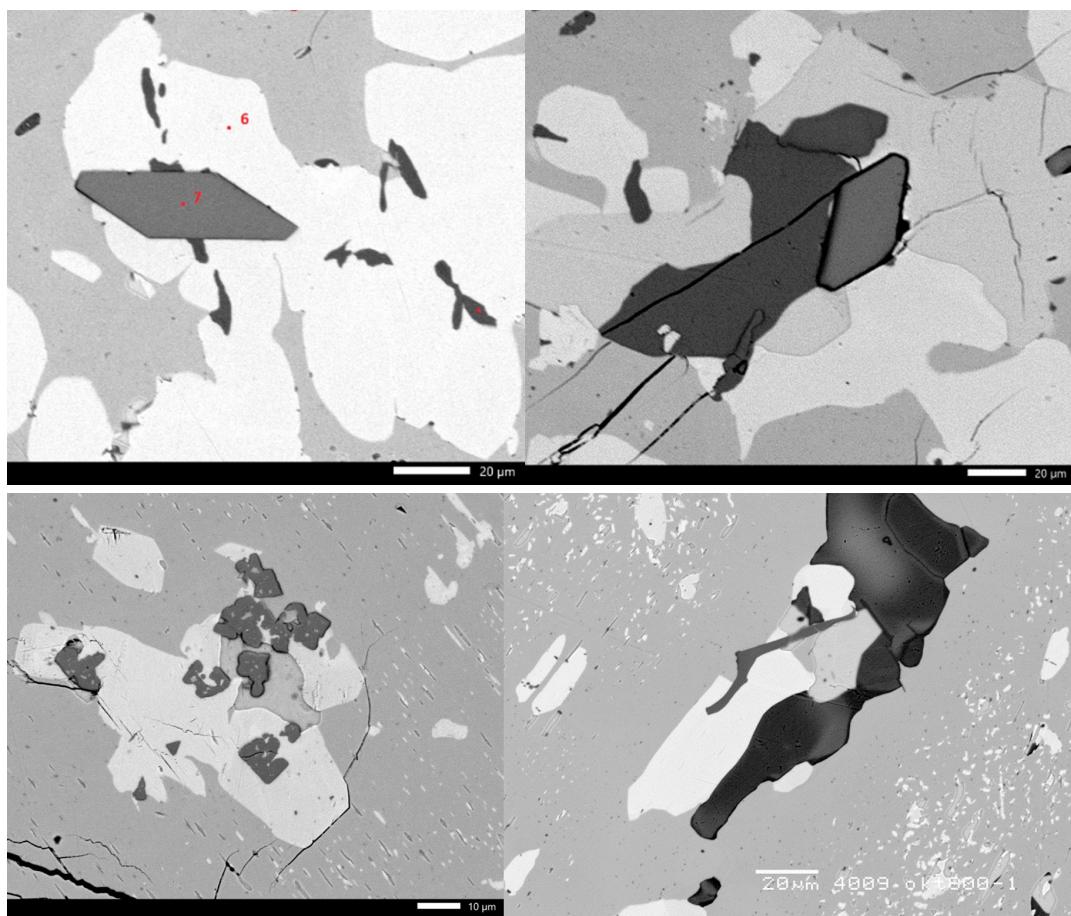


Рис. 17. Разнообразие форм метакристаллов сперрилита в гнезде Тe-соболевского (матрица) с тельцами мончелита (светлый до белого), алтата (светло-серый), паоловита (черный), зонального электрума – кюстелита – Au-серебра, которые сперрилит сечет. Вверху ромбовидные метакристаллы сперрилита (ан. №6, табл. 1). Внизу слева скопление его метакристаллов неправильной до кубической формы (ан. №2, табл. 1). Внизу справа в центре –тонкий изогнутый прожилок сперрилита. В отраженных электронах. Длина линейки 10 (низ слева) и 20 мкм. Графические руды. Главная Хараэлахская залежь, гор. -800 м.

Таблица 4. Химический состав (мас.%) сурьмянистого сперрилита незональных кристаллов месторождений Норильского рудного поля

Компо- ненты	20	21	22	23	24	25	26	27
№ рис.		21		23		22		24
Pt	55.74	53.73	56.18	54.37	56.15	53.25	54.84	52.86
Rh	нпo	0.17	нпo	0.07	0.05	0.05	0.37	нпo
As	41.31	41.02	39.32	38.45	38.18	35.90	35.34	31.73
Sb	2.43	2.77	3.81	4.80	5.12	6.24	9.91	11.88
Sn	нпo	0.57	0.57	1.45	1.78	1.99	0.88	0.69
Se	нпo	нпo	0.79	нпo	нпo	нпo	нпo	0.63
сумма	99.58	100.26	100.67	99.14	101.28	97.43	101.34	98.79
Число атомов в формуле								
Pt	1.00	0.995	1.01	0.99	1.01	1.00	1.00	1.01
Rh	–	0.005	–	0.005	–	–	0.01	–
сумма	1.00	1.00	1.01	0.995	1.01	1.00	1.01	1.01
As	1.93	1.905	1.83	1.825	1.79	1.75	1.67	1.58
Sb	0.07	0.08	0.11	0.14	0.14	0.18	0.29	0.36
Sn	–	0.015	0.015	0.04	0.06	0.07	0.03	0.01
Se	–	–	0.035	–	–	–	–	0.02
сумма	2.00	2.00	1.99	2.005	1.99	2.00	1.99	1.99

Примечание. Ru, Os, Ir, Pd, Au, Ag, Bi, Pb, S не обнаружены. Электронный микрозонд, аналитик Н.Н. Коротаева.

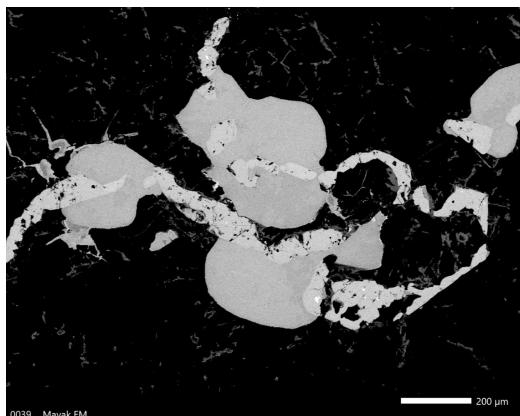


Рис. 18. Змеевидные прожилки сперрилита (светлый) (ан. №7, табл. 1) пересекли скопление метакристаллов таймырита (светло-серые овальные) и сульфидную массу руд. Отраженных электронах. Сплошные галенит-пентландит-кубанитовые руды. Месторождение Талнахское, рудник Маяк.

Таблица 5. Рентгенограмма порошка беспримесного сперрилита моихукитовых руд. Главная Хараэлахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. –430 м. Рис. 2

d α, Å	I/I ₁ , %	1/d ² изм.	1/d ² расч.	h	k	l
3.445	36	0.08426	0.08427	1	1	1
2.982	100	0.11246	0.11236	2	0	0
2.668	23	0.14048	0.14045	2	1	0
2.436	15	0.16852	0.16854	2	1	1
2.110	26	0.22461	0.22472	2	2	0
1.799(α ₁)	52	0.30899	0.30899	3	1	1
1.722(α ₁)	6	0.33724	0.33708	2	2	2
1.655(α ₁)	3	0.36509	0.36517	3	2	0
1.5945(α ₁)	5	0.39332	0.39326	3	2	1

Примечание. Дифрактометр ДРОН УМ-1, Со-антикатод, Fe-фильтр.

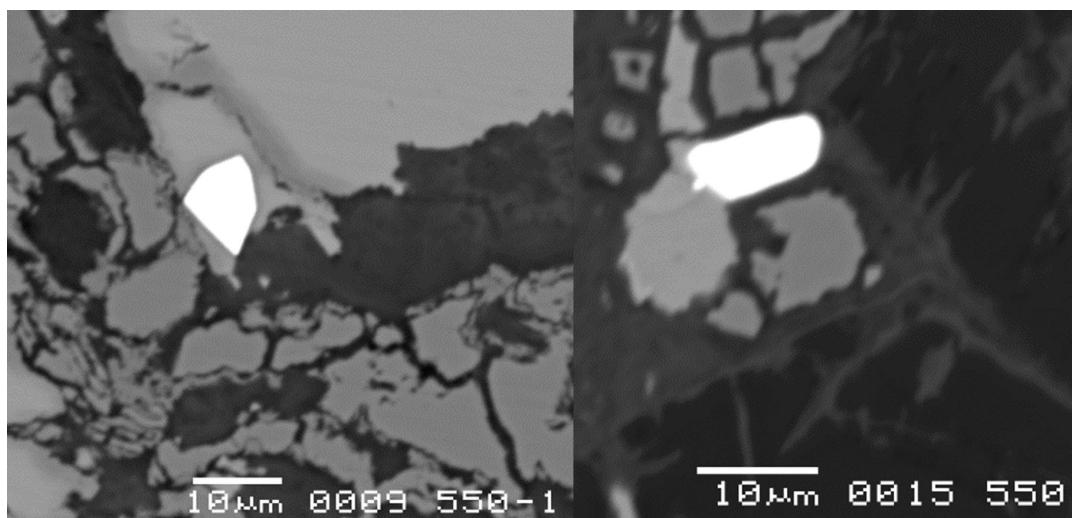


Рис. 19. Метакристаллы селенсодержащего сперрилита в брекчированных вкрапленных пентландит-пирротин-кубанит-халькопиритовых рудах. Отраженных электронах. Анализы №11–12, табл. 2. Рудник Таймырский, гор. –550 м.

долей мм до десятков см в поперечнике [Спиридонов, 2019, 2022]. Форма кристаллов разнообразная: от простых кубов и кубооктаэдров до весьма сложной. Нередки уплощенные кристаллы (рис. 3). Обычный случай, когда одни грани метакристалла идеальной формы и гладкие, остальная морфология сложная (рис. 4, 5, 7, 12–15, 19–23). Развиты не только метакристаллы, но и прожилки сперрилита (рис. 17, 18).

Сперрилит возник преимущественно в суль-

фидных рудах, гораздо реже в силикатных породах при воздействии на них флюидов, богатых платиной и мышьяком. В тех редких случаях, когда сперрилит развит в пирротиновых рудах, обогащенных родием, со сперрилитом ассоциирует сульфоарсенид родия холингвортит. Сурьма и олово в сперрилите норильских руд заимствованы из замещенных пневматолитовых минералов, богатых этими химическими элементами. Селенсодержащий сперрилит обычно развит среди графи-

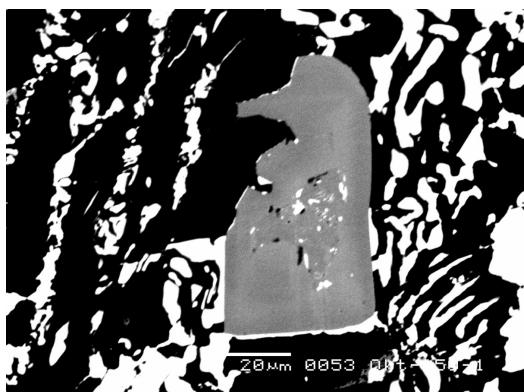


Рис. 20. Зональный метакристалл Sb-сперрилита сложной формы сечет паоловит (черный) и геверсит PtSb_2 (белый). Центральная светлая зона сперрилита, обогащенная сурьмой, содержит массу реликтов замещенного геверсита. В отраженных электронах. Анализы №14–19, табл. 3. Эвтектические галенит-пентландит-талнахит-моиухукитовые руды. Главная Хараелахская сульфидная залежь. Рудник Октябрьский, гор. –810 м.

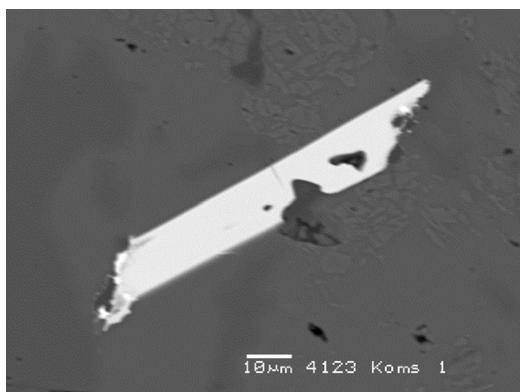


Рис. 21. Метакристалл Sb-сперрилита сложной формы в сплошных пирротиновых рудах. В отраженных электронах. Линейка 10 мкм. Анализы №20–21, табл. 3. Рудник Комсомольский, гор. –430 м.

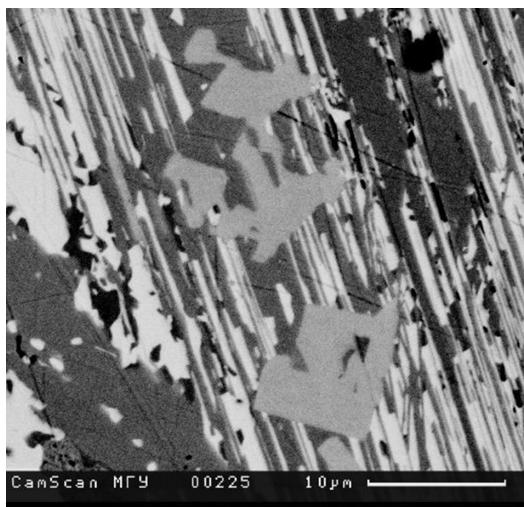


Рис. 22. Цепочка метакристаллов Sb-сперрилита сложной формы (серый) сечет тонкопластинчатые срастания минерала Pd_4SnSb (темно-серый), геверсита (светлый), электрума (серый). Черные – прожилки позднего валлерита. В отраженных электронах. Линейка 10 мкм. Анализы №24–26, табл. 4. Графические руды. Главная Хараелахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. –430 м.

ческих руд, галенит которых содержит заметное количество селена.

Оптические свойства норильского сперрилита стандартные. Отражение обогащенного су-

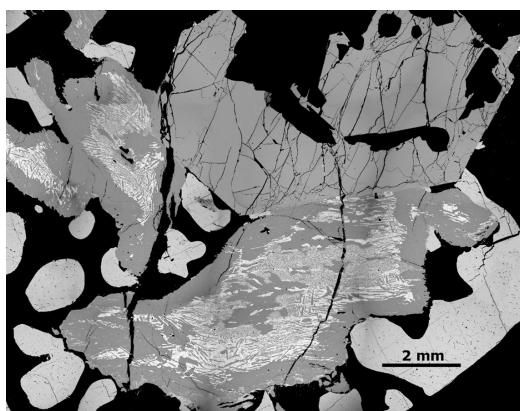


Рис. 23. Крупный метакристалл Sb-сперрилита весьма сложной формы (светло-серый сверху справа) сечет алтait (светлый), срастание минерала Pd_4SnSb и Sb-паоловита (серые) с тонкими структурами распада геверсита (светлые). Графические галенит-кубанитовые руды со своеобразными псевдоморфозами алтата по галениту. В отраженных электронах. Анализ №22, табл. 4. Главная Хараелахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. –530 м.

рьмой сперрилита (рис. 24) немного выше, чем у беспримесного. Твердость по микровдавливанию беспримесного сперрилита кристаллов рис. 2 $\text{VHN}_{100} = 974 \pm 20 \text{ кг}/\text{мм}^2$. Твердость по микровдавливанию сурьмянистого сперрилита крупного кристалла рис. 24 $\text{VHN}_{100} = 956 \pm 20 \text{ кг}/\text{мм}^2$ – несколько ниже. Для беспримесного сперрилита, относительно крупного кристалла образца рис. 2, получена рентгенограмма порошка – дифрактограмма (табл. 5), которая отвечает эта-

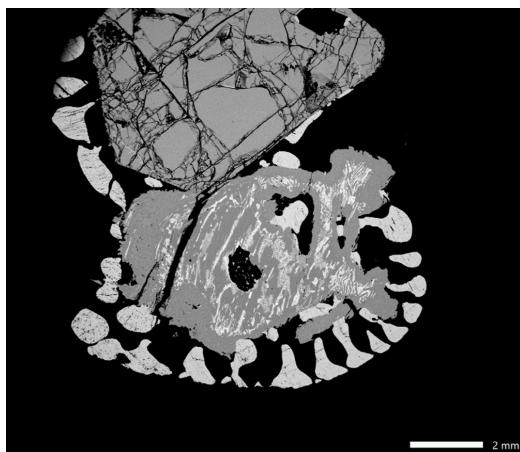


Рис. 24. Крупный метакристалл Sb-сперрилита (светло-серый сверху) сечет алтант (белый), срастание наудреттита и минерала Pd_3SnSb (серые) с тонкими структурами распада геверсита (светлые). Графические галенит-кубанитовые руды со своеобразными грибообразными псевдоморфозами алтанта по галениту. В отраженных электронах. Анализ №27, табл. 4. Главная Хараалхская сульфидная залежь. Рудник Октябрьский, гор. –530 м.

лонной. Параметр элементарной ячейки беспримесного норильского сперрилита $a_0 = 5.967$ (2) Å отвечает эталонному значению для этого минерала 5.967 Å.

Преобразование сперрилита

Т.Л. Евстигнеева обнаружила каймы платины на кристаллах сперрилита и назвала такой процесс замещения деарсенизацией [Евстигнеева и др., 1990]. В работе [Spiridonov et al., 2016] показано, что деарсенизация сперрилита, маякита и иных арсенидов палладия порождена процессами эпигенетического посттрапового низкоградного метаморфизма в условиях пренит-пумпеллиитовой фации.

Финансирование

Работа выполнена по госбюджетной теме №12106160004e9-4 (ЦИТИС) «Минералогическое изучение месторождений Арктической зоны России с целью их комплексного освоения» с использованием оборудования, приобретенного по программе развития МГУ им. М.В. Ломоносова.

Список литературы:

- Генкин А.Д. Минералы платиновых металлов и их ассоциации в медно-никелевых рудах Норильского месторождения. М.: Наука, 1968. 106 с.
- Генкин А.Д., Дистлер В.В., Филимонова А.А., Евстигнеева Т.Л., Коваленкер В.А., Вяльсов Л.Н., Лапутина И.П., Смирнов А.В., Гроховская Т.Л. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, 1981. 234 с.
- Годлевский М.Н. Трапы и рудоносные интрузии Норильского района. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 89 с.
- Годлевский М.Н. Магматические месторождения. В кн.: Генезис эндогенных месторождений. М.: Недра, 1968. С. 7-83.
- Евстигнеева Т.Л., Генкин А.Д. Платинометальная минерализация норильских медно-никелевых руд: природные и экспериментальные данные. В кн.: Генетические модели рудных месторождений СССР. Новосибирск: Наука, 1990. С. 98-116.
- Евстигнеева Т.Л., Ким А.А., Некрасов И.Я. О деарсенизации сперрилита в природе // Минерал. ж. 1990. Т. 12. №3. С. 90-96.
- Изох А.Э., Майорова О.Н. Родий-содержащий сперрилит из Номгонского комплекса (Монголия) // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. С. 1212-1215.
- Коваленкер В.А., Лапутина И.П., Павлов Е.Г. О распаде природного твердого раствора в системе PbS - PbTe. В кн.: Упорядоченность и распад твердых растворов в минералах. М.: Наука, 1979. С. 185-190.
- Кулагов Э.А. Особенности минерального состава руд месторождения Норильск-І. Дисс. канд. геол-мин. наук. М.: МГУ, 1968. 239 с.
- Поляков Г.В., Чан Чонг Хоа, Акимцев В.А., Балыкин П.А., Нго Тхи Фыонг, Хоанг Хыу Тхань, Толстых Н.Д., Глотов А.И., Петрова Т.Е. Рудно-geoхимическая специализация пермо-триасовых ультрамафит-мафитовых комплексов Северного Вьетнама // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. №10. С. 1474-1487.
- Спиридовон Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. С. 1356-1378.
- Спиридовон Э.М. Генетическая модель месторождений Норильского рудного поля // Смирновский сборник-2019. М.: Макс Пресс, 2019. С. 41-113.
- Спиридовон Э.М. Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. К 120-летию М.Н. Годлевского // Отечественная геология. 2022. №6. С. 95-116.
- Спиридовон Э.М. Холингвортит и сперрилит в сульфидных медно-никелевых рудах Байкальского и Норильского месторождений // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2025. №5. С. 60-68.
- Спиридовон Э.М., Беляков С.Н., Коротаева Н.Н., Егоров К.В., Иванова Ю.А., Наумов Д.И., Серова А.А. Меньшиковит $Pd_3Ni_2As_3$ и ассоциирующие минералы сульфидных руд восточного фланга Октябрьского месторождения, Норильское рудное поле // Вестник МГУ. Серия геология. 2020. №4. С. 22-29.
- Спиридовон Э.М., Беляков С.Н., Япаскурт В.О., Коротаева Н.Н. Норильское рудное поле: прямое доказательство

ство пневматолитового генезиса минералов палладия в сплошных сульфидных рудах // Новые идеи в науках о Земле. 2019. Т. II. С. 380–383.

Спиридовонов Э.М., Голубев В.Н., Грищенко Ю.Д. Изотопный состав свинца галенита, алтита и интерметаллидов палладия сульфидных руд Норильского рудного поля // Геохимия. 2010. №8. С. 867–875.

Спиридовонов Э.М., Иванова Ю.А., Наумов Д.И., Коротаева Н.Н., Серова А.А. Норильское рудное поле: новая метаморфогенно-гидротермальная минеральная ассоциация – беспримесные звягинцевит и серебро, хибингит, Mn хибингит, сидерит, фосгенит, сфалерит в магматогенных пурпуритовых рудах // Вестник МГУ. Геология. 2022. №3. С. 70–82.

Спиридовонов Э.М., Кулагов Э.А., Куликова И.М. Платинисто-палладий тетраурикуприд и ассоциирующие минералы в рудах месторождения Норильск-I // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. №3. С. 267–277.

Спиридовонов Э.М., Кулагов Э.А., Серова А.А., Куликова И.М., Коротаева Н.Н., Середа Е.В., Тушенцова И.Н., Беляков С.Н., Жуков Н.Н. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. №5. С. 447–476.

Степанов В.К. Динамическая модель внедрения, кристаллизации и рудоотложения рудоносных интрузий Норильска // Тр. ЦНИГРИ. 1981. Вып. 162. С. 13–19.

Степанов В.К., Туровцев Д.М. Многофакторные модели медно-никелевых месторождений норильского типа // Тр. ЦНИГРИ. 1988. Вып. 223. С. 86–94.

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., Stanley C.J., Silva D.V.G. Kalungaite, PdAsSe, a new platinum-group mineral from the Buraco do Ouro gold mine, Calalcante, Goiás 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.

Gerville F., Papunen H., Kojonen K., Johanson B. Platinum-, palladium- and gold-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., Barron L.M., Suppel D. Platinum mineralization in the Alaskan-type intrusive complexes near Fifield, New South Wales, Australia. I. 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., Monterrubio S., Fischer P. 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.

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. V. 42. P. 667–681.

Seabrook C.L., Prichard H.M., Fisher P.C. Platinum-group minerals in the Raglan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Cape Smith, Quebec, Canada // Canad. Mineral. 2004. Vol. 42. P. 485–497.

Serova A.A., Spiridonov E.M. Three type of apatite in Noril'sk sulfide ores // Geochemistry International. 2018. Vol. 56. №5. P. 474–483.

Spiridonov E., Serova A., Belyakov S., Sereda E., Tuschenzova I. Gold as indicator of the formation history of noble-metal minerals in Noril'sk sulfide ore. Northern Siberia, Russia // 13th Intern. Platinum Symp. Polokwane, South Africa. 2018. P. 178–179.

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

Szymanski J.T. The crystal structure of platarsite, Pt(As,S)₂, and a comparison with sperrylite, PtAs₂ // Canad. Mineral. 1979. Vol. 17. P. 117–123.

Tarkian M., Koopmann G. Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Phinex) porphyry copper-gold deposit, Luzon Island, Philippines // Mineral. Deposita. 1995. Vol. 30. P. 39–47.

Wagner P.A., Mellor E.T. On platinum bearing hortomolite 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.