



## Метакристаллы и метасомы сперрилита в сульфидных рудах месторождений Норильского рудного поля

Спиридонов Э.М.<sup>1,2</sup>, Беляков С.Н.<sup>3</sup>, Кулагов Э.А.<sup>3</sup>,  
 Машкина А.А.<sup>1</sup>, Иванова Ю.А.<sup>1</sup>, Егоров К.В.<sup>1</sup>, Коротаева Н.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, [ernstspiridon@gmail.com](mailto:ernstspiridon@gmail.com)

<sup>2</sup>Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва

<sup>3</sup>Норильский 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 – татьянаит, фрудит, алтаит, соболевскит, нигглиит, гессит, атоцит – рустенбургит, инсизваит, геверсит, тетраферроплатину, станнопалладинит, плюмбопалладинит, мончеит, меньшеиковит, электрум – кюстелит – Au-серебро, минерал  $\text{Pd}_4\text{SnSb}$ , налдреттит... Состав крупных кристаллов сперрилита и большинства небольших близок к  $\text{PtAs}_2$  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 –  $(\text{Pt}_{0.98-1.01}\text{Rh}_{0-0.015})_{0.99-1.01}(\text{As}_{1.99-1.58}\text{Sb}_{0-0.36}\text{Sn}_{0-0.07}\text{Se}_{0-0.05}\text{Bi}_{0-0.035})_{1.99-2.01}$ . Содержание изоморфных примесей достигает (мас.%): Sb 11.8; Bi 2.1; Sn 2.0; Se 1.2; Rh 0.5. 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, сростания 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 славятся пегматоидные гортонолитовые дуниты трубок Дрикоп, Онвервахт и Моихук в Бушвелдском интрузиве [Wagner, Mellor, 1925]. Магматогенные сульфидные руды Главной Харае-лахской залежи Октябрьского месторождения Норильского рудного поля содержат метакристаллы сперрилита длиной до 4–7 см, кристаллы-двойники длиной до 11–21 см, сростания кристаллов (метакристаллов) сперрилита до десятков см [Спиридонов и др., 2015]. В магматических малосульфидных (Бушвелд...) и сульфидных месторождениях (Норильск, Садбери...) развиты метакристаллы сперрилита, замесившие продукты распада высокотемпературных сульфидных твердых растворов – пирротин, троилит, пентландит, халькопирит, кубанит, талнахит, моихукит, пугоранит, магматогенные куперит  $PtS$  и брэггит  $Pd(Pt, Pd, Ni)_3S_4$ , 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 сперрилит  $PtAs_2$  – геверсит  $PtSb_2$  [Johan et al., 1989]. Сперрилит – характерный акцессорный минерал гидротермальных плутоногенных Au-Mo-Cu-порфировых месторождений [Tarkian, Koopmann, 1995], эпитеpmальных 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 пумпеллит-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; Gervilla 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 сперрилит – 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  $Pt_{0.8}Rh_{0.2}As_{1.5}S_{0.5}$  [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-пумпеллитовой фации, новообразований сперрилита нет [Spiridonov et al., 2016].

## Норильское рудное поле

Норильское рудное поле расположено в северо-западном углу дорифейской 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 габбронорит-долеритов норильского типа, производных трапповой формации  $P_2-T_1$  [Годлевский, 1959; Кулагов, 1968; Генкин и др., 1981; Степанов, 1981; Степанов, Туровцев, 1988]. Магматические сульфиды слагают вкрапленность в интрузивных породах, шпире, 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 Хараелахская сульфидная залежь размером  $\sim 3000 \times 1000 \times (5-75)$  м субширотного простирания размещена в нижней части и главным образом под Хараелахским 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  $\sim 1150$  и  $\sim 1100$  °C; среди продуктов их субсолидусных превращений преобладает сернистый моноклинный пирротин  $\text{Fe}_7\text{S}_8$  [Спиридонов, 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  $\sim 950$  до  $\sim 760$  °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  $\text{Cu}_{18}\text{Fe}_{18}\text{S}_{32}$ , пугоранит  $\text{Cu}_{17}(\text{Fe},\text{Ni})_{18}\text{S}_{32}$  [Генкин и др., 1981; Спиридонов, 2019, 2022; Спиридонов и др., 2022]. Размер кристаллов Iss3 в центре Главной Хараелахской 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.  $\sim 550$  °C) эвтектик PbSss – Iss5 (или Iss4, Iss3) [Спиридонов, 2019; Спиридонов и др., 2015]. Сульфидные руды – эвтектические сростания – 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 Хараелахской залежи. Причина их появления – обилие калия и когерентного свинца в норильских рудно-магматических системах [Спиридонов, 2010]. Продукты субсолидусных превращений PbSss – матрица галенита и тельца распада алтаита; судя по составу продуктов распада, температура распада отвечала  $425-415$  °C [Коваленкер и др., 1979]. Сульфидные

руды – эвтектические сростания PbSss – Iss – экстремально богаты Pd, Pt, Ag, Au и их минералами [Спиридонов, 2010, 2022; Спиридонов и др., 2015, 2020, 2022]. Во многих рудных столбах Главной Хараелахской 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 ( $\text{H}_2\text{O}$ , K, Cl, F,  $\text{CO}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{CH}_4$ , R, Ba, Tl...). Каждое тело магматических сульфидов окружено ореолом флюидного воздействия из агрегатов титанистого биотита-флогопита, хлорапатита, фторапатита, амфиболов, ангидрита, магнетита или титаномagnetита, джерфшиерита [Годлевский, 1968; Кулагов, 1968; Генкин и др., 1981; Спиридонов, 2010; Спиридонов и др., 2015, 2019; Serova, 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 Хараелахской залежи среди роговиков в гнезде Ti-биотита и хлорсодержащего паргасита без сульфидов нашли 8-мм кристалл сперрилита [Спиридонов, 2019].

Для норильских руд типичны соотношения  $\text{Pd}:\text{Pt} = 3\div 4$ ,  $\text{Ag}:\text{Au} = 30\div 40$ . 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. Искюль, И.Н. Масленицкий, Э.А. Кулагов, А.Д. Генкин, И.В. Муравьева, 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. Спиридонов, 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 возникли 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 – алтаит, при этом галенит очищался от телец алтаита, с метасоматами этих минералов ассоциируют метасоматы алтаита и метасоматы хлорсодержащих сульфидов K-Tl джерфшерита и талфенисита [Спиридонов и др., 2003, 2010, 2019, 2022; Спиридонов, 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: станиды, висмутиды, куприды-станниды, 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 карбониллов (и/или фуллеридов) платиновых металлов при  $T$  менее 415–410 °C, это  $T$  распада PbSss [Коваленкер и др., 1979] и верхний предел устойчивости тетрааурикуприда, ассоциирующего со многими минералами Pd и Pt [Спиридонов и др., 2003].

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

**Пневматолитовые минералы Pd и Pt 1-й стадии** – метакристаллы протоинтерметаллидов Pt и Pd, содержащие до 3–8 мас.% Au. Их сопровождает алтаит PbTe, заместивший часть галенита эвтектических руд. Установлено девять типов протоинтерметаллидов – вероятно, кубических твердых растворов, реконструированных по структурам распада: (1) на основе изоферроплатины Pt<sub>2</sub>Fe, (2) на основе ферроплатины Pt<sub>2</sub>Fe, (3) сращения интерметаллида Pt на основе тетраферроплатины Pt<sub>4</sub>Fe и интерметаллида Pd на основе атокита (Pd,Pt,Au)<sub>3</sub>(Sn,Pb), (4) на основе состава паоловита Pd<sub>2</sub>Sn, (5) на основе состава паоловита Pd<sub>2</sub>Sn и минерала Pd<sub>4</sub>SnSb, (6) на основе состава минерала Pd<sub>4</sub>SnSb, (7) на основе состава минерала Pd<sub>4</sub>SnSb и налдреттита Pd<sub>2</sub>Sb, (8) на основе состава соболевскита Pd(Bi,Te), (9) на основе мончеита (Pt,Pd)(Bi,Te)<sub>2</sub>. Состав протоинтерметаллидов 4–8-го типов эквивалентный  $\approx$  (Pd,Pt,Au,Ag)<sub>1</sub>(Sn,Sb,Bi,Te,Pb,As)<sub>1</sub>. Протоинтерметаллиды Pd и Pt в норильских рудах ранее не описывались.

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

лидов, а также новообразованные интерметаллиды Pt и Pd. Некоторые из них содержат до 6 мас.% Au. Распространены минералы Pt-Fe: в рудах с сернистым пирротинном изоферроплатина Pt<sub>2</sub>Fe, в рудах с железистым пирротинном ферроплатина Pt<sub>2</sub>Fe, в рудах с троилитом тетраферроплатина Pt<sub>4</sub>Fe(Fe,Ni,Cu). Итак, состав минералов Pt-Fe определяло наличие «реакционно способного» Fe. Типичны зональные кристаллы рустенбургита (Pt,Pd)<sub>3</sub>Sn – атокита (Pd,Pt)<sub>3</sub>Sn. Заметная часть паоловита возникла при превращении предположительно кубических протоинтерметаллидов эквивалентного состава в ромбический паоловит (в виде классических перекрещивающихся двойников полиморфного перехода) с включениями ламелей распада Sb- и Te-Sb-инсизвайта PtBi<sub>2</sub>, Bi-геверсита PtSb<sub>2</sub>, мончеита PtTeBi, телец распада нигглиита PtSn. Ориентировка ламелей распада особая в каждом блоке – двойнике полиморфного перехода паоловита. Распространен двухстадийный распад твердого раствора, что коррелируется с гипабиссальными условиями становления норильских плутогенных месторождений. Паоловит I богат Pt и Sb. Минерал Pd<sub>4</sub>SnSb I – распространенный минерал норильских руд. Налдреттит Pd<sub>2</sub>Sb I более редок, для него, как для паоловита и минерала Pd<sub>4</sub>SnSb, характерен изоморфизм Sb – Sn.

**Пневматолитовые минералы Pd и Pt 3-й стадии** – продукты превращений протоинтерметаллидов Pt-Pd-Ag-Au и новообразованные тетраферроплатина II, зональные рустенбургит II – атокит II, звягинцевит Pd<sub>3</sub>Pb I; пластинчатые паоловит II, минерал Pd<sub>4</sub>SnSb II, налдреттит II и стибипалладинит Pd<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>; 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. С пластинчатым паоловитом II ассоциирует, а также образует обособленные кристаллы гексагональный минерал Pd<sub>4</sub>SnSb II. С паоловитом II нередко ассоциируют пластины стибипалладинита.

**Пневматолитовые минералы Pd, Pt, Au, Ag 4-й стадии** – продукты замещения интерметаллидов 1, 2 и 3-й стадий. Это станнопалладинит, таймырит – татьянаит; тонкопластинчатые сращения плюмбополярит + станнопалладинит + плюмбопалладинит + звягинцевит и продукты их собирательной перекристаллизации; арсениды-станниды и арсениды-стибиды Pd: паларстанид, Sb-паларстанид, минералы группы мертиита; продукты замещения пентландита: аргентопентландит, маякит, нипаларсит; тетраферроплатина; тетрааурикуприд, аурикуприд, томамаит; интер-



металлиды Ag-Au-Cu-Pd-Pt. Их сопровождают джерфит и талфенит. 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 мональхогениды Pd и Pt: Те-соболевскит, садберит и котульскит, и дихальхогениды Pd и Pt: мончеит, масловит, майчнерит, арсениды Pd – меньшиковит и минералы группы мертиита, а также палладогерманид, алтаит. Широко распространены незональные электрум, кестелит, Au-серебро, часто в сростании с фрудитом.

**Пневматолитовые минералы Pd, Pt, Au, Ag 6-й стадии** – фрудит II, обычно в сростании со сложнзональными электрумом II (598–308%) – кюстелитом II (300–105%) – Au-серебром II (98–4%) ± алтаит ± масловит III; алтаит ± масловит III ± беспримесные геверсит IV и инсизваит IV; сростания паоловита IV и гессита III ± фрудит II; реакционные каймы кабриита вокруг раннего паоловита; реакционный туламинит (феррокупроплатина), замещающий томамаеит. Характерны золотины с прямой, обратной, осцилляционной, сложной и очень сложной зональностью. Вариации состава золотин обусловлены колебаниями активности Те 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; Спиридонов, 2025].

## Материалы и методы исследования

Коллекцию руд месторождений Норильского рудного поля собрали Э.М. Спиридонов, С.Н. Беяков, Э.А. Кулагов при многолетнем изучении подземных выработок, карьеров, керн 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. Коротаяева. 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), алтаита  $PbTe$  (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 экзо-контактах жил эвтектических руд (рис. 1–4) и среди них особенно тех жил, которые развиты среди моихукитовых и талнахитовых руд.

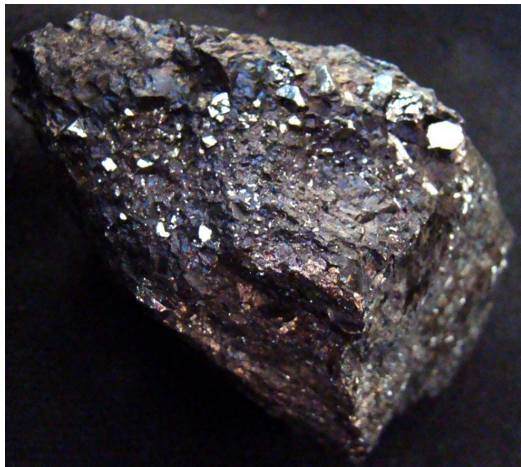
В Главной Хараелахской залежи у ее кровли возле мощной жилы эвтектических руд было встречено скопление сперрилита с поперечником до 120 см (наблюдение Э.А. Кулагова в 1970-е годы). В той же ситуации С.Н. Беяков в 1990-е годы наблюдал гнездо размером 30 × 20 × 20 см,



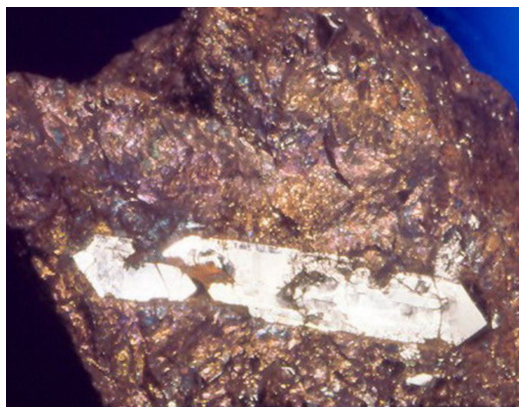
**Рис. 1.** Метакристалл сперрилита (4 мм) на контакте жил эвтектических руд (справа) и роговиков (слева). У верхнего контакта Главной Хараелахской залежи. Горизонт –430 м. Колл. и фото Э.М. Спиридонова.

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 Хараелахской залежи Октябрьского месторождения. В 2018 г. С.Н. Беяков 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 халькопиритового 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 моихукитовых рудах. 50 × 36 мм. Экзоконтакт жилы эвтектических руд. Верхи Главной Хараелахской 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 Хараелахская 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 Хараелахской 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), алтаит (рис. 6, 23, 24), соболевскит (рис. 6, 9, 14), нигглиит (рис. 9), ато-кит – русенбургит (рис. 8, 13), инсизваит (рис. 10), геверсит (рис. 10, 20, 22–24), тетраферроплатину (рис. 12), станнопалладинит (рис. 12), плюмбопалладинит (рис. 12), мончеит (рис. 14, 17), гессит (рис. 14, 17), меньшиковит (рис. 16), электрум – кюсте-

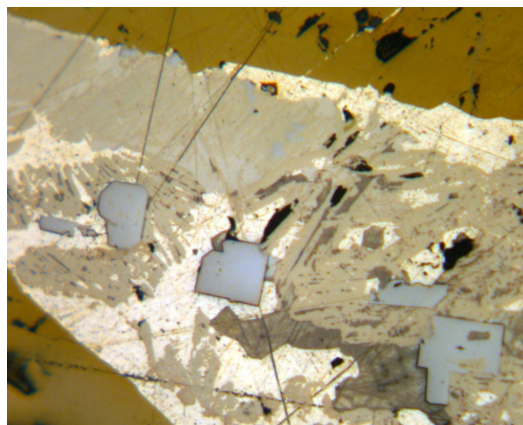
лит – Au-серебро (рис. 17, 22), минерал  $Pd_4SnSb$  (рис. 22–24), налдреттит (рис. 23, 24).

Разнообразие форм кристаллов сперрилита в пределах участка  $1 \times 1$  мм представляет рис. 17.

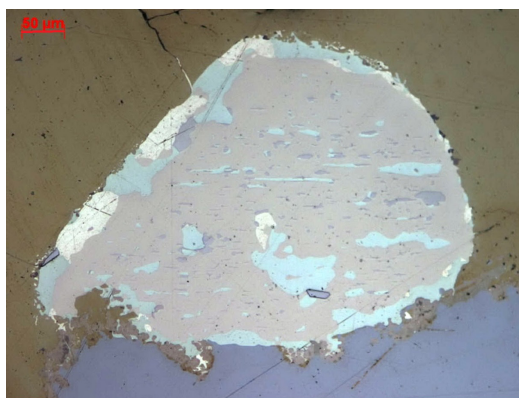
Такое разнообразие форм – классика для метакристаллов.

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.

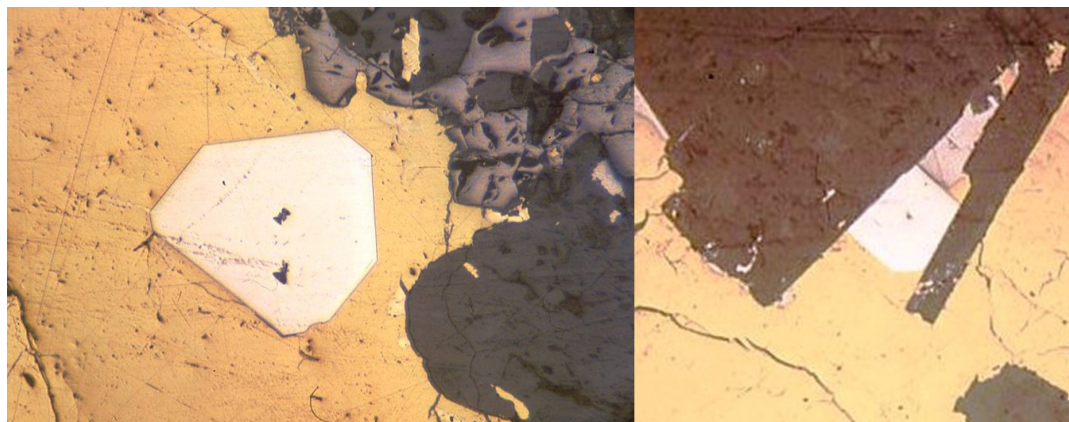
Относительно более редок селенсодержащий



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



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



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

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

Компо- ненты	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 микросонд, аналитик Н.Н. Коротаяева.

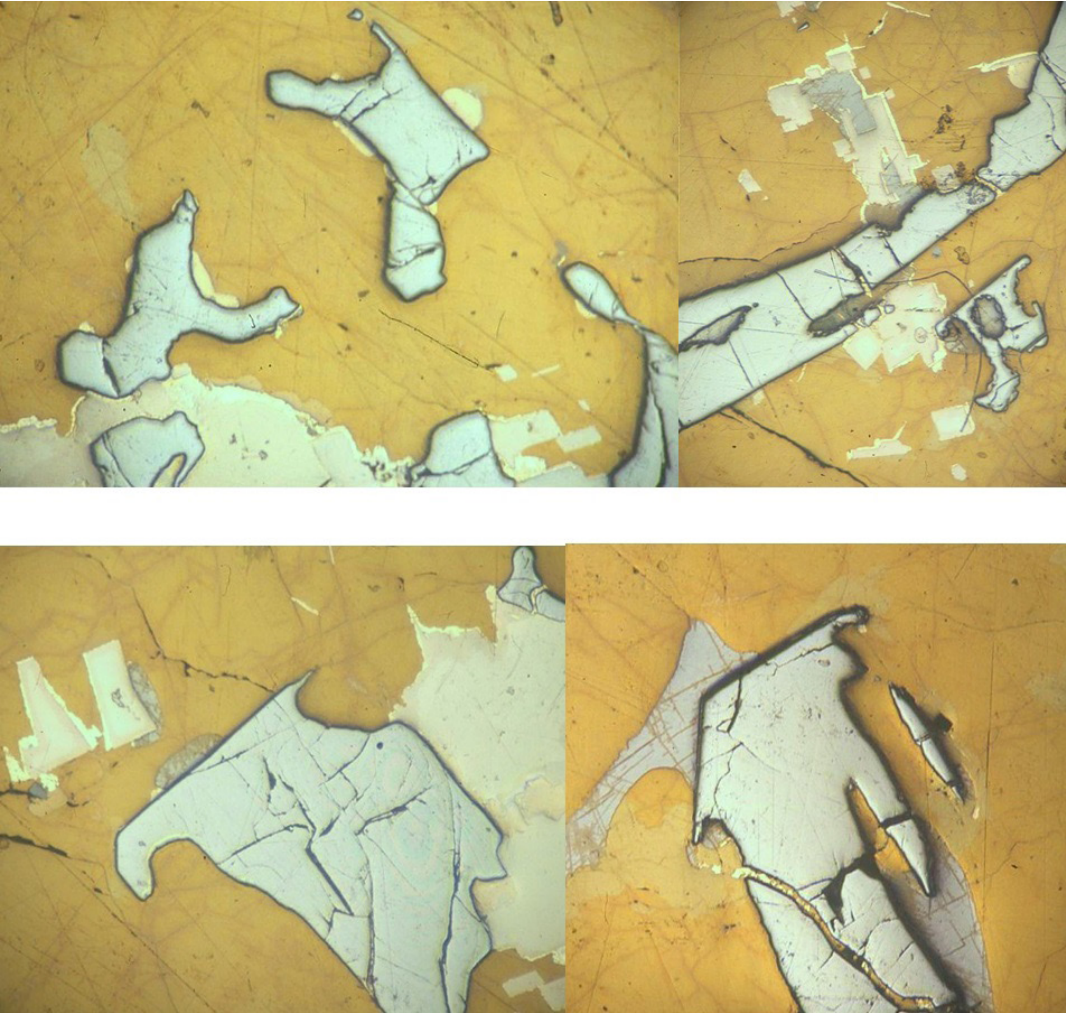


Рис. 8. На четырех фотографиях серия метакристаллов сперрилита (рельефный) (ан. №1, табл. 1). Границы метакристаллов сперрилита секут галенит, сростания рустенбургита – атокиита с оторочками таймырита – татьянаита, алтаита и электрума. В отраженном свете при 1 никеле. Ширина каждого снимка 1 мм. Графические галенит-халькопиритовые руды. Месторождение Норильск II. Колл. Э.А. Кулагова, фото Э.М. Спиридонова.



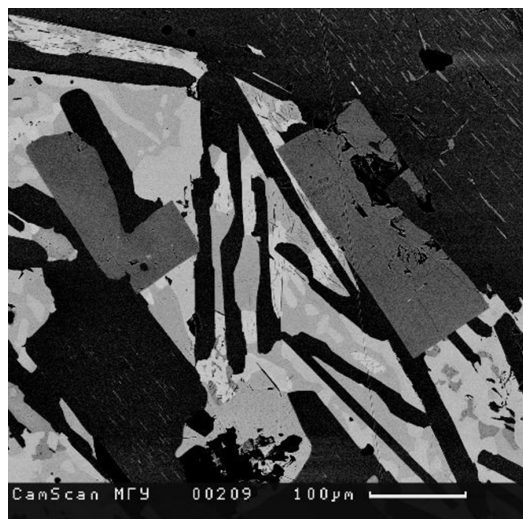
сперрилита (рис. 16, 19) (табл. 2).

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

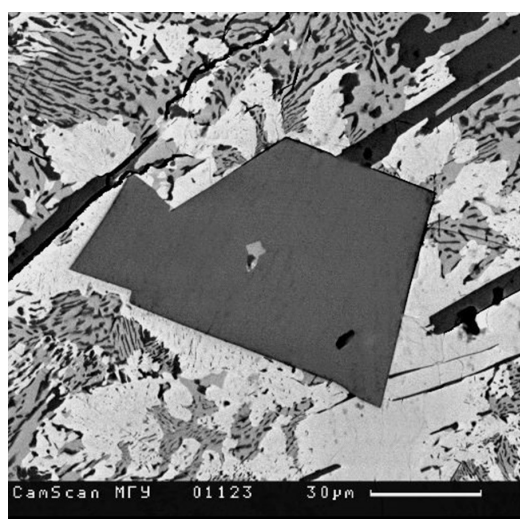
В рудах, богатых минералами Sb, развит в различной степени сурьмянистый сперрилит (рис. 10, 20–24). Эти кристаллы обычно однородны по со-

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

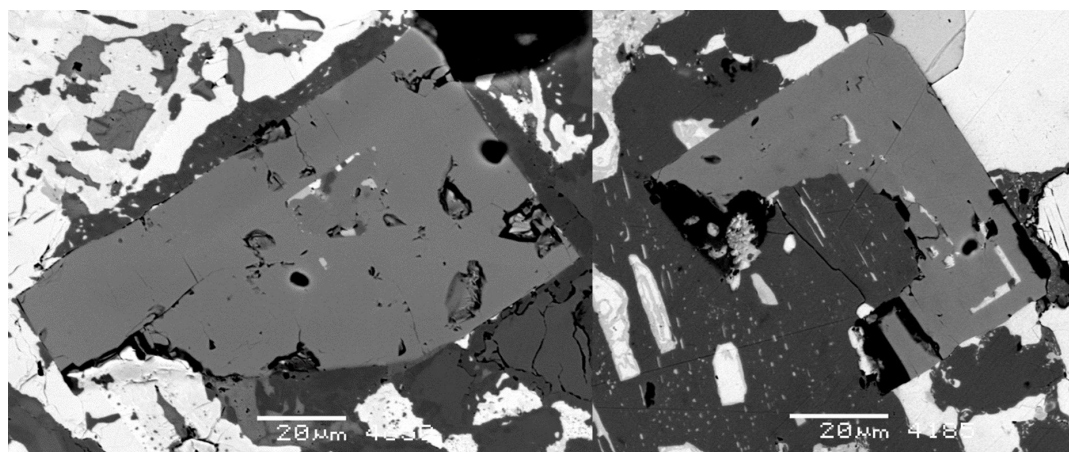
Обычно включения минералов сурьмы полностью растворены (рис. 21–24).



**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 Хараелахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. –430 м.

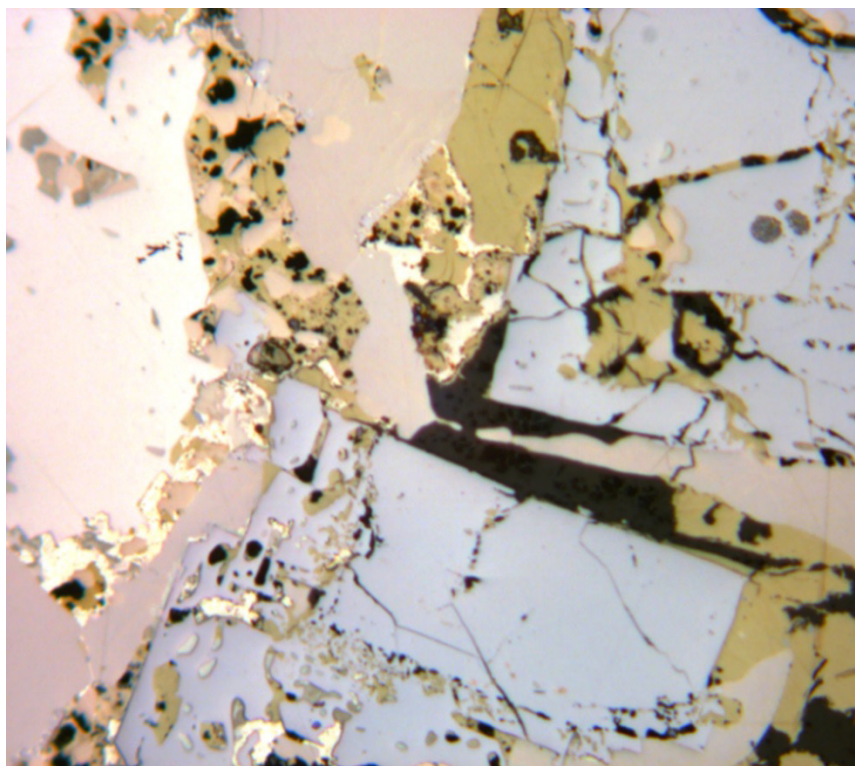


**Рис. 10.** Метакристалл Sb-сперрилита (в центре) с реликтами геверсита (серый) и паоловита (черный) сечет выделения инсизвайта (светлый), сростания геверсита (серый) и паоловита (черный), пластины паоловита. В отраженных электронах. Длина линейки 30 мкм. Анализы №23–24, табл. 4. Гнездо минералов благородных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

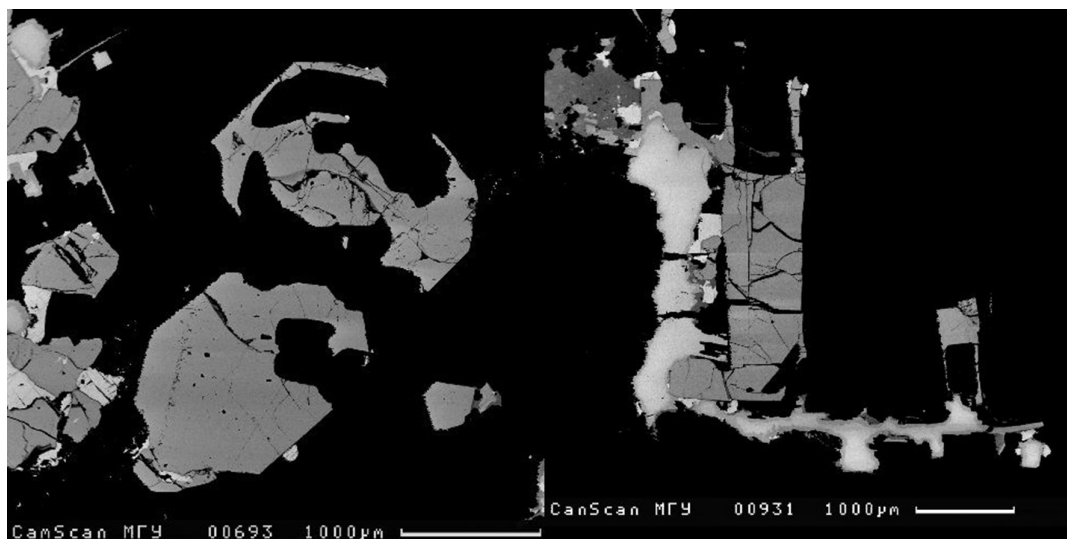


**Рис. 11.** Два кубовидных сложной формы метакристалла сперрилита (темно-серый) (ан. №3, табл. 1) с включениями реликтов паоловита (черно-серый), таймырита (черный) и фрудита (белый). В отраженных электронах. Длина линейки 20 мкм. Графические руды. Главная Хараелахская залежь. Рудник Октябрьский, гор.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

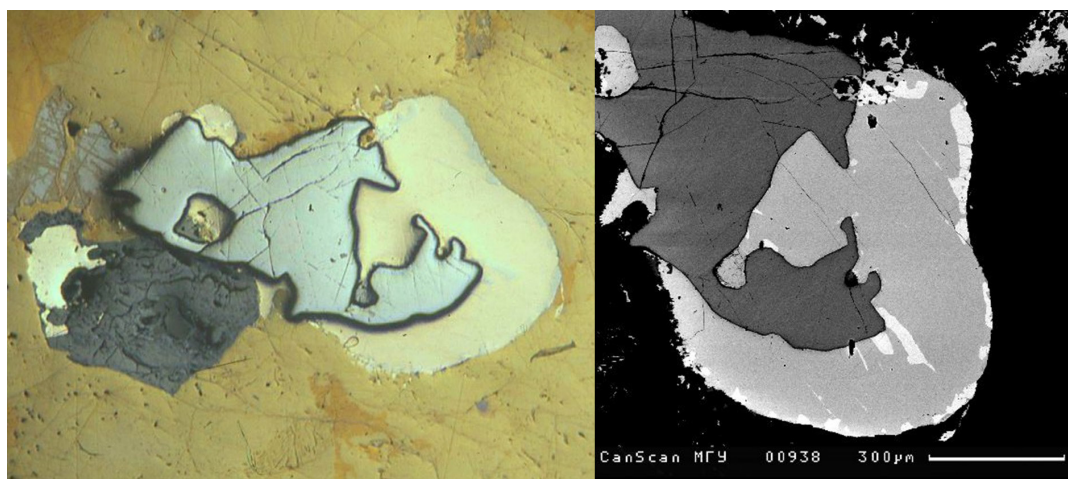




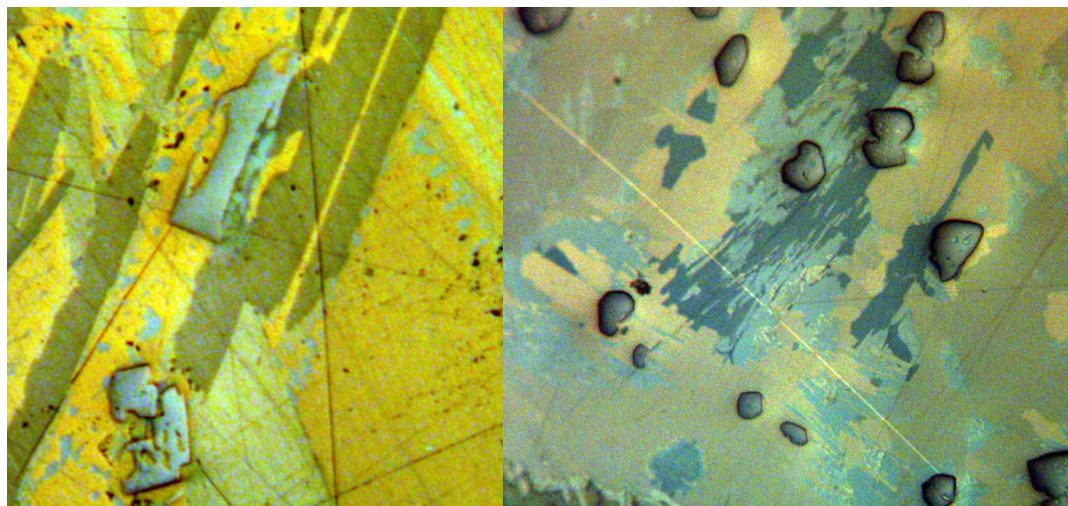
**Рис. 12.** Скелетные кубические метакристаллы сперрилита. Сперрилит сечет станнопалладинит (розоватый), плюмбопалладинит (желтоватый), тетраферроплатину (белая), халькопирит. Черное – поздний валлериит. В отраженном свете при 1 никеле. Ширина поля зрения 0.7 мм. Пентландит-халькопиритовые руды. Месторождение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



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



**Рис. 14.** Метакристалл сперрилит 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), мончеит (белый), гессит (темно-серый). Длина линейки 300 мкм. Главная Хараелахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. –430 м.



**Рис. 15.** Левый снимок: метакристаллы сперрилит сложной формы (рельефные серые) в агрегате паоловита (перекрещивающиеся двойники полиморфного перехода кубический → ромбический), с мелкими вростками геверсита (голубоватые). Ширина поля зрения 0.4 мм. Правый снимок: небольшие метакристаллы сперрилит (рельефные серые) в агрегате паоловита (перекрещивающиеся двойники сложной формы). Ширина поля зрения 0.2 мм. В отраженном свете, николи ×. Графические руды. Главная Хараелахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. –430 м. Колл. и фото Э.М. Спиридонова.

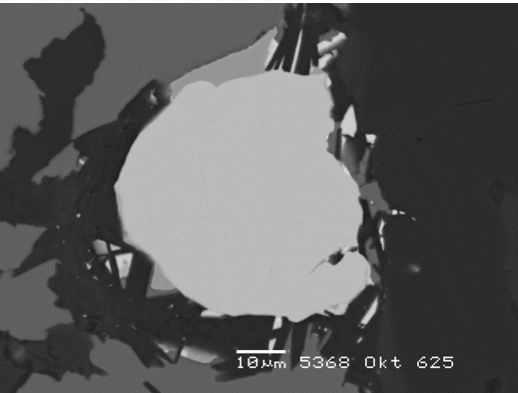


Рис. 16. Овальный метакристалл сперрилит сечет меншиковит (серый угловатый) на контакте сульфидов (темно-серые слева) и силикатов (черные справа). В отраженных электронах. Анализы №8–10, табл. 2. СВ фланг Октябрьского месторождения.

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  $(Pt_{0.98-1.01}Rh_{0-0.015})_{0.99-1.01}(As_{1.99-1.58}Sb_{0-0.36}Sn_{0-0.07}Se_{0-0.05}Bi_{0-0.035})_{1.99-2.01}$ . Содержание изоморфных примесей достигает (мас.%): Sb 11.8; Bi 2.1; Sn 2.0; Se 1.2; Rh 0.5.

Размер метакристаллов варьирует от микронного до 4–7 см, двойников – до 11–21 см. По воспоминаниям корифея норильской геологии Ю.К. Краковецкого, кристалл-двойник сперрилита длиной 21 см геофизики много лет использовали как гирию 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 сращения с холингвортитом
Pt	55.99	55.97	55.66	56.24	56.02	55.68
Rh	нпо	нпо	0.48	0.39	0.41	0.39
As	42.38	43.01	42.18	43.05	43.15	43.05
Sb	0.32	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
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

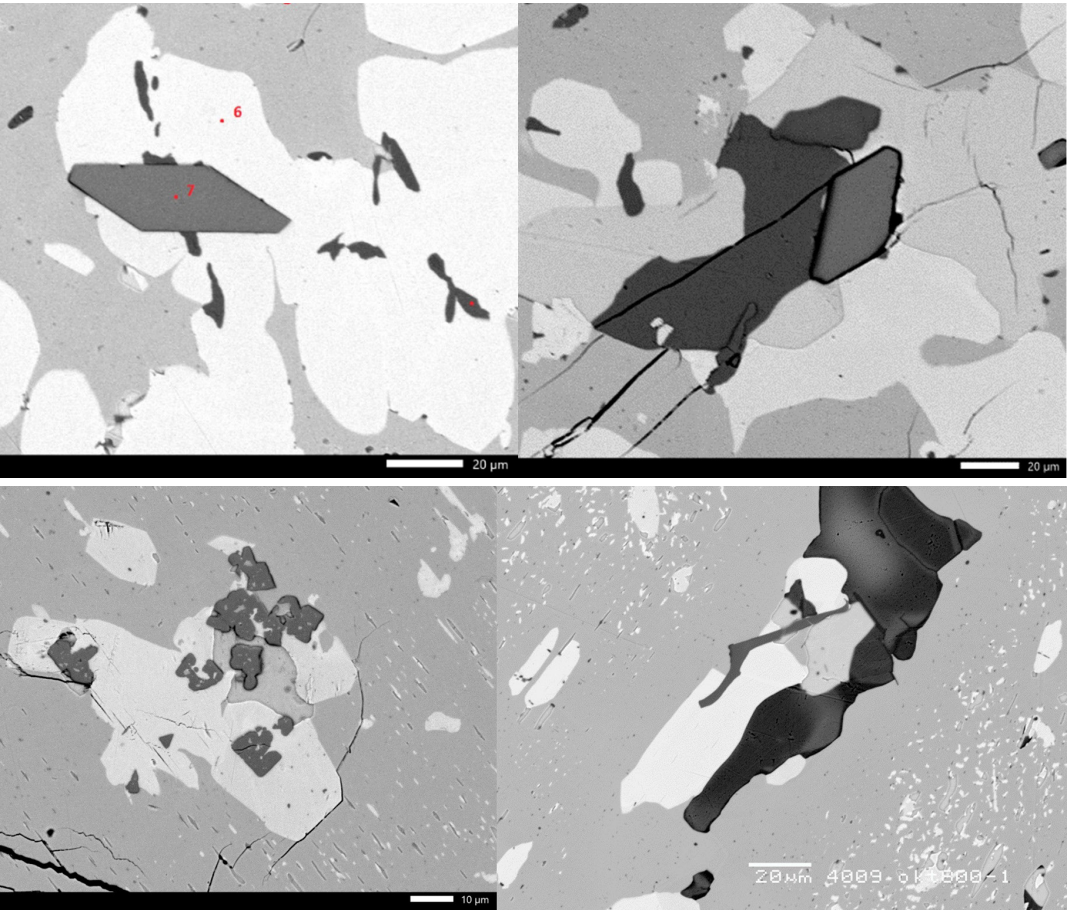
Примечание. Ru, Os, Ir, Pd, Au, Ag, Bi, Sn, Pb, S не обнаружены. Электронный микросонд, аналитик Н.Н. Коротаева.

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		край
Pt	54.97	55.64	55.63	56.50	56.11	55.72
Rh	0.42	0.34	нпо	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	Нпо	нпо	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 микросонд, аналитик Н.Н. Коротаева.



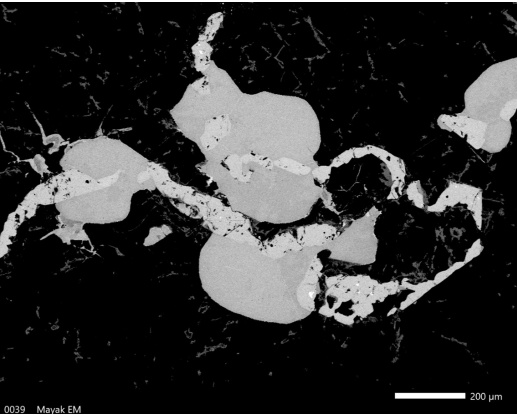


**Рис. 17.** Разнообразие форм метакристаллов сперрилита в гнезде Те-соболевскита (матрица) с тельцами мончеита (светлый до белого), алтаита (светло-серый), паоловита (черный), зонального электрума – кюстелита – Au-серебра, которые сперрилит сечет. Вверху ромбовидные метакристаллы сперрилита (ан. №6, 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 Хараелахская 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	10	22	24			
Pt	55.74	53.73	56.18	54.37	56.15	53.25	54.84	52.86
Rh	нпо	0.17	нпо	0.07	0.05	0.05	0.37	нпо
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	нпо	0.57	0.57	1.45	1.78	1.99	0.88	0.69
Se	нпо	нпо	0.79	нпо	нпо	нпо	нпо	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.

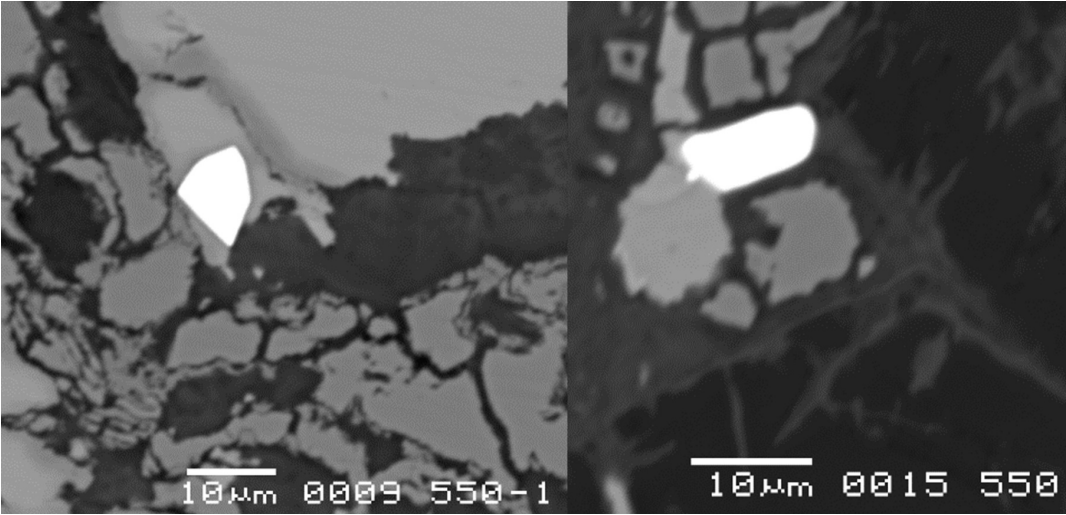


**Рис. 18.** Змеевидные прожилки сперрилита (светлый) (ан. №7, табл. 1) пересекли скопление метакристаллов таймырита (светло-серые овальные) и сульфидную массу руд. В отраженных электронах. Сплошные галенит-пентландит-кубанитовые руды. Месторождение Талнахское, рудник Маяк.

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

d α, Å	I/I <sub>p</sub> , %	1/d <sup>2</sup> изм.	1/d <sup>2</sup> 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 <sub>1</sub> )	52	0.30899	0.30899	3	1	1
1.722(α <sub>1</sub> )	6	0.33724	0.33708	2	2	2
1.655(α <sub>1</sub> )	3	0.36509	0.36517	3	2	0
1.5945(α <sub>1</sub> )	5	0.39332	0.39326	3	2	1

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



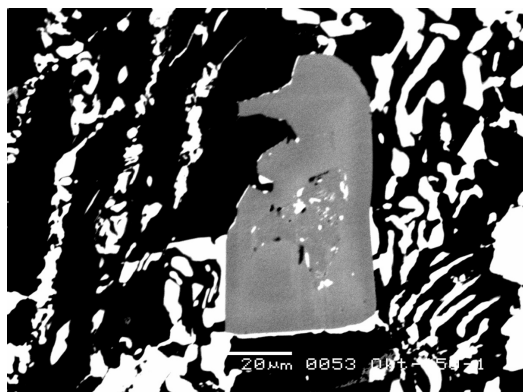
**Рис. 19.** Метакристаллы селенсодержащего сперрилита в брекчированных вкрапленных пентландит-пирротин-кубанит-халькопиритовых рудах. В отраженных электронах. Анализы №11–12, табл. 2. Рудник Таймырский, гор. –550 м.

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).

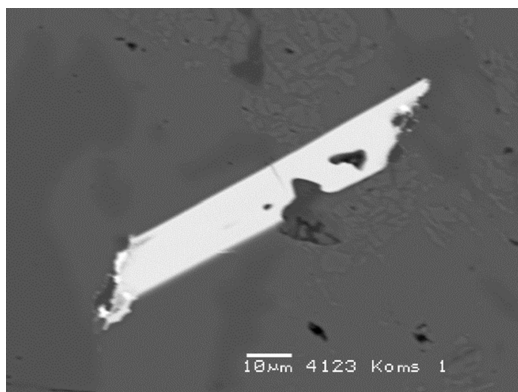
Сперрилит возник преимущественно в суль-

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 графит-

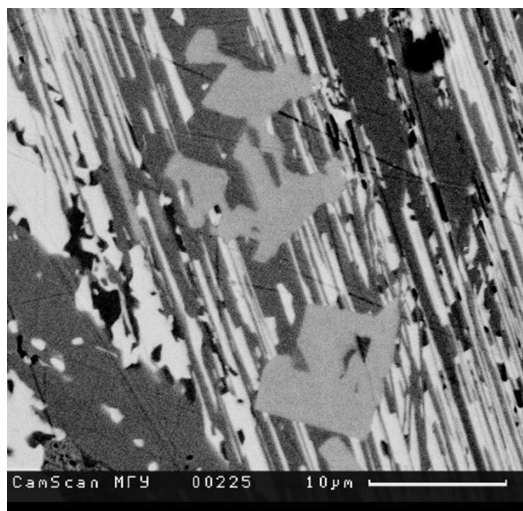




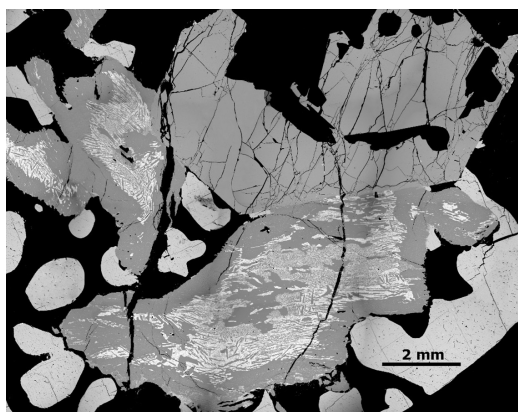
**Рис. 20.** Зональный метакристалл Sb-сперрилит сложной формы сечет паоловит (черный) и геверсит  $PtSb_2$  (белый). Центральная светлая зона сперрилита, обогащенная сурьмой, содержит массу реликтов замещенного геверсита. В отраженных электронах. Анализы №14–19, табл. 3. Эвтектические галенит-пентландит-талнахит-моихукитовые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



**Рис. 21.** Метакристалл Sb-сперрилит 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-сперрилит сложной формы (серый) сечет тонкопластинчатые сростания минерала  $Pd_4SnSb$  (темно-серый), геверсита (светлый), электрума (серый). Черные – прожилки позднего валлериита. В отраженных электронах. Линейка 10 мкм. Анализы №24–26, табл. 4. Графические руды. Главная Хараелахская залежь. Рудник Октябрьский, гор. –430 м.

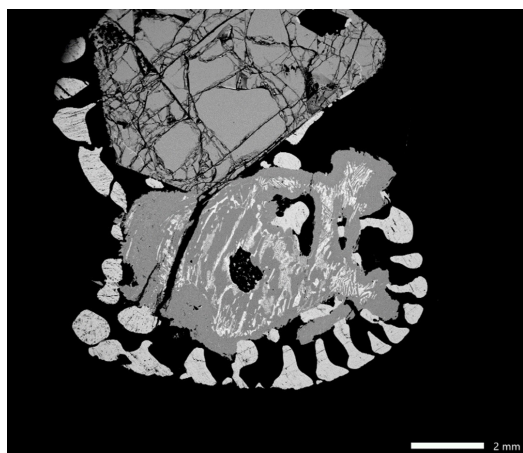


**Рис. 23.** Крупный метакристалл Sb-сперрилит весьма сложной формы (светло-серый сверху справа) сечет алтаит (светлый), сростание минерала  $Pd_4SnSb$  и Sb-паоловита (серые) с тонкими структурами распада геверсита (светлые). Графические галенит-кубанитовые руды со своеобразными псевдоморфозами алтаита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

ческих руд, галенит которых содержит заметное количество селена.

Оптические свойства норильского сперрилита стандартные. Отражение обогащенного су-

рьмой сперрилита (рис. 24) немного выше, чем у беспримесного. Твердость по микровдавливанию беспримесного сперрилита кристаллов рис. 2  $VHN_{100} = 974 \pm 20 \text{ кг/мм}^2$ . Твердость по микровдавливанию сурьмянистого сперрилита крупного кристалла рис. 24  $VHN_{100} = 956 \pm 20 \text{ кг/мм}^2$  – 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 алтаит (белый), сростание налдреттита и минерала  $\text{Pd}_3\text{SnSb}$  (серые) с тонкими структурами распада геверсита (светлые). Графические галенит-кубанитовые руды со своеобразными грибобразными псевдоморфозами алтаита по галениту. В отраженных электронах. Анализ №27, табл. 4. Главная Хараелаская сульфидная залежь. Рудник Октябрьский, гор. –530 м.

лонной. Параметр элементарной ячейки беспримесного норильского сперрилита  $a_0 = 5.967(2) \text{ \AA}$  отвечает эталонному значению для этого минерала  $5.967 \text{ \AA}$ .

## Преобразование сперрилита

Т.Л. Евстигеева обнаружила каймы платины на кристаллах сперрилита и назвала такой процесс замещения деарсенизацией [Евстигеева и др., 1990]. В работе [Spiridonov et al., 2016] показано, что деарсенизация сперрилита, маякита и иных арсенидов палладия порождена процессами эпигенетического посттраппового низкоградного метаморфизма в условиях пренит-пумпеллитовой 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., Евстигеева 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. Траппы 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.
- Евстигеева Т.Л., Генкин А.Д. Платинометалльная минерализация норильских медно-никелевых руд: природные и экспериментальные данные. В кн.: Генетические модели рудных месторождений СССР. Новосибирск: Наука, 1990. С. 98–116.
- Евстигеева 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  $\text{PbS} - \text{PbTe}$ . В кн.: Упорядоченность и распад твердых растворов в минералах. М.: Наука, 1979. С. 185–190.
- Кулагов Э.А. Особенности минерального состава руд месторождения Норильск-I. 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 Хью Тхань, Толстых Н.Д., Глотов А.И., Петрова Т.Е. Рудно-геохимическая специализация пермо-триасовых ультрамафит-мафитовых комплексов Северного Вьетнама // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. №10. С. 1474–1487.
- Спиридонов Э.М. Рудно-магматические системы Норильского рудного поля // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. С. 1356–1378.
- Спиридонов Э.М. Генетическая модель месторождений Норильского рудного поля // Смирновский сборник-2019. М.: Макс Пресс, 2019. С. 41–113.
- 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. Холингвортит и сперрилит в сульфидных медно-никелевых рудах Байкальского и Норильского месторождений // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2025. №5. С. 60–68.
- Спиридонов Э.М., Беяков С.Н., Коротаева Н.Н., Езоров К.В., Иванова Ю.А., Наумов Д.И., Серова А.А. Минералы  $\text{Pd}_3\text{Ni}_2\text{As}_2$  и ассоциирующие минералы сульфидных руд восточного фланга Октябрьского месторождения, Норильское рудное поле // Вестник МГУ. Серия геология. 2020. №4. С. 22–29.
- Спиридонов Э.М., Беяков С.Н., Янакурт В.О., Коротаева Н.Н. Норильское рудное поле: прямое доказатель-

ство пневматолитового генезиса минералов палладия в слюдяных 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. №8. С. 867-875.

Спиридонов 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, хиббингит, Мп хиббингит, сидерит, фосгенит, сфалерит в магматогенных пурторанитовых рудах // Вестник МГУ. Геология. 2022. №3. С. 70-82.

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., Куликова И.М., Коротаева Н.Н., Середя 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, Goi's 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., 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. 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., 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.

Spiidonov E., Serova A., Belyakov S., Sereda E., Tuschentsova I. Gold as indicator of the formation history of noble-metal minerals in Noril'sk sulfide ore. Northern Siberia, Russia // 13<sup>th</sup> 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<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, and a comparison with sperrylite, PtAs<sub>2</sub> // 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 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.